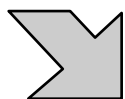


Revista de la Asociación Argentina  
de Energías Renovables y Ambiente  
Volumen 29  
2025

# AVERMA

Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente





Asociación Argentina de Energías  
Renovables y Ambiente - ASADES

# AVANCES EN ENERGÍAS RENOVABLES Y MEDIO AMBIENTE AVERMA

Vol. 29 Año 2025  
ISBN 978-987-29873-1-2  
Secciones 1 a 9

## COMISIÓN DE PUBLICACIONES

### Directora

Martínez Bogado, Mónica

### Consejo Editorial

Cadena, Carlos

## COMITÉ EDITORIAL

Graciela Viegas, Jéscica Esparza, Guillermina Re, Ismael Eyra, Pedro Chevez, Julieta Balter, Jorge Barral, Alba Lema, Julio Durán, Mariela Videla, Sonia Esteban, Andrés Díaz, Rocío Guido, Santiago Fondoso Ossola, Marcos Hongn, Camila Gea Salim, Aien Salvo, Juan Francisco Linares, Rodrigo Alonso-Suárez, María José Denegri, Verónica Javi, Camila Binda, Mónica Pasculli, Pablo Dellicompagni, Martín Zoloff Michoff

## COMISIÓN ORGANIZADORA

**Instituto de Investigaciones y Políticas del Ambiente Construido (IIPAC, CONICET-UNLP).** Facultad de Arquitectura y Urbanismo (FAU). Universidad Nacional de La Plata (UNLP).

Gustavo San Juan. Irene Martini. Graciela Viegas. Rocío Salas Giorgio. Jimena Lacunza. Camilo Vázquez Wlasiuk. Rocío Rodríguez Tarducci. Pilar Bilbao. Santiago Fondoso. Emilia Urtenèche. Micaela Seltzer. Daniela Cortizo. Camila Arregui.

**Programa Provincial de Incentivos a la Generación de Energía Distribuida (PROINGED)**, dependiente del Foro Regional Eléctrico de Buenos Aires (FREBA). Subsecretaría de Energía del Ministerio de Infraestructura y Servicios Públicos (MIySP) de la provincia de Buenos Aires.

PROINGED: Ricardo Lospinatto. Paola Turón. Adriano Boragina. Andrea Méndez. Ramiro Borga. Nicolás Silva. FREBA: Fernando Pini. Lisandro Gordillo. Marina Lugones

## COMITÉ CIENTÍFICO

Graciela Viegas, Gustavo San Juan, Jorge Barral, Julio Durán, Mariana Tamasi, Rafael Oliva, Sonia Esteban

## APOYO TÉCNICO INFORMÁTICO

Tolaba, Miguel - Troviano, Mauricio

## COMITÉ EVALUADOR

Abal, Gonzalo  
Abeledo, Sebastián  
Alamino Naranjo, Yesica  
Alchapar, Noelia  
Alessio, Agustín  
Alias, Herminia  
Alonso Frank, Alción  
Altobelli, Fabiana  
Álvarez, Analía  
Andreoni, Soledad  
Aramayo, Cristian  
Arévalo, Carla  
Arrieta, Gabriela  
Ávila, Graciela Noemí  
Bahamonde, Pablo  
Barbero, Dante  
Barral, Jorge  
Barea, Gustavo  
Bazán, Natalia  
Becchio, Valentín  
Belmonte, Silvina  
Bertossi, Marcelo  
Birche, María Belén  
Boccaccini, Luis  
Boragina, Adriano  
Boutet, María Laura  
Bove, Italo  
Calderón, Andrea  
Calvo, Ángel  
Cadena, Carlos A.  
Céspedes, Carlos German  
Chemes, Jorge  
Chevez, Pedro  
Cisterna, María Susana  
Clementi, Luciana  
Clavijo, Araceli  
Corica, Lorena  
Correa, Erica  
Cortizo, Daniela  
Costa, Rodrigo  
Coutsiers, Ernesto  
D'Amanzo, Micaela  
De Prada, Rodrigo  
Dellicompagni, Pablo  
Díaz, José Alberto  
Diulio, María Paz  
Dicroce, Luciano  
Díscoli, Carlos  
Durán, Gonzalo  
Durán, Rodrigo  
Durán, Julio  
Esteves, Alfredo

Esteban, Sonia  
Esparza, Jéscia  
Eyra, Ismael  
Farfán, Roberto Federico  
Fernández, Amalita  
Filippín, Celina  
Filipovich, Ruben  
Flores Larsen, Silvana  
Fondoso, Santiago  
Franco, Judith Ada  
Freaza, Nadia  
Furtado, João Victor  
Galimberti, Pablo  
Ganem, Carolina  
Garnica, Javier  
Gea, Marcelo  
Georgetti, Leandro  
Giubergia, Jorge Horacio  
Gómez, Gabriel  
González, Mario  
González, Silvina Mariana  
González, Adrián  
Gonzalo, Guillermo  
Guerrero, Elsa Marcela  
Gutiérrez, Ricardo Alberto  
Hernández, Alejandro  
Hessling, Franco  
Hongn, Marcos  
Iribarnegaray, Martín  
Ise, María Alejandra  
Jacinto, Guillermina  
Jacobo, Guillermo  
Jensen, Karina  
Kuchen, Ernesto  
Krautner, Alejandro Javier  
Laguarda, Agustín  
Larson, Anahí  
Leveratto, María José  
Lobo Maza y Ramito, Flavia  
Lozada Montanari, Malena  
Luccini, Eduardo  
Luccini, Martín  
Lusi, Anabela  
Mathisson, Juan Francisco  
Martínez Bogado, Mónica  
Mercado, María Victoria  
Michaux, Celina  
Miguel, Sebastián  
Milanesio, María Virginia  
Mora Fresca, Carlos  
Morris, Jonathan  
Nores Pondal, Federico

De Oliveira Filho, Manoel  
Orsi, Ximena  
Orte, Facundo  
Oviedo, Oscar  
Pedace, Roque  
Pérez, María Dolores  
Pontin, María Isabel  
Quiñonez, José  
Ramos, Ivana  
Rearte, Martin  
Righini, Raúl  
Rizzo, Ana  
Rodríguez, Lucas  
Rodríguez, Judith  
Rodríguez, Ramiro  
Rojas Villena, Mónica  
Salette, María José  
Salazar, Germán  
Salazar Acosta, Luisa María  
Salvo, Aién  
Salvo, Nahuel  
Sánchez Amonio, María  
San Juan, Gustavo  
Chaz Sardi, María Celeste  
Serrano, Víctor Hugo  
Sphar, Germán  
Spivak L'Hoste, Ana  
Stagnitta, Roque  
Stefanini, Valentín Antonio  
Stern, Valeria  
Suarez, Pablo  
Szwarc, Gerardo  
Tanducci, Rocío  
Taretto, Kurt  
Teixeira-Branco, Vivian  
Teliz, Erika  
Urtenecche, Emilia  
Valdez, Marcelo Federico  
Vera, Luis  
Viego, Valentina  
Viegas, Graciela Melisa  
Vilela, Olga  
Vilte, María del Socorro  
Villar, Gonzalo  
Villanueva, Solange Noelia  
Vitale, Gerardo  
Weht, Rubén  
Zitzer, Alejandro

## ÍNDICE

### TEMA 1. ARQUITECTURA AMBIENTALMENTE CONSCIENTE Y HÁBITAT

|                                                                                                                                                                                                                                                       |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| EVALUACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE PLACAS DE RESIDUOS TEXTILES Y ALMIDÓN DE PAPA CON UNA EXPERIMENTAL CAJA CALIENTE<br>Kristina Atanasoska                                                                                                     | 10  |
| COMUNIDADES DE EDIFICIOS DE ENERGÍA CERO NETA (NZEB) EN CLIMAS DE ALTO<br>EVALUACIÓN ACÚSTICA DE UN JARDÍN VERTICAL MODULAR COMO SOLUCIÓN DE<br>INFRAESTRUCTURA VERDE URBANA<br>Ana Rizzo La Malfa, Ariel Velis, Carlos Posse, Gustavo Basso          | 22  |
| EVALUACIÓN DE UNA PROPUESTA DE REHABILITACIÓN TÉRMICO- ENERGÉTICA DE<br>EDIFICIO ESCOLAR EXISTENTE A PARTIR DE SIMULACIÓN DINÁMICA<br>Guillermina Ré, Celina Filippín                                                                                 | 34  |
| CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DE PLACAS BASADAS EN DESCARTES TEXTILES.<br>COMPARATIVA ENTRE MEDICIONES EN CONDICIONES REALES Y DE LABORATORIO<br>Marta Edith Yajnes, Abraham Alexis Becerra Araneda, Sebastián Niemetschek                                  | 46  |
| MONITOREO, REFUNCIONALIZACION Y SIMULACIÓN ENERGETICA DE UNA VIVIENDA DE<br>INTERES SOCIAL EN CATAMARCA<br>Alicia Macias, Ana Mariela Martinena, Celina Filippín, Víctor García                                                                       | 59  |
| CARACTERÍSTICAS ACÚSTICAS DE PANELES DISEÑADOS A PARTIR DE TABLEROS<br>AGLOMERADOS DE BAGAZO CERVECERO<br>Fernando Bacigalupo, Nilda Vechiatti, Federico Iasi, Germán Galarza, Lucia Rossi, Emiliano Ciannamea,<br>Pablo Stefani, María Andrea Farina | 71  |
| PROPUESTA DE REHABILITACIÓN ENERGÉTICA DE UN EDIFICIO DE SALUD EN<br>CATAMARCA MEDIANTE MONITOREO Y SIMULACIÓN HIGROTÉRMICOS<br>Ana M. Martinena, Alicia Macias, Celina Filippin, Víctor O. García                                                    | 83  |
| CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO LUMÍNICO DE CORTINAS TEXTILES DUALES.<br>IMPACTO EN LA DISPONIBILIDAD Y UNIFORMIDAD DE LA LUZ NATURAL<br>Ayelén Villalba, Julieta Yamín, Andrea Pattini                                                            | 95  |
| SOLUCIONES BASADAS EN LA NATURALEZA COMO ESTRATEGIA DE CONSERVACIÓN DE<br>LA ENERGÍA EN VIVIENDAS MÁSCAS. SISTEMAS DE ENVERDECIMIENTO VERTICAL<br>Pablo Suárez, Claudia Martínez, Érica Correa                                                        | 106 |



VIVIENDAS SOCIALES SOSTENIBLES: EVALUACIÓN DE ESTRATEGIAS PASIVAS DE DISEÑO EN CLIMAS SEMIÁRIDOS  
María P. Mateo, Gustavo J. Barea Paci, Carolina Ganem Karlen **119**

MEDICIÓN DE LA REFLECTIVIDAD DE LA RADIACIÓN INFRARROJA TÉRMICA DE LÁMINAS DE CONTROL SOLAR  
Luis P. Thomas, Beatriz M. Marino, Natalia Muñoz **131**

EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES DEL AMBIENTE TÉRMICO EN VIVIENDAS SOCIALES DE TUCUMÁN  
Viviana M. Nota, Sara Lía Ledesma, Cecilia F. Martínez, Sebastián A. Bollea **141**

LINEAMIENTOS BIOAMBIENTALES PARA LA REHABILITACIÓN DE UN EDIFICIO PATRIMONIAL EN EL IMPENETRABLE. I+D POSIBLES EN UN CONTEXTO DE CRISIS DEL SISTEMA DE CIENCIA Y TÉCNICA NACIONAL  
Ismael Eyras, Gabriel Burgueño Galván, María José Leveratto, Verónica Segura, Guido Guillén, Sebastián Zanetti **153**

HERRAMIENTA DE RELEVAMIENTO PARA LA ELABORACIÓN DE UN DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO EN ÁREAS DE INTERNACIÓN  
Santiago T. Fondoso Ossola, Pedro J. Chévez, Dante A. Barbero, Irene Martini **165**

DISEÑO DEL ESPACIO URBANO PARA LA GESTIÓN SUSTENTABLE DE AGUAS PLUVIALES. Caso de estudio: “BARRIO 126 VIVIENDAS” DE YERBA BUENA, TUCUMÁN  
Marta S. Cisterna, Sandra G. Márquez Vega<sup>1</sup>, Luciano M. Garbero, Cintya Villa, Sebastián Atencia Gualda **176**

ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA TÉRMICA EN CONSTRUCCIONES LIVIANAS: BASES METODOLÓGICAS PARA UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA  
María Laura Iezzi, María Victoria Mercado, Julieta Balter **188**

EFICIENCIA ENERGÉTICA EN HOSPITALES: ADAPTACIÓN DE HERRAMIENTAS DE ETIQUETADO PARA SU APLICACIÓN AL SECTOR SALUD  
Micaela Seltzer, Dante Andrés Barbero, Irene Martini **198**

ANÁLISIS MICROCLIMÁTICO Y SOCIAL DE CENTROS DE MANZANA COMO ESTRATEGIA DE REGENERACIÓN URBANA  
Jesica A. Álvarez, María B. Sosa, Erica N. Correa **210**

DESEMPEÑO ACÚSTICO DE MANTOS DE LANA GRUESA DE OVEJA PARA APLICACIONES EN ARQUITECTURA SOSTENIBLE  
Alejandra Núñez Berte, Nilda Vechiatti, Federico Iasi, Germán Galarza, Daniel Tomeo 223

INTERVENCIONES EN CASAS-MUSEO EN SAN MIGUEL DE TUCUMÁN: SIMULACIÓN ENERGÉTICA Y ANÁLISIS COMPARATIVO  
María del Milagro Rougès Forcada, Raúl Fernando Ajmat, María Silvana Zamora 233

## **TEMA 2. ENERGÍA SOLAR: APLICACIONES TÉRMICAS, AGRÍCOLAS, QUÍMICAS E INDUSTRIALES**

DETERMINACIÓN DE LAS PÉRDIDAS ENERGÉTICAS Y PRODUCCIÓN NOCTURNAS PARA UN DESTILADOR SOLAR ASISTIDO CON TANQUE ACUMULADOR  
Fabián L. Venier, Rodolfo G. Stoll, Javier Marchesi, María I. Pontín, Javier H. Zizzias 245

ANÁLISIS DE LA DEMANDA ENERGÉTICA DE LA EXTRACCIÓN DE ACEITES ESENCIALES Y SU COBERTURA CON ENERGÍA SOLAR CONCENTRADA: ENFOQUE EN EL DIMENSIONAMIENTO Y LAS PÉRDIDAS TÉRMICAS DEL CIRCUITO  
Rodolfo G. Stoll, Ariana Posadas, Ezequiel Podversic, Jorge A. Daghero 257

EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES TECNOLÓGICAS DE MATERIALES DE MULLITA PARA SU USO EN ENERGÍA SOLAR TÉRMICA CONCENTRADA  
Anabella Mocciaro, Camila Peters, María F. Hernández, Diego Richard, Nicolás M. Rendtorff 267

NORMA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE EQUIPOS SOLARES COMPACTOS PARA CALENTAMIENTO DE AGUA DOMICILIARIA EN DISTINTAS REGIONES GEOGRÁFICAS DE LA REPÚBLICA ARGENTINA  
Anahí Lanson, Jorge R. Barral, Federico Nores Pondal, Gastón Lunardelli, Joaquín Garat 279

DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA ABSORTANCIA SOLAR DE TECHOS METÁLICOS ONDULADOS EN CONDICIONES REALES: METODOLOGÍA Y ANÁLISIS DE RESULTADOS  
Gerardo Vitale, Andrés Monetta, Italo Bove 288

APLICACIÓN DEL MÉTODO DE LA UTILIZABILIDAD EN COLECTORES SOLARES DE TUBOS EVACUADOS TIPO WATER-IN-GLASS PARA ESTIMAR SU RENDIMIENTO A LARGO PLAZO EN RÍO CUARTO  
María V. Milanésio, Alba I. Lema, Adrián F. Valetti, Jorge R. Barral, Pablo D. Galimberti 300

### **TEMA 3. ENERGÍA SOLAR: CONVERSIÓN FOTOVOLTAICA**

ROL DEL HÁBITAT CONSTRUIDO EN LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA COMUNITARIA. CASO DE ESTUDIO EN SAN JUAN, ARGENTINA

Alción Alonso Frank, Guillermina Ré

**312**

AVANCES Y DESAFÍOS EN LA IMPLEMENTACIÓN DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICA DISTRIBUIDA EN LA CNEA

Juan Plá, Mariela Videla, Ismael Eyra, Claudio G. Bolzi, Juan I. Pérez, Sebastián Muñoz, Julio C. Durán, Mónica Martínez Bogado

**324**

CELDA SOLARES DE PEROVSKITAS PARA USOS EN DISPOSITIVOS MÓVILES Y APLICACIÓN EN INTERIORES

Victoria A. Gómez Andrade, Nina Bonnet, Manuel Racca, Camila Colomb, Micaela Pérez, Francisco N. Calderón Acosta, Martha Díaz Salazar, M. Dolores Pérez

**336**

### **TEMA 4. ENERGÍA EÓLICA, GEOTÉRMICA, MAREOMOTRIZ, HIDRÁULICA, BIOMASA Y BIOGÁS**

CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE COCINA MEJORADA A LEÑA PARA LOS CERROS DE SALTA

Valentín Becchio, Laura A. Mosconi, Carolina Subelza, Karla M. Pérez Domínguez, Pablo R. Dellicompagni

**346**

PREDICCIÓN DIARIA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA DE UN SISTEMA MICROEÓLICO EMPLEANDO REDES NEURONALES LONG SHORT-TERM MEMORY

Andrés Crespo, Claudio Reineri, Leonardo Sánchez, Daniel Anunziata, Eugenia Yorge, Gabriel Campetelli

**358**

### **TEMA 5. USO EFICIENTE Y RACIONAL DE LA ENERGÍA**

EFICIENCIA EN CALEFACCIÓN: IMPACTO EN LA SEGURIDAD DE ABASTECIMIENTO Y LA EXPORTACIÓN DE GAS

Leila Iannelli, Roberto Prieto, Salvador Gil

**370**

POTENCIAL DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA FOTOVOLTAICA EN LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES Y LA CIUDAD DE OLAVARRÍA: EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA

Verónica Córdoba, Gabriel Blanco, María Daniela Keesler

**379**

APROXIMACIÓN A UN INDICADOR DE VULNERABILIDAD ENERGÉTICA EN BARRIOS POPULARES DE SALTA A PARTIR DEL CENSO ENERGÉTICO 2024

Juan P. Soria, Facundo A. Pérez Machado, Facundo D. F. González, Nilsa M. Sarmiento Barbieri, Pablo. Duran

**392**

DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO Y PROPUESTAS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA Y ENERGÍAS RENOVABLES EN UNA EMPRESA LÁCTEA DEL INTERIOR DE LA PROVINCIA DE SANTA FE  
Martín S. García, Luis I. Silva, Luis E. Venghi, Daniel Cabrera Díaz **404**

## **TEMA 6. TECNOLOGÍAS ASOCIADAS A LAS ENERGÍAS RENOVABLES**

ANÁLISIS DEL CRÉDITO DE CAPACIDAD PARA LA GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE ENERGÍAS RENOVABLES EN LA MATRIZ ELÉCTRICA ARGENTINA  
Daniela Keesler, Gabriel Blanco, María E. Ramadán **416**

EVALUACIÓN COMPARATIVA DEL DESARROLLO DEL HIDRÓGENO VERDE EN LATINOAMÉRICA  
Ernesto Coutsiere, Marcelo Gea, Ramiro Rodríguez **429**

MITIGACIÓN DE ISLAS DE CALOR URBANAS. ESTUDIO ANUAL DE CAMPO Y LABORATORIO  
Pablo Cabrera, Gerardo Botasso, Ana M. Castro Luna **441**

SIMULADOR TÉRMICO DE PAVIMENTOS URBANOS CON INTERFAZ ACCESIBLE PARA EL USUARIO  
Pablo Cabrera, Maximiliano Martínez, Gerardo Botasso, Ana M. Castro Luna **451**

EVALUACIÓN FÍSICO-QUÍMICA Y ENERGÉTICA DE LA BIOMASA RESIDUAL DE PODA URBANA: CASO DEL MUNICIPIO DE AVELLANEDA  
Sergio Cataldo, Melisa Eyraz, Melisa A. Silvestrini, Jazmín Stivanello, Vanina L. Marino, Melisa D. Müller, Vanina B. Forlini, Melany G. Finn, Nicole O'Keeffe, Florencia E Mayra Paul **460**

DESARROLLO Y ENSAYO DE UN PROTOTIPO DE PANEL SOLAR DE AIRE CALIENTE. INDUSTRIALIZACIÓN PARA LA EFICIENCIA ENERGÉTICA  
Soledad E. Andreoni Trentacoste, Fabiana Mansilla, Jorge Oliva, Claudia Elizabeth Dido, Gerardo Wadel **472**

## **TEMA 7. RADIACIÓN SOLAR Y CLIMA**

RECONSTRUCCIÓN DE SERIES DE IRRADIANCIA GLOBAL HORIZONTAL CON HUECOS SINTÉTICOS MEDIANTE MODELOS DE MACHINE LEARNING Y DATOS SATELITALES. CASO DE ESTUDIO: EL ROSAL, SALTA  
Constanza B. López Ruiz, Rubén D. Ledesma, Germán A. Salazar, Janis Galdiño **484**

ESTIMADOR FÍSICO DE IRRADIANCIA SOLAR DE CIELO CLARO ADAPTADO PARA ALTITUDES VARIABLES EN AMÉRICA DEL SUR  
Juan C. Ceballos, Simone M.S. da Costa, Hallan S. Jesús, Jorge Forciniti, María L. Molina, Martín Leal **500**

COMPARACIÓN DE LA ENERGÍA SOLAR COLECTADA ENTRE PLANOS FIJOS Y SEGUIMIENTO EN DOS EJES EN LUJÁN (PAMPA HÚMEDA ARGENTINA)  
Raúl Righini, Pablo E. Ruiz, Sebastián Bazán, Valeria Stern

512

APLICACIÓN DE UN MODELO DE MACHINE LEARNING PARA CLASIFICAR LA NUBOSIDAD A PARTIR DE DATOS DE IRRADIANCIA GLOBAL HORIZONTAL  
Anabela Lusi, Facundo Orte, Elian Wolfram, José Ignacio Orlando

524

ADAPTACIÓN AL SITIO DE IRRADIANCIA SOLAR GLOBAL USANDO APRENDIZAJE AUTOMÁTICO. CASO DE ESTUDIO: COTA COTA Y CHIVAY (PERÚ)  
Miriam Manrique, Rubén Ledesma, Nicolas Rivera-Lera, Germán Salazar

533

MODELIZACION DE LA INCIDENCIA DE LA FORESTACIÓN SOBRE LA DISPONIBILIDAD DE RADIACIÓN SOLAR EN CAÑONES URBANOS DE BAJA DENSIDAD. CASO DE LA CIUDAD DE MENDOZA  
Cecilia G. Loncharich, Claudia F. Martinez, Erica N. Correa

544

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRAS DE IRRADIANCIA SOLAR DE CIELO CLARO MEDIANTE APRENDIZAJE AUTOMÁTICO NO SUPERVISADO  
Nicolás Rivera-Lera, Miriam Manrique, Germán Salazar, Rubén Ledesma, Agustín Laguarda

556

EVALUACIÓN DE ALGORITMOS DE APRENDIZAJE AUTOMÁTICO PARA LA CLASIFICACIÓN DE DÍAS DE CIELO CLARO  
Pablo Cinco Reynaga, Rubén Darío Ledesma

568

## **TEMA 8. ENERGÍAS RENOVABLES Y SOCIEDAD**

EL BIOGÁS COMO ESTRATEGIA DE TRANSICIÓN JUSTA EN COMUNIDADES RURALES VULNERABLES: ESTUDIO DE CASO EN LOS PINOS, ARGENTINA  
Pablo Sánchez Macchioli

576

PROPUESTA Y ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE UNA COMUNIDAD ENERGÉTICA EN EL PARTIDO DE SAN MARTIN, PROVINCIA DE BUENOS AIRES  
Mayra Agustina Ramírez, Mariana Tamasi, Cirilo Francisco Espain

589

TRANSICION PARA QUIEN? ENERGIA, RIESGO Y EXPECTATIVAS EN COMUNIDADES PUNEÑAS FRENTE A LOS MEGAPROYECTOS SOLARES  
Sofía Govetto, Facundo D. González, Facundo E. Corro Tosoni, Maximiliano Vilca, Verónica López

600

LA GESTION DE UNA IDEA: CENTRO BONAERENSE DE ENERGIAS RENOVABLES, LA PLATA, ARGENTINA  
Gustavo San Juan, Graciela Viegas, Joel Asambuyo, Graciano San Juan, Fabián Pérez, Ramiro Borga, Nicolás Silva

612

**HACIA UN DIAGNÓSTICO SITUADO DE LA VULNERABILIDAD ENERGÉTICA: DATOS OBTENIDOS DEL CENSO ENERGÉTICO 2024 EN BARRIOS POPULARES DE SALTA**

Melanie L. Pedraza, Cristian M. Lazarte, Maximiliano A. Vilca, Santiago M. Colque, Facundo D. F. González  
**624**

**EL HVO COMO COMBUSTIBLE LIMPIO EN ARGENTINA: ANÁLISIS DE IMPACTO Y OBSTÁCULOS CLAVES**

Juan Pablo Cecchini, Ernesto E. Coutsiere, Mariela Colombo, Viviana A. Venturino, Ramiro Rodríguez  
**635**

**ACCESO A LA ENERGÍA Y EDUCACIÓN RURAL: IMAGINARIOS SOCIOTÉCNICOS, USOS Y APROPIACIONES DE LA ENERGÍA EN CONTEXTOS DE DIVERSIDAD CULTURAL**

Genaro Vilte, Facundo González, Facundo Pérez Machado, Viviana Tarifa, Nuria Rodríguez, Rubén Darío González  
**647**

**MEJORAMIENTO DEL HÁBITAT EN BARRIOS POPULARES DEL GRAN LA PLATA: EXPERIENCIAS DESDE LA CONSTRUCCIÓN COLECTIVA DEL CONOCIMIENTO EN TORNO AL CONFORT AMBIENTAL A TRAVÉS DE TALLERES PARTICIPATIVOS**

Graciela Viegas, Jélica Belén Esparza, Ana Belén Malianessi, Martina Belén Santos, Joel Ezequiel Asambuyo, Sandra Ursino, María Eugenia Durante  
**659**

**EXPERIENCIA DE LA ASIGNATURA “CONSTRUCCIONES BIOCLIMÁTICAS”: ENSEÑANZA DE LAS NORMATIVAS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN PROYECTOS DE VIVIENDA PÚBLICA DE LA PROVINCIA DE SANTA FE. REGLAMENTACIÓN DEL DECRETO N°0387/2025 PARA VIVIENDAS SOCIALES**

Cristina Adriana Cervera, Jélica Anahí Álvarez, Federico Mateo  
**671**

**NICHOS DE INNOVACIÓN Y GENERACIÓN DISTRIBUIDA CON ENERGÍAS RENOVABLES EN LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES**

Santiago Garrido, Emilia Ruggeri, María Fernández Vicente  
**681**

**APROXIMACIÓN ESPACIAL DE LA VULNERABILIDAD ENERGÉTICA EN LAS PRINCIPALES METRÓPOLIS ARGENTINAS**

Mauro Montone, Rodrigo J. Durán, Miguel A. Condorí, Danae A. Franco Lopera  
**693**

**TEMA 9. SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO ENERGÉTICO**

**EVALUACIÓN DE LAS ECONOMÍAS DE ESCALA EN EL COSTO NIVELADO DE TRANSPORTE CARRETERO DE HIDRÓGENO COMPRIMIDO EN LATINOAMÉRICA**

Ernesto Coutsiere, Marcelo Gea, Ramiro Rodríguez  
**705**

### **FE DE ERRATAS DEL TEMA 3. ENERGÍA SOLAR: CONVERSIÓN FOTOVOLTAICA**

AVANCES SOBRE UN SIMULADOR DE PANELES SOLARES DE MEDIA CELDA Y ENSAYO BAJO CONDICIONES DE SOMBREADO ARBITRARIAS

Juan N. Cox, Rodrigo T. Mentucci, Ismael H. Eyra, Mariela E. Videla, Mónica G. Martínez Bogado 717

MÉTODO PARA ESTIMAR LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA FOTOVOLTAICA EN ARGENTINA

Emmanuel Ferreira 728

## EVALUACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE PLACAS DE RESIDUOS TEXTILES Y ALMIDÓN DE PAPA CON UNA EXPERIMENTAL CAJA CALIENTE

**Kristina Atanasoska**

Instituto de Investigaciones en Desarrollo Urbano, Tecnología y Vivienda (IIDUTyV) - Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Diseño (FAUD) - Universidad Nacional de Mar del Plata (UNMDP) –  
Deán Funes 3350 C.P. 7600 – Mar del Plata

Tel. 0223-5942396 e-mail: [kristinaatanasoska@mdp.edu.ar](mailto:kristinaatanasoska@mdp.edu.ar)

**RESUMEN:** La conductividad térmica es una propiedad clave en el desarrollo de materiales de construcción para una arquitectura energéticamente eficiente. En este estudio se presenta el diseño y metodología de calibración de una caja caliente de bajo costo, empleada para medir la conductividad térmica de placas elaboradas con residuos textiles y almidón de papa. La calibración del dispositivo se realizó mediante tres ecuaciones de regresión lineal, basadas en materiales de referencia con densidades aparentes entre 250 y 800 kg/m<sup>3</sup>. Los resultados obtenidos mostraron errores cercanos al 10 % en comparación con los valores declarados de dichos materiales, lo que valida la precisión del instrumento en contextos de investigación. Aunque se requieren más pruebas para densidades fuera del rango de calibración, la caja caliente demostró ser una herramienta práctica y confiable para el análisis térmico de materiales experimentales. Las placas experimentales evaluadas presentaron conductividades térmicas entre 0,065 y 0,24 W/m·K, en función de su densidad. De las cinco placas ensayadas, tres mostraron valores dentro de un rango potencialmente adecuado para su uso como material aislante.

**Palabras clave:** metodología de calibración, densidad aparente, materiales de construcción, aislantes alternativos.

### INTRODUCCIÓN

A nivel global se está incumpliendo el derecho fundamental a una vivienda adecuada. Según el informe de las Naciones Unidas-Hábitat (2023), 24,2 % de la población urbana vive en barrios marginales o en viviendas con condiciones inadecuadas. Según los datos del Registro Nacional de Barrios Populares en Proceso de Integración Urbana (ReNaBaP), en Argentina se registraron 5.687 barrios populares con aproximadamente 1.124.797 familias, de los cuales 14.066 viven en Mar del Plata (Secretaría de Desarrollo Territorial, Hábitat y Vivienda, 2023). En este contexto, la mayoría de las viviendas son autoconstruidas realizadas sin asistencia profesional y con una inversión mínima, lo cual aumenta la vulnerabilidad de la población y eleva el riesgo de padecer enfermedades. La Organización Panamericana de la Salud (2022) consideró que las condiciones habitacionales relacionadas con la salud son de suma importancia debido al tiempo que las personas pasan en sus hogares. Algunos de los principales riesgos señalados en ese informe, son el frío y la humedad. El frío lo asociaron con la alta morbilidad y mortalidad respiratoria y cardiovascular, mientras que la humedad, con las alergias y las enfermedades del tracto respiratorio, asma, neumonitis, alveolitis alérgica y disnea.

El problema que más afecta el comportamiento térmico de una envolvente es la falta o el uso insuficiente de aislamiento térmico. Los aislantes térmicos más utilizados en el mundo son las lanas minerales y las espumas plásticas (Basim Abu-Jdayil et al., 2019; Pavel y Blagoeva, 2018). Estos productos tienen una resistencia térmica muy alta, lo que los convierte en buenos aislantes térmicos; sin embargo, tienen un impacto ambiental, ya que requieren materias primas para su producción y contaminan al no ser biodegradables (Asdrubali et al., 2015). Gran parte de las investigaciones realizadas en el instituto donde se lleva a cabo esta actividad se enfocan en la producción del hábitat popular, y el desarrollo de nuevos



componentes en función de la disponibilidad de materiales y las oportunidades en el territorio. Para analizar la eficiencia térmica de los materiales alternativos y su viabilidad en aplicaciones habitacionales, una de las características más importantes es la conductividad térmica  $\lambda$  (W/m·K).

Existen diversos métodos e instrumentos disponibles para obtener la conductividad térmica. Para materiales homogéneos y muestras multicapa pequeñas, dos de los métodos más utilizados son el del medidor de flujo de calor (Instituto Argentino de Normalización y Certificación, 2002a) y el de la placa caliente (Instituto Argentino de Normalización y Certificación, 1995). En Argentina, el Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI) realiza ambos ensayos; sin embargo, su costo es elevado para fines de investigación. Un método para determinar la conductividad térmica de suelo y piedras que se puede realizar in situ es el de la sonda térmica, el cual se puede utilizar tanto para materiales homogéneos como para heterogéneos (American Society for Testing and Materials (ASTM), 2022). A su vez, para componentes constructivos y materiales homogéneos o no homogéneos de gran tamaño, los métodos más recomendados son la caja caliente con guarda y la caja caliente calibrada (Instituto Argentino de Normalización y Certificación, 1997). Estos métodos permiten medir el coeficiente de transmitancia térmica  $U$  (W/m<sup>2</sup>·K), teniendo en cuenta no solo el espesor de la muestra, sino también los efectos de la transferencia de calor por convección entre la superficie de la muestra y el aire dentro de la caja.

Varios grupos de investigación han desarrollado dispositivos de Caja Caliente Calibrada (CCC en adelante) con el objetivo de analizar el comportamiento térmico de materiales y sistemas constructivos. Asdrubali y Baldinelli (2011) diseñaron una CCC con dimensiones de cámara de 2,7 m × 2,0 m × 0,9 m y analizaron la conductividad térmica de una ventana de aluminio utilizando tres normas diferentes (ASTM C1363-05, ISO 8990 y GOST 26602.1-99). Concluyeron que la norma rusa era más precisa al ensayar materiales y componentes homogéneos, mientras que las normas americana y europea, ofrecían resultados válidos independientemente de la complejidad del material. Buratti et al. (2016) construyeron una pequeña CCC con área de apertura de 0,46 m × 0,46 m y utilizaron el laboratorio como cámara fría. Emplearon dos métodos, el método de flujo térmico y el método de la Caja Caliente, para analizar la conductividad térmica de morteros con fibra de vidrio. Shen et al. (2021) investigaron la relación entre las propiedades térmicas de envolventes de tamaño real y muestras a escala reducida utilizando una CCC con área de apertura de 35,5 m × 35,5 m. Derivaron una relación de escalado y demostraron que la prueba a escala reducida era efectiva y rentable. Tejeda-Vázquez et al. (2021) usaron una CCC con dos cámaras, cada una de 1 m × 1 m × 1 m, para analizar la conductividad térmica de muros de bloques de hormigón con y sin mortero. Simularon distintas condiciones climáticas considerando temperatura y humedad relativa, y concluyeron que el aumento de la humedad relativa disminuye la resistencia térmica del muro. Alhawari y Mukhopadhyaya (2022) diseñaron una CCC con cámaras caliente y fría, también de 1 m × 1 m × 1 m, construida con paneles de aislamiento al vacío. Lograron una CCC con una estabilidad excepcional, con fluctuaciones de temperatura en las cámaras por debajo de ±0,05°C. En Argentina, Villalba et al. (2017) diseñaron una caja caliente económica para medir el factor de aporte de calor solar en carpinterías con sombreado interior, y compararon los resultados con los obtenidos mediante el programa Window 6, descubriendo diferencias significativas.

En este trabajo se presenta la calibración de una pequeña Caja Caliente Calibrada experimental de bajo costo y el análisis de la conductividad térmica de las placas térmicas alternativas producidas con residuos textiles y almidón de papa. La calibración se realizó mediante la metodología de la Caja Caliente con la utilización de materiales con propiedades térmicas conocidas. La calibración dio como resultado tres ecuaciones diferentes, las cuales se pueden aplicar según las densidades aparentes de los materiales. Con esta metodología se ensayaron cinco placas de residuos textiles y almidón de papa con densidades que varían entre 306 y 540 kg/m<sup>3</sup>. En tres de las placas los valores de la conductividad térmica fueron inferiores a 0,1 W/m·K.

## METODOLOGÍA

### *Descripción del aparato*

Las dimensiones externas de la pequeña Caja Caliente Calibrada de bajo costo son 0,55 m x 0,55 m x 0,95 m de alto (Figura 1). Las paredes perimetrales de la cámara caliente están hechas de EPS (del inglés Expanded Polystyrene) de alta densidad de 4 cm de espesor, con conductividad térmica ( $\lambda$ ) de 0,032

W/m·K. La abertura de la caja, donde se colocan las muestras, es de 0,47 m × 0,56 m. Todas las uniones están selladas con cemento de contacto y silicona. La temperatura en la cámara caliente se genera mediante lámparas incandescentes que proporcionan potencia de 40, 42, 53, 60 y 100 W. El laboratorio utilizado como cámara fría tiene dimensiones de 3,5 m × 10 m × 3 m de alto y no cuenta con sistema de refrigeración ni calefacción.

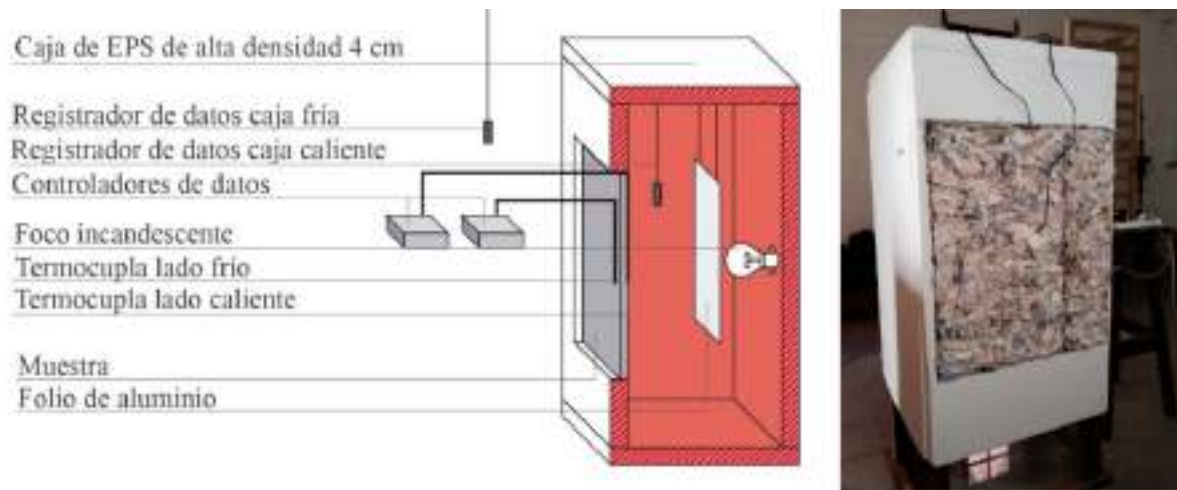


Figura 1: Corte perspectivado y vista general de la caja caliente calibrada.

Se utilizaron dos registradores de datos ELITECH RC-5+ para medir la temperatura del aire en las dos cámaras. Según el fabricante, el rango de funcionamiento es de -30°C a 70°C, con una precisión de  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ . Se utilizaron termocuplas conectados a controladores de temperatura ELITECH ETC-200+ para medir las temperaturas superficiales. El rango de control de temperatura de los controladores es de -50°C a 120°C, con una precisión de  $\pm 0,5^\circ\text{C}$  para temperaturas entre -10°C y 85°C.

### Calibración del aparato

La campaña experimental se llevó a cabo entre mayo y diciembre de 2024. Las pruebas tuvieron una duración mínima de 4 y máxima de 24 horas. En todas ellas se alcanzaron condiciones de estado estacionario durante al menos tres horas. Los datos de temperatura del aire y de las superficies se registraron cada 15 minutos. La variación de la temperatura del aire en la cámara caliente fue de hasta  $0,5^\circ\text{C}$ , y en la cámara fría, de hasta  $0,7^\circ\text{C}$ . En cuanto a las temperaturas superficiales, la variación fue de hasta  $0,3^\circ\text{C}$  en ambos lados, caliente y frío. Durante el estado estacionario, la diferencia de temperatura entre el aire de las cámaras caliente y fría fue siempre superior a  $20^\circ\text{C}$ . Las temperaturas del aire se utilizan para verificar que el sistema ha alcanzado el estado estacionario, mientras que las temperaturas superficiales se emplean en el procedimiento de calibración. Cabe destacar que, aunque la campaña experimental se extendió durante ocho meses, cada material fue ensayado en la misma época del año, cuando la temperatura exterior no presentó grandes variaciones. Por este motivo, no fue posible observar si los cambios de temperatura ambiental influyeron en las mediciones.

El procedimiento de calibración determina la precisión de la CCC. En esta investigación, para calibrar la nueva CCC se aplicó el método experimental o método de la Caja Caliente Calibrada (Alhawari & Mukhopadhyaya, 2022; Buratti et al., 2016). Esto se realizó utilizando diferentes materiales con conductividades térmicas conocidas, incluyendo placas de yeso, tableros OSB (del inglés Oriented Strand Board), placa de fenólico, MDF (del inglés Medium Density Fiberboard), madera de Paulownia conocida como Kiri, y cartón corrugado. Las conductividades térmicas medidas con la CCC experimental se compararon con los valores declarados por la norma argentina IRAM 11601 (2002) o proporcionados por el fabricante.

El primer paso consistió en determinar el flujo de calor a través de las muestras con datos conocidos. Este fue calculado teóricamente utilizando la Ecuación 1.

$$q = \frac{T_{mc} - T_{mf}}{R} \quad (1)$$

donde:

$q$  = flujo de calor ( $W/m^2$ )

$T_{mc}$  = temperatura superficial de la muestra del lado caliente ( $^{\circ}C$ )

$T_{mf}$  = temperatura superficial de la muestra del lado frío ( $^{\circ}C$ )

$R$  = la resistencia térmica del material ( $m^2 \cdot K/W$ )

La resistencia térmica fue calculada con la Ecuación 2.

$$R = \frac{t}{\lambda} \quad (2)$$

donde:

$t$  = espesor de la muestra (m)

$\lambda$  = conductividad térmica del material ( $W/m \cdot K$ )

El segundo paso consistió en determinar la tasa de flujo de calor perdido por los muros y puentes térmicos de la caja caliente (Ecuación 3). Para eso, se tuvo en cuenta que como fuentes de calor se utilizaron diferentes focos incandescentes de 40 W, 42 W, 53 W, 60 W y 100 W.

$$Q_p = Q_i - Q_m \quad (3)$$

donde:

$Q_p$  = tasa de flujo de calor perdido por los muros y puentes térmicos de la cámara caliente (W)

$Q_i$  = tasa de flujo de calor de ingreso en la cámara caliente (W)

$Q_m$  = tasa de flujo de calor que atraviesa la muestra (W)

El flujo de calor que atraviesa la muestra se calculó con la ecuación 4.

$$Q_m = q * A \quad (4)$$

donde:

$A$  = superficie de la muestra ( $m^2$ )

La tercera etapa de la calibración consistió en generar ecuaciones de regresión lineal basadas en la tasa de flujo de calor perdido ( $Q_p$ ) y la diferencia de temperatura de aire entre las cámaras caliente y fría. Estas ecuaciones se utilizaron posteriormente para estimar la pérdida de calor de las distintas muestras y así obtener la tasa de flujo de calor que atraviesa la muestra ( $Q_m$ ) (Ecuación 3). Con la tasa de flujo de calor que atraviesa la muestra ( $Q_m$ ), la diferencia de temperatura entre las superficies de las muestras del lado caliente y frío ( $T_{mc}$  y  $T_{mf}$ ), la superficie de la muestra ( $A$ ) y el espesor de la misma ( $t$ ), se aplicó la ley de Fourier para calcular la conductividad térmica de las muestras (Ecuación 5) y comparar los resultados con los valores declarados.

$$\lambda = \frac{Q_m * A}{t * (T_{mc} - T_{mf})} \quad (5)$$

Por recomendación de la bibliografía consultada (American Society for Testing and Materials, 2019; Asdrubali & Baldinelli, 2011; Buratti, Belloni, Lunghi, & Barbanera, 2016) donde se recomienda calibrar con paneles compuestos, la primera calibración se generó con un panel compuesto por una capa de vidrio de 4 mm y otra de EPS de 15 mm. En la segunda serie de calibración, se utilizaron muestras con conductividades térmicas conocidas, y se construyeron tres ecuaciones de regresión lineal diferentes para calcular la conductividad térmica de los materiales en función de su densidad aparente  $\rho$  ( $kg/m^3$ ).

### ***Materiales y producción de las placas experimentales***

Las placas ensayadas en esta investigación se conforman con residuos textiles de algodón de preconsumo (Figura 2). Este residuo es proveniente de la fabricación de la empresa Mirval, la cual tiene su taller de corte en Mar del Plata. Por lo general se trata de recortes de tamaños variados: rectangulares

de 20 cm por 20 cm y tiras de 5 cm por 1 m aproximadamente. Para la preparación de las muestras para los ensayos se cortó la tela en piezas de 5 cm × 5 cm, y para eso se utilizó una máquina de corte manual Choice con cuchilla de 70 mm y tijera de costura.



*Figura 2: Placas aislantes de residuos textiles y almidón de papa.*

El almidón que se usó para las placas es proveniente de las papas LAY'S®, las cuales se producen en la fábrica de PepsiCo ubicada en el parque industrial de la ciudad. A través de una entrevista personal con un empleado jerárquico de PepsiCo se descubrió que en el rebanado de las papas se generan entre 80 t y 100 t por mes de un almidón con 50 % de humedad, los cuales no tienen uso (M. Muñoz, comunicación personal, 16 de septiembre de 2022). Para mejorar las propiedades del almidón como ligante se usó la urea. Este plastificante mejora las propiedades mecánicas y la resistencia a la absorción de agua. Otro aditivo utilizado es el bórax ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ), para mejorar las propiedades frente al fuego (Donmez Cavdar et al., 2015) y por sus características antifúngicas (Kaya et al., 2023).

El método de fabricación de las placas consistió en la preparación de una mezcla con agua precalentada a 75°C, lo cual permitió disolver los ingredientes, pero no plastificar el almidón. Esta mezcla se colocó en una fuente y se horneó durante una hora a 200°C, temperatura en la que el almidón finalmente se plastificó. El moldeado y prensado se realizó manualmente mediante el método hand lay-up. El secado de las placas consistió en desmoldarlas sobre rejillas de 60 cm × 70 cm y completar el secado al aire en estantes diseñados especialmente para tal fin. Este proceso duró entre una y dos semanas, dependiendo de las condiciones climáticas.

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### ***Calibración preliminar de la caja caliente***

La primera calibración se realizó considerando la muestra ensamblada con un espesor total de 19 mm, compuesta por 4 mm de vidrio simple con una conductividad térmica de 0,58 (W/m·K) y 15 mm de EPS con una conductividad térmica de 0,037 (W/m·K). La resistencia térmica total de la muestra es de 0,41 ( $\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$ ). La calibración se llevó a cabo utilizando cuatro bombillas incandescentes con distintas potencias (42, 53, 60 y 100 W), que generaron diferencias en las temperaturas del aire y de la muestra. Los resultados pueden observarse en la Tabla 1.

Tabla 1: Resultados de la calibración del panel compuesto

| Tasa de flujo de calor ingresado $Q_i$ (W) | Temperatura del aire de la caja caliente $T_{ac}$ (°C) | Diferencia de la temperatura de aire $\Delta T_a$ (°C) | Temperatura superficial de la muestra del lado caliente $T_{mc}$ (°C) | Diferencia de la temperatura superficial de las muestras $\Delta T_m$ (°C) | Tasa de flujo de calor a través de la muestra $Q_m$ (W) | Tasa de flujo de calor perdido $Q_p$ (W) |
|--------------------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| 100                                        | 68,57                                                  | 52,73                                                  | 56,60                                                                 | 30,77                                                                      | 19,99                                                   | 80,01                                    |
| 60                                         | 48,10                                                  | 32,90                                                  | 41,10                                                                 | 19,47                                                                      | 12,65                                                   | 47,35                                    |
| 53                                         | 49,40                                                  | 29,53                                                  | 43,33                                                                 | 18,80                                                                      | 12,22                                                   | 40,78                                    |
| 42                                         | 41,07                                                  | 23,83                                                  | 34,20                                                                 | 13,40                                                                      | 8,71                                                    | 33,29                                    |

Con la tasa de flujo de calor perdido  $Q_p$  (W) y la diferencia de temperatura entre el aire en las cámaras caliente y fría  $\Delta T_a$  (°C) producida durante las mediciones, se derivó una ecuación de regresión lineal (Ecuación 6). El coeficiente de regresión es 0,9986. La ecuación de regresión lineal de la calibración preliminar se puede observar en la Figura 3.

$$Q_p = 1,6378 * \Delta T_a - 6,5537 \quad (6)$$

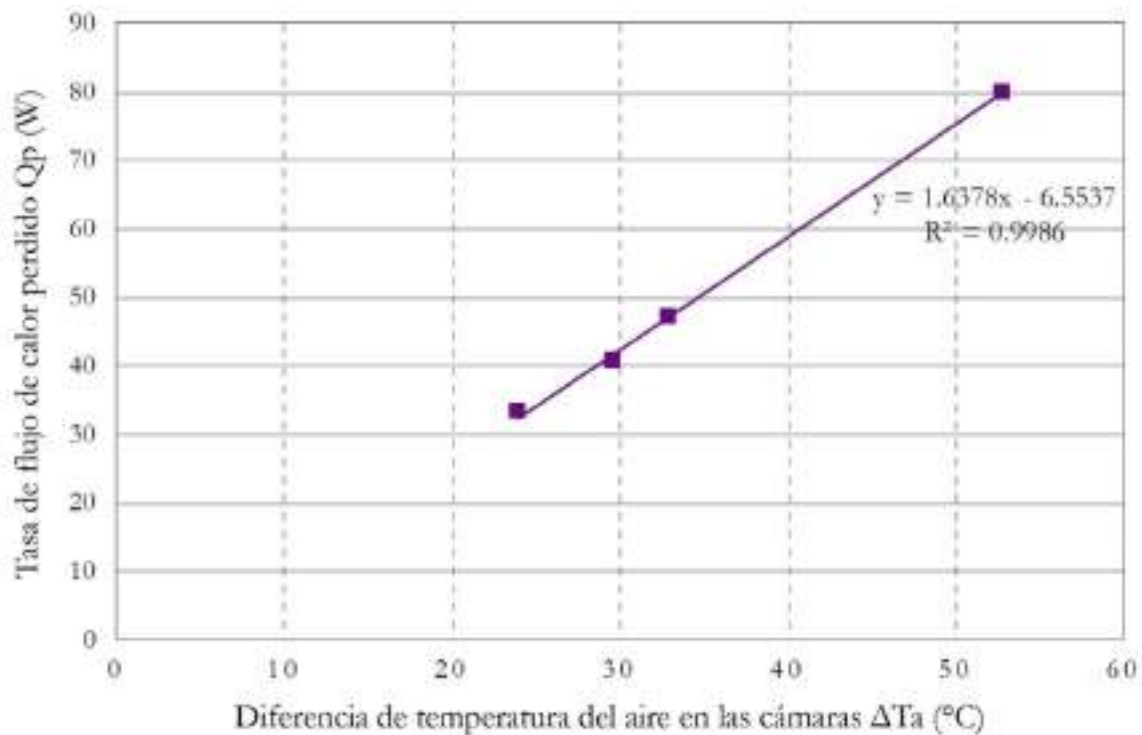


Figura 3: Ecuación de la regresión lineal de la calibración preliminar.

La ecuación de calibración lineal preliminar se aplicó a los materiales con conductividad térmica conocida con el fin de determinar la tasa de flujo de calor que atraviesa las muestras utilizando la Ecuación 3, y la conductividad térmica mediante la Ecuación 5. Entre los materiales ensayados se agregó una placa experimental de textil y cemento (Placa Texacem), debido a su densidad aparente y su conductividad térmica, la cual fue determinada por el INTI mediante el método del medidor de flujo de calor (Yajnes et al., 2023). Los resultados se compararon con los valores declarados de conductividad térmica de los materiales, como se muestra en la Tabla 2.

**Tabla 2: Comparación entre la conductividad térmica calculada con la ecuación de regresión lineal preliminar y la declarada de los materiales, junto con el porcentaje de error relativo**

| Material         | Espesor (t, m) | Tasa de flujo de calor ingresado (Qi, W) | Temp. del aire de la caja caliente (T <sub>ac</sub> , °C) | Dif. de las temp. de aire (ΔT <sub>a</sub> , °C) | Temp. superf. de la muestra del lado caliente (T <sub>mc</sub> , °C) | Dif. de las temp. sup. (ΔT <sub>m</sub> , °C) | Conduct. térmica declarada (λ, W/mK) | Conduct. térmica medida (λ <sub>m</sub> , W/mK) | Error relativo con signo (%) |
|------------------|----------------|------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------|
| OSB              | 0,009          | 100                                      | 65,33                                                     | 40,37                                            | 50,03                                                                | 14,43                                         | 0,13<br>(Fabricante)                 | 0,094                                           | 27,59                        |
|                  |                | 60                                       | 48,07                                                     | 28,37                                            | 36,17                                                                | 9,67                                          |                                      | 0,070                                           | 46,28                        |
|                  |                | 53                                       | 42,97                                                     | 25,93                                            | 33,17                                                                | 9,60                                          |                                      | 0,060                                           | 54,02                        |
| MDF              | 0,012          | 100                                      | 57,20                                                     | 46,10                                            | 38,80                                                                | 16,67                                         | 0,13<br>(IRAM 11601)                 | 0,085                                           | 34,63                        |
|                  |                | 60                                       | 49,40                                                     | 28,47                                            | 36,43                                                                | 9,80                                          |                                      | 0,091                                           | 29,92                        |
|                  |                | 53                                       | 41,77                                                     | 26,47                                            | 30,77                                                                | 10,23                                         |                                      | 0,071                                           | 45,43                        |
| Fenólico         |                | 100                                      | 63,53                                                     | 45,37                                            | 45,67                                                                | 16,07                                         | 0,12<br>(Fabricante)                 | 0,089                                           | 25,07                        |
| Placa de yeso    | 0,0095         | 100                                      | 63,13                                                     | 21,87                                            | 47,27                                                                | 8,66                                          | 0,37<br>(IRAM 11601)                 | 0,295                                           | 20,26                        |
|                  |                | 60                                       | 36,70                                                     | 27,10                                            | 25,13                                                                | 8,93                                          |                                      | 0,090                                           | 75,77                        |
|                  |                | 53                                       | 35,23                                                     | 25,77                                            | 23,57                                                                | 8,20                                          |                                      | 0,076                                           | 79,34                        |
|                  |                | 42                                       | 30,33                                                     | 21,33                                            | 20,33                                                                | 6,63                                          |                                      | 0,074                                           | 79,96                        |
| Placa Texacem    | 0,03           | 60                                       | 48,40                                                     | 31,53                                            | 39,37                                                                | 18,40                                         | 0,106<br>(Yajnes et al., 2023)       | 0,092                                           | 12,87                        |
|                  |                | 53                                       | 49,17                                                     | 27,13                                            | 41,23                                                                | 16,00                                         |                                      | 0,108                                           | -1,58                        |
| Madera Kiri      | 0,0175         | 100                                      | 53,07                                                     | 42,57                                            | 37,57                                                                | 16,83                                         | 0,09<br>(Fabricante)                 | 0,143                                           | -58,84                       |
|                  |                | 60                                       | 41,03                                                     | 29,27                                            | 30,50                                                                | 12,43                                         |                                      | 0,098                                           | -8,70                        |
|                  |                | 53                                       | 40,27                                                     | 27,03                                            | 30,40                                                                | 11,57                                         |                                      | 0,086                                           | 4,13                         |
|                  |                | 42                                       | 33,47                                                     | 21,1                                             | 24,07                                                                | 6,63                                          |                                      | 0,138                                           | -53,14                       |
| Cartón corrugado | 0,005          | 100                                      | 61,13                                                     | 33,83                                            | 50,13                                                                | 12,50                                         | 0,065<br>(Fabricante)                | 0,076                                           | -19,25                       |
|                  |                | 60                                       | 50,90                                                     | 22,13                                            | 42,07                                                                | 7,23                                          |                                      | 0,078                                           | -16,45                       |
|                  |                | 53                                       | 42,23                                                     | 20,83                                            | 34,40                                                                | 8,2                                           |                                      | 0,057                                           | 11,72                        |

Se puede observar que el error en la mayoría de las mediciones es alto, y que la ecuación de calibración derivada de la muestra ensamblada no se puede aplicar indiscriminadamente para determinar la conductividad térmica de cualquier material. La única conductividad térmica medida que se encontró dentro de un margen de error del 10 % fue la de la placa Texacem con el foco incandescente de 53 W y de la madera de Kiri con los focos de 60 W y 53 W. Este hallazgo condujo a una segunda serie de calibración, la cual se presenta a continuación.

### **Segunda calibración de la caja caliente**

En la segunda serie de calibración se desarrollaron tres ecuaciones de regresión lineal, los cuales permitieron el cálculo de la conductividad térmica de los materiales en función de su densidad aparente ( $\rho$ ). Los materiales con conductividad térmica conocida se agruparon en tres grupos según su densidad: el primer grupo consistió en muestras con densidades aparentes entre 700 kg/m<sup>3</sup> y 800 kg/m<sup>3</sup>; el segundo grupo incluyó materiales con densidades cercanas a los 500 kg/m<sup>3</sup>; y el tercer grupo contenía muestras con densidades entre 250 kg/m<sup>3</sup> y 450 kg/m<sup>3</sup> (Tabla 3). Se observa que la densidad y la conductividad están relacionadas excepto en el panel compuesto, donde influye la estructura en capas del material y el efecto de promediado térmico en sistemas compuestos: la densidad promedio está más influenciada por la masa del vidrio, mientras que la conductividad térmica está más influida por el espesor y la baja conductividad del EPS.

Tabla 3: Grupos de materiales con sus densidades aparentes y conductividades térmicas declaradas

| Grupos  | Materiales        | Densidad aparente $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) | Conductividad térmica declarada $\lambda$ (W/mK) |
|---------|-------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Grupo 1 | Placa de yeso     | 800                                           | 0,37                                             |
|         | MDF               | 800                                           | 0,13                                             |
|         | Placa de fenólico | 700                                           | 0,12                                             |
|         | OSB               | 750                                           | 0,13                                             |
| Grupo 2 | Panel compuesto   | 529                                           | 0,046                                            |
|         | Placa Texacem     | 530                                           | 0,106                                            |
| Grupo 3 | Madera Kiri       | 450                                           | 0,09                                             |
|         | Cartón corrugado  | 250                                           | 0,065                                            |

Se desarrollaron dos nuevas ecuaciones de calibración utilizando el mismo método empleado en la calibración preliminar, considerando la pérdida de calor a través de las paredes y los puentes térmicos  $Q_p$  (W), así como la correspondiente diferencia de temperatura entre el aire en las cámaras caliente y fría  $\Delta T_a$  (°C). Las tres ecuaciones de calibración, sus líneas de regresión y los coeficientes de las líneas de regresión se presentan en la Figura 4. La línea de calibración 1 se desarrolló a partir de mediciones realizadas con la placa de yeso y los cuatro focos incandescentes. La segunda ecuación de calibración se basó en el panel compuesto, y es representativa del segundo grupo de materiales, con densidades aparentes entre 450 kg/m<sup>3</sup> y 530 kg/m<sup>3</sup>. La tercera ecuación de calibración se construyó a partir de las mediciones de la muestra de la madera de Kiri. La elección de la placa de yeso como representante del grupo 1 se debió a la gran cantidad de mediciones realizadas con ese material durante la campaña experimental. Esta muestra fue obtenida al inicio del estudio, mientras que las demás se incorporaron posteriormente con el objetivo de verificar los resultados. En el grupo 2, se continuó utilizando el panel compuesto debido a los buenos resultados obtenidos en la primera calibración. Para el tercer grupo, se generó una ecuación a partir de ambos materiales disponibles, seleccionándose finalmente aquella que ofreció la mejor aproximación.

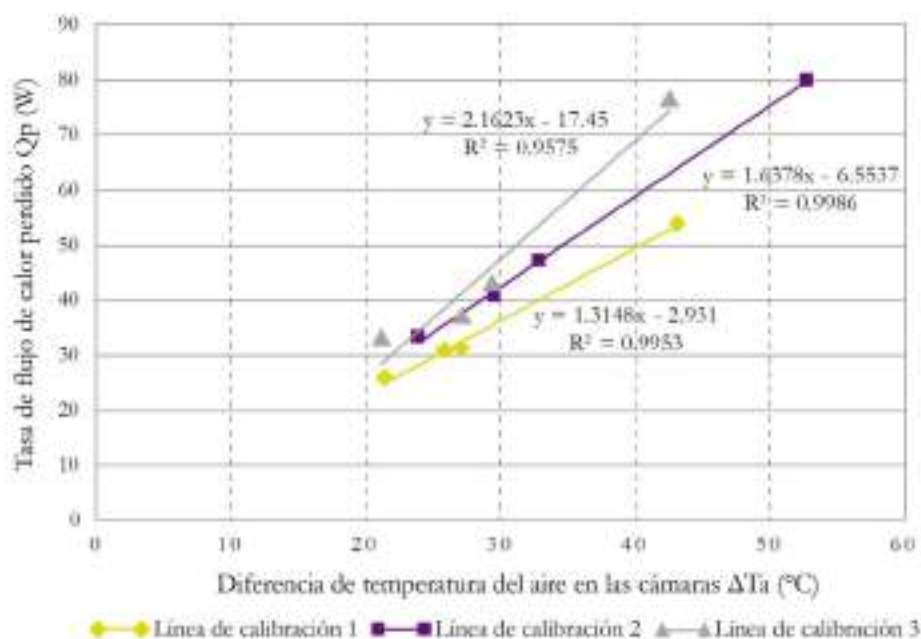


Figura 4: Tres ecuaciones de regresión lineal utilizadas en la segunda calibración de la CCC.

Las ecuaciones de calibración por regresión lineal se utilizaron para calcular la conductividad térmica de los materiales en los tres grupos. Los resultados se muestran en la Tabla 4. Se puede observar que el porcentaje de error en general disminuyó en comparación con los resultados obtenidos con la ecuación



de calibración anterior. Para las tres placas de derivados de madera ensayadas en el grupo 1, con una entrada de flujo de calor de 100 W, el error varió entre -0.57 % y 10.91 %, mientras que para la placa de yeso el porcentaje de error disminuyó a 16,38 %. En el futuro, se podrían obtener mejores resultados en este grupo mediante la construcción de una nueva ecuación basada en un material diferente. En el segundo grupo de materiales, al utilizar una entrada de flujo de calor de 53 W, el porcentaje de error fue inferior al 10 % tanto para el panel compuesto, como para el panel de textil cemento. La madera de Kiri, al tener la densidad aparente cercana al grupo 2 y 3 se ensayó con las dos ecuaciones lineales. Se observa que con la ecuación 2 y tasa de calor ingresado de 53 W el porcentaje de error es menor, sin embargo, medido con la ecuación 3 el error sigue por debajo de los 10 %.

*Tabla 4: Comparación entre la conductividad térmica calculada con las tres ecuaciones de regresión lineal y la declarada de los materiales, junto con el porcentaje de error relativo*

| Material          | Densidad aparente ( $\rho$ ) | Tasa de calor ingresado $Q_i$ | Difer. de las temp. de aire $\Delta T_a$ | Difer. de las temp. super. $\Delta T_m$ | Conduct. térmica decl. $\lambda$ | Conduct. térmica medida con la Ecuación 1 $\lambda_m$ | Conduct. térmica medida con la Ecuación 2 $\lambda_m$ | Conduct. térmica medida con la Ecuación 3 $\lambda_m$ | Error relativo con signo |
|-------------------|------------------------------|-------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------|
| Unidad            | kg/m <sup>3</sup>            | W                             | °C                                       | °C                                      | W/mK                             | W/mK                                                  | W/mK                                                  | W/mK                                                  | %                        |
| Placa de yeso     | 800                          | 100                           | 21,87                                    | 8,66                                    | 0,37                             | 0,309                                                 |                                                       |                                                       | 16,38                    |
| MDF               | 800                          | 100                           | 46,1                                     | 16,37                                   | 0,13                             | 0,116                                                 |                                                       |                                                       | 10,91                    |
| OSB               | 750                          | 100                           | 40,37                                    | 14,43                                   | 0,13                             | 0,116                                                 |                                                       |                                                       | 10,73                    |
| Placa de fenólico | 700                          | 100                           | 45,37                                    | 16,07                                   | 0,12                             | 0,121                                                 |                                                       |                                                       | -0,59                    |
| Panel ensambl.    | 530                          | 53                            | 29,53                                    | 18,80                                   | 0,046                            |                                                       | 0,042                                                 |                                                       | 8,44                     |
| Texacem           | 529                          | 53                            | 27,13                                    | 16,00                                   | 0,106                            |                                                       | 0,108                                                 |                                                       | -1,58                    |
| Madera Kiri       | 450                          | 53                            | 27,03                                    | 11,57                                   | 0,09                             |                                                       | 0,086                                                 |                                                       | 4,13                     |
|                   | 450                          | 100                           | 42,57                                    | 16,83                                   |                                  |                                                       |                                                       | 0,099                                                 | -9,55                    |
| Cartón corrug.    | 250                          | 100                           | 33,83                                    | 12,5                                    | 0,065                            |                                                       |                                                       | 0,066                                                 | -0,86                    |

Se deberían hacer más ensayos para mejorar las ecuaciones, especialmente la ecuación 1, y también habría que ensayar otros materiales, con densidades aparentes por encima de los 800 kg/m<sup>3</sup> y también por debajo de los 250 kg/m<sup>3</sup>. Sin embargo, para materiales experimentales de densidades aparentes entre estos valores se podrían utilizar estas ecuaciones de calibración para analizar la conductividad térmica en el ámbito de la investigación.

#### **Medición de la conductividad térmica de las placas de residuos textiles y almidón de papa**

Se produjeron cinco paneles con diferentes densidades aparentes, con porcentaje de residuos de textil y agua constante (24 % y 76 % p/p respectivamente) (Tabla 5). A cada uno de los paneles se le añadió diferente cantidad de almidón de papa (A.P.) en proporción de 28 %, 33 %, 40 %, 50 % y 60 % p/p del residuo de textil. La urea y el bórax se agregaron proporcionalmente al almidón: 17 % y 8 % p/p del almidón respectivamente.

*Tabla 5: Dimensiones y densidades de las placas experimentales*

| Composición | Ancho (m) | Largo (m) | Espesor (m) | Masa (kg) | Densidad (kg/m <sup>3</sup> ) |
|-------------|-----------|-----------|-------------|-----------|-------------------------------|
| A.P. 28%    | 0,480     | 0,575     | 0,0130      | 1,099     | 306,30                        |
| A.P. 33%    | 0,475     | 0,575     | 0,0130      | 1,169     | 329,24                        |



|          |       |       |        |       |        |
|----------|-------|-------|--------|-------|--------|
| A.P. 40% | 0,470 | 0,565 | 0,0135 | 1,303 | 366,71 |
| A.P. 50% | 0,470 | 0,565 | 0,0135 | 1,539 | 429,30 |
| A.P. 60% | 0,455 | 0,550 | 0,0145 | 1,960 | 540,15 |

Al tener la densidad aparente más próxima a los materiales del grupo 3, se aplicó la ecuación de calibración 3. Los resultados se pueden observar en la tabla 6. Para la placa con mayor densidad se intentó aplicar la segunda ecuación de calibración, con el foco incandescente de 53 W. Sin embargo, en las dos pruebas no se logró que la diferencia entre el aire caliente y el frío sea igual o mayor a 20°C.

*Tabla 6: Conductividad térmica de las placas experimentales aplicando la ecuación de calibración 3*

| Material | Tasa de flujo de calor ingresado (Qi, W) | Temperaturas del aire caja caliente (T <sub>ac</sub> , °C) | Diferencia de las temp. de aire (ΔT <sub>a</sub> , °C) | Temperaturas superficiales de la muestra caja caliente (T <sub>mc</sub> , °C) | Diferencia de las temp. superficiales de las muestras (ΔT <sub>m</sub> , °C) | Conductividad térmica medida (λ, W/mK) |
|----------|------------------------------------------|------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| A.P. 28% | 100                                      | 49,70                                                      | 40,80                                                  | 33,23                                                                         | 15,83                                                                        | 0,087                                  |
| A.P. 33% | 100                                      | 53,47                                                      | 45,20                                                  | 35,17                                                                         | 14,33                                                                        | 0,065                                  |
| A.P. 40% | 100                                      | 55,53                                                      | 42,50                                                  | 39,73                                                                         | 18,43                                                                        | 0,071                                  |
| A.P. 50% | 100                                      | 46,40                                                      | 36,77                                                  | 31,03                                                                         | 11,07                                                                        | 0,174                                  |
| A.P. 60% | 100                                      | 43,70                                                      | 35,37                                                  | 28,47                                                                         | 9,90                                                                         | 0,240                                  |

Los datos evaluados indican que, en general, la conductividad térmica aumenta con el incremento de la densidad aparente. Sin embargo, se observa una desviación en la muestra de menor densidad, en la que la conductividad térmica es mayor. Este comportamiento podría deberse a un error experimental, por lo que se recomienda realizar mediciones adicionales para confirmar los resultados. Un material con una conductividad térmica inferior a 0,1 W/m·K puede ser considerado un buen aislante térmico, ya que ofrece una baja tasa de transferencia de calor por conducción. De acuerdo a la norma IRAM 11601, el rango de los materiales aislantes convencionales (lana de vidrio, lana mineral, perlita, EPS, poliuretano y vermiculita) está entre 0,022 y 0,07 W/m·K. Por lo tanto, las muestras que contienen almidón de papa en concentraciones de 28 %, 33 % y 40 % p/p respecto al residuo textil, con conductividades térmicas inferiores a 0,1 W/m·K, se posicionan como materiales viables para uso como aislantes térmicos.

## CONCLUSIONES

En este artículo se presenta el proceso de construcción y calibración de una Caja Caliente Calibrada de bajo costo, junto con la evaluación de la conductividad térmica de placas experimentales elaboradas con residuos textiles y almidón de papa. La CCC, construida con materiales económicos y mediante una metodología simple, resultó adecuada para ensayar materiales desarrollados por el grupo de investigación. El calor se suministró mediante bombillas incandescentes con potencias entre 40 W y 100 W. Se alcanzaron temperaturas en estado estable durante al menos tres horas para cada muestra, con una variación de temperatura de hasta 0,3°C en la superficie de las muestras. La diferencia de temperatura del aire entre las cámaras caliente y fría, en condiciones de estado estable fue siempre superior a 20°C.

Se obtuvo una ecuación preliminar de regresión lineal considerando un panel compuesto por vidrio simple de 4 mm y EPS de 15 mm. La ecuación de calibración se aplicó a materiales con conductividad térmica conocida (OSB, MDF, fenólico, placa de yeso, placa Texacem, madera de Kiri y cartón corrugado), y se observó que el porcentaje de error en la conductividad térmica estimada fue alto para la mayoría de las muestras. Solo en el caso de la madera de Kiri y la placa de textil cemento, cuando la tasa de flujo de calor ingresado Qi fue de 60 W y 53 W, se observaron errores menores a los 10 %.

Este hallazgo llevó a la hipótesis de que deberían desarrollarse y aplicarse diferentes ecuaciones de calibración de regresión lineal para materiales con densidades aparentes similares ρ (kg/m³). Se utilizaron tres ecuaciones de calibración para obtener la conductividad térmica de muestras con

densidades aparentes de 700 kg/m<sup>3</sup> a 800 kg/m<sup>3</sup>, de 500 kg/m<sup>3</sup> a 700 kg/m<sup>3</sup>, y de 250 kg/m<sup>3</sup> a 500 kg/m<sup>3</sup>. Para los materiales con mayor densidad, cuando la entrada de flujo de calor fue de 100 W, el error alcanzó hasta un 16,38 %. En el segundo grupo de materiales, con una entrada de flujo de calor de 53 W, el porcentaje de error fue de hasta 8,44 %. Para los materiales de menor densidad, con una entrada de 100 W, el porcentaje de error llegó hasta -9,55 %. Con la ampliación en el número de ecuaciones de regresión lineal a futuro se podría ofrecer una mayor precisión en las mediciones.

Aunque se deben realizar más ensayos, la metodología de calibración puede utilizarse para determinar la conductividad térmica de materiales experimentales con densidades aparentes de 250 kg/m<sup>3</sup> a 800 kg/m<sup>3</sup>. En el futuro, se podría mejorar la ecuación 1 para que el porcentaje de error sea más bajo que 10 %. También se deberían llevar a cabo nuevas campañas experimentales para materiales con densidades aparentes superiores a 800 kg/m<sup>3</sup>, así como inferiores a 250 kg/m<sup>3</sup>. También podría considerarse la aplicación de un medidor de flujo térmico para obtener el flujo de calor a través de las muestras y/o emplear una resistencia térmica para tener un mayor ajuste.

Se evaluaron cinco placas elaboradas con residuos textiles y almidón de papa, con densidades aparentes entre 306,3 y 540,15 kg/m<sup>3</sup>. En tres de ellas, la conductividad térmica fue inferior a 0,1 W/m·K, destacándose la placa de 329,24 kg/m<sup>3</sup>, que alcanzó el valor más bajo registrado: 0,065 W/m·K. Estas tres mezclas, con contenidos de almidón del 28 %, 33 % y 40 % p/p, se consideran prometedoras, por lo que se recomienda continuar con ensayos complementarios para confirmar sus propiedades térmicas y evaluar su viabilidad como material aislante.

## RECONOCIMIENTOS

Kristina Atanasoska es estudiante del Doctorado en Ciencias Aplicadas Mención Ambiente y Salud (DCAAS, UNICEN, Argentina).

## REFERENCIAS

- Alhawari, A., y Mukhopadhyaya, P. (2022). Construction and Calibration of a Unique Hot Box Apparatus. *Energies*, 15(13), Article 13. <https://doi.org/10.3390/en15134677>
- American Society for Testing and Materials. (2019). *ASTM C1363: Standard Test Method for Thermal Performance of Building Materials and Envelope Assemblies by Means of a Hot Box Apparatus*.
- American Society for Testing and Materials. (2022). *ASTM D5334: Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Rock by Thermal Needle Probe Procedure*. <https://store.astm.org/d5334-22.html>
- Asdrubali, F., y Baldinelli, G. (2011). Thermal transmittance measurements with the hot box method: Calibration, experimental procedures, and uncertainty analyses of three different approaches. *Energy and Buildings*, 43(7), 1618–1626. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.03.005>
- Asdrubali, F., D'Alessandro, F., y Schiavoni, S. (2015). A review of unconventional sustainable building insulation materials. *Sustainable Materials and Technologies*, 4. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2015.05.002>
- Basim Abu-Jdayil, Mourad, A.-H., Hittini, W., Hassan, M., y Hameedi, S. (2019). Traditional, state-of-the-art and renewable thermal building insulation materials: An overview. *Construction and Building Materials*, 214, 709–735. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.102>
- Buratti, C., Belloni, E., Lunghi, L., y Barbanera, M. (2016). Thermal conductivity measurements by means of a new ‘Small Hot-Box’ apparatus: Manufacturing, calibration and preliminary experimental tests on different materials. *International Journal of Thermophysics*, 37(5), 47. <https://doi.org/10.1007/s10765-016-2052-2>
- Donmez Cavdar, A., Mengeloğlu, F., y Karakus, K. (2015). Effect of boric acid and borax on mechanical, fire and thermal properties of wood flour filled high density polyethylene composites. *Measurement*, 60, 6–12. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.09.078>
- Ibrahim, K. A., Naz, M. Y., Sulaiman, S. A., Ghaffar, A., Jamil, Y., y Abdel-Salam, N. M. (2017). Effect of Urea and Borate Plasticizers on Rheological Response of Corn Starch. *Polymers*, 9(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/polym9090361>

- Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (1995). *IRAM 11559: Acondicionamiento térmico de edificios: Método de determinación de la conductividad térmica de los materiales de construcción mediante el aparato de placa caliente.*
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (1997). *IRAM 11564: Acondicionamiento térmico de edificios: Método de determinación de la transmitancia térmica de los elementos de construcción mediante el aparato de la caja caliente.*
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2002a). *IRAM 1860: Materiales aislantes térmicos. Método de ensayo de las propiedades de transmisión térmica en régimen estacionario, mediante el aparato de medición del flujo de calor.*
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2002b). *IRAM 11601: Aislamiento térmico de edificios. Métodos de cálculo. Propiedades térmicas de los componentes y elementos de construcción en régimen estacionario.*
- Kaya, B., Zorba, N. N., y Caner, C. (2023). Development of novel biodegradable film based on chitosan with borax (sodium tetraborate) and boron nitride and their biological activity. *International Journal of Food Science & Technology*, 58(2), 890–897. <https://doi.org/10.1111/ijfs.15743>
- Naciones Unidas-Hábitat. (2023). SDG 11: Sustainable cities and communities. <https://onuhabitat.org.mx/index.php/el-mundo-esta-fallando-en-proporcionar-vivienda-adecuada>
- Organización Panamericana de la Salud. (2022). *Directrices de la OMS sobre vivienda y salud.* <https://doi.org/10.37774/9789275325674>
- Pavel, C. C., y Blagoeva, D. T. (2018). *Competitive landscape of the EU's insulation materials industry for energy-efficient buildings* [Technical report by the Joint Research Centre (JRC)]. chrome-extension://oemmndcblldboiebfnladdacbfmadadm/<https://www.agendaconstructiilor.ro/files/files/kj1a28816enn.pdf>
- Secretaría de Desarrollo Territorial, Hábitat y Vivienda. (2023). *Registro Nacional de Barrios Populares (ReNaBaP).* Argentina.gob.ar. <https://www.argentina.gob.ar/habitat/integracion-socio-urbana/renabap>
- Shen, Z., Brooks, A. L., He, Y., Shrestha, S. S., y Zhou, H. (2021). Evaluating dynamic thermal performance of building envelope components using small-scale calibrated hot box tests. *Energy and Buildings*, 251, 111342. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111342>
- Tejeda-Vázquez, R., Macias-Melo, E. V., Hernández-Pérez, I., Aguilar-Castro, K. M., y Serrano-Arellano, J. (2021). Empirical model of hygrothermal behavior of masonry wall under different climatic conditions using a hot box. *Energy and Buildings*, 249, 111209. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111209>
- Villalba, A., Correa, E., Pattini, A., y Vicare, D. (2017). Hot-cool box calorimetric determination of the solar heat gain coefficient and the U-value of internal shading devices. *Energy Efficiency*, 10. <https://doi.org/10.1007/s12053-017-9544-1>
- Yajnes, M. E., Araneda, A. B., Busnelli, R., y Aranda, Y. (2023). Placa para acondicionamiento térmico y acústico de viviendas a partir de residuos textiles: De los obstáculos a los desafíos técnicos. *Innovación y Desarrollo Tecnológico y Social*, 5, 1–15. <https://doi.org/10.24215/26838559e040>

## EVALUATION OF THE THERMAL CONDUCTIVITY OF PANELS MADE FROM TEXTILE WASTE AND POTATO STARCH USING AN EXPERIMENTAL CALIBRATED HOT BOX

**ABSTRACT:** Thermal conductivity is a key property in the development of building materials for energy-efficient architecture. In this study we present the design and calibration methodology of a low-cost calibrated hot box, used to measure the thermal conductivity of panels made from textile waste and potato starch. The device was calibrated using three linear regression equations, based on reference materials with apparent densities ranging from 250 to 800 kg/m<sup>3</sup>. The results showed errors close to 10 % when compared to the declared values of these materials, validating the instrument's accuracy in research contexts. Although further testing is needed for materials with densities outside the calibration range, the hot box proved to be a practical and reliable tool for thermal analysis of experimental materials. The experimental panels tested exhibited thermal conductivity values between 0,065 and 0,24 W/m·K, depending on their density. Of the five panels evaluated, three showed values within a potentially suitable range for use as insulating materials.

**Keywords:** calibration methodology, apparent density, construction materials, alternative insulation.

## EVALUACIÓN ACÚSTICA DE UN JARDÍN VERTICAL MODULAR COMO SOLUCIÓN DE INFRAESTRUCTURA VERDE URBANA

**Ana Rizzo La Malfa<sup>1</sup>, Ariel Velis<sup>2</sup>, Carlos Posse<sup>2</sup>, Gustavo Basso<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Dra en Arquitectura y Urbanismo - Colaboradora ad honorem del Instituto y Políticas del Ambiente Construido (IIPAC) - Universidad Nacional de La Plata - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) - Facultad de Arquitectura y Urbanismo - Universidad Nacional de La Plata (FAU-UNLP) - La Plata, Provincia de Buenos Aires, Argentina  
Tel: +54 221 423-6587/90

Email: [iipac@fau.unlp.edu.ar](mailto:iipac@fau.unlp.edu.ar)

<sup>2</sup>Laboratorio de Acústica y Luminotecnia - Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (LAL-CIC) C.P. 1897 - Manuel B. Gonnet, Provincia de Buenos Aires, Argentina  
Tel: +54 221 484-2686 / 471-2721

Email: [ciclal@gba.gob.ar](mailto:ciclal@gba.gob.ar)

<sup>3</sup> Instituto de Investigación en Producción y Enseñanza del Arte Argentino y Latinoamericano (IPEAL) - Facultad de Artes, Universidad Nacional de La Plata - La Plata, Provincia de Buenos Aires, Argentina

Tel: +54 221 422 2938. Int. 33

Email: [ipealinstituto@gmail.com](mailto:ipealinstituto@gmail.com)

**RESUMEN:** La Infraestructura Verde Urbana (IVU) y las Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN) constituyen enfoques integrados para mitigar problemáticas ambientales en entornos urbanos. Este estudio evalúa el desempeño acústico de un sistema modular de jardín vertical —compuesto por especies nativas perennes y módulos independientes— instalado sobre una fachada simulada expuesta a ruido vehicular.

El análisis se realizó en dos etapas: ensayos en cámara reverberante bajo condiciones controladas, y simulaciones acústicas en un modelo simplificado de cañón urbano. En laboratorio, el sistema alcanzó coeficientes de absorción superiores a 0,5 a partir de 500 Hz, y un coeficiente de reducción de ruido (NRC) de 0,65.

Las simulaciones compararon tres tipos de fachada: reflectante, semi absorbente (50% vegetada) y totalmente vegetada. Se observó que la incorporación del jardín vertical puede reducir los niveles sonoros en fachada hasta en 10 dB, dependiendo de la frecuencia y la ubicación del punto de medición. Si bien los resultados son alentadores, se requiere validación a escala urbana. Además del beneficio acústico, el sistema aporta servicios ecosistémicos como regulación térmica, retención hídrica y fomento de la biodiversidad.

**Palabras clave:** jardines verticales, absorción acústica, infraestructura verde urbana, naturación urbana, soluciones basadas en la naturaleza, ruido vehicular

## INTRODUCCIÓN

La contaminación acústica urbana representa un desafío ambiental prioritario, reconocido en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU, debido a sus efectos adversos sobre la salud pública, el ecosistema y la economía (Van Renterghem et al., 2020; World Health Organization, 2018). El tráfico vehicular se identifica como la principal fuente de ruido en entornos urbanos, demandando soluciones efectivas y sostenibles para su mitigación.

En este contexto, las Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN) ofrecen un enfoque integrador que promueve la implementación de infraestructura verde, la cual no solo contribuye a la reducción del ruido, sino que también brinda múltiples beneficios ecológicos, sociales y climáticos (Manso et al., 2021; Kabisch et al., 2016). Entre estas, los sistemas modulares de jardines verticales (SJV) se presentan como una estrategia innovadora de naturación urbana, capaces de reemplazar superficies reflectantes por vegetación viva, mejorando la absorción acústica de las fachadas y disminuyendo el ruido percibido en zonas densamente urbanizadas (Bakker et al., 2023; Wang et al., 2022). En tal sentido, estudios previos han demostrado que los sistemas de fachadas absorbentes, incluyendo jardines verticales, pueden mejorar las condiciones acústicas en espacios confinados como cañones urbanos, reduciendo la reflexión sonora y mejorando parámetros como el tiempo de reverberación y la inteligibilidad del habla (Horoshenkov et al., 2013; Eggenschwiler et al., 2024).

El presente estudio tiene por objetivo evaluar el desempeño acústico de un sistema modular de jardín vertical, mediante ensayos en cámara reverberante. Los datos experimentales se incorporan a simulaciones digitales de un cañón urbano, en las que se comparan diferentes tipos de fachada para analizar el impacto acústico del sistema bajo condiciones de tráfico vehicular realistas. La combinación de análisis experimental y modelado digital permite validar el potencial de los SJV como una solución replicable y eficaz para la mitigación del ruido urbano, alineada con los principios de diseño regenerativo y sostenibilidad ambiental.

El objetivo del trabajo consiste en evaluar el desempeño acústico de un sistema modular de jardín vertical como solución de Infraestructura Verde Urbana (IVU). Luego, los ensayos en cámara reverberante constituyen el método para alcanzar el objetivo del estudio.

### ***Marco conceptual***

Las Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN) constituyen estrategias contemporáneas que emplean procesos ecológicos para abordar problemáticas urbanas, promoviendo entornos más saludables, resilientes y sostenibles. Su implementación en el contexto urbano se materializa a través de infraestructura verde, que incluye techos verdes, corredores biológicos y jardines verticales, integrando la vegetación en el entorno construido (Lee et al., 2023; Cohen-Shacham et al., 2016; Pauleit et al., 2019).

Dentro de este marco, los jardines verticales modulares (SJV) se definen como sistemas independientes formados por módulos que contienen plantas, sustrato y sistemas de riego automatizados. Su diseño modular facilita la instalación y el mantenimiento, mientras que factores como la densidad vegetal, el tipo de sustrato y el nivel de humedad influyen en su desempeño tanto ecológico como físico (Aletta et al., 2016; Baker et al. 2021; Paull et al., 2020).

Desde una perspectiva acústica, estos sistemas mejoran la interacción entre el sonido y la fachada, gracias a la capacidad de absorción generada por la combinación de vegetación, sustrato (Asdrubali et al., 2014, Yan et al., 2022) y estructura portante. Esta absorción se produce mediante mecanismos de fricción, dispersión y porosidad. El desempeño acústico se cuantifica a través del coeficiente de absorción acústica ( $\alpha$ ), que varía entre 0 (totalmente reflectante) y 1 (completamente absorbente), evaluado en distintas bandas de frecuencia.

Factores como la rugosidad superficial, permeabilidad, densidad del follaje y contenido de humedad podrían afectar directamente los valores de  $\alpha$ . Por ello, el presente estudio incorpora un análisis experimental controlado en cámara reverberante conforme a la norma IRAM 4065-1, permitiendo evaluar estas variables de manera precisa.

En este trabajo, los resultados experimentales se utilizaron luego como base para simulaciones acústicas digitales en un modelo simplificado de cañón urbano, considerando tres tipos de fachadas: reflectante, semi absorbente y absorbente. Esta metodología integrada permite validar científicamente el potencial de los jardines verticales modulares como soluciones replicables y eficaces para la mitigación del ruido urbano, aportando además beneficios ecológicos coherentes con los principios de arquitectura regenerativa y sostenibilidad urbana.

METODOLOGÍA

Para analizar el comportamiento acústico de un sistema modular de jardín vertical instalado en fachadas, se adoptó un enfoque metodológico mixto que combinó mediciones en cámara reverberante (según IRAM 4065-1) con simulaciones acústicas tridimensionales en un entorno urbano simplificado. Esta estrategia permitió evaluar el desempeño acústico del sistema bajo condiciones controladas y en escenarios urbanos representativos.

El diseño experimental se fundamentó en antecedentes que muestran, según el modelo de SVJ utilizado, la influencia de variables como la profundidad del sustrato, humedad y cobertura vegetal sobre la absorción sonora (Yang et al., 2013; Horoshenkov et al., 2013; Van Renterghem et al., 2016). Considerando estos factores, se definieron combinaciones de vegetación y humedad para evaluar su impacto en el coeficiente de absorción acústica ( $\alpha$ ). Los resultados experimentales se complementaron con simulaciones digitales que replicaron la aplicación del sistema en fachadas dentro de un modelo de cañón urbano típico, incorporando geometría edilicia, ubicación del jardín y fuentes de ruido vehicular.

Diseño experimental en laboratorio

- Descripción de la muestra

El sistema modular consistió en tres capas: una base estructural de placas de PVC espumado (0,80 × 1,20 m, espesor 10 mm), un fieltro de algodón para soporte radicular y retención hídrica, y una capa frontal segmentada en bolsillos para contener sustrato y especies vegetales, conforme a criterios modulares recomendados (Manso et al, 2021). Las particularidades de los mismos se indican en la Figura 1.

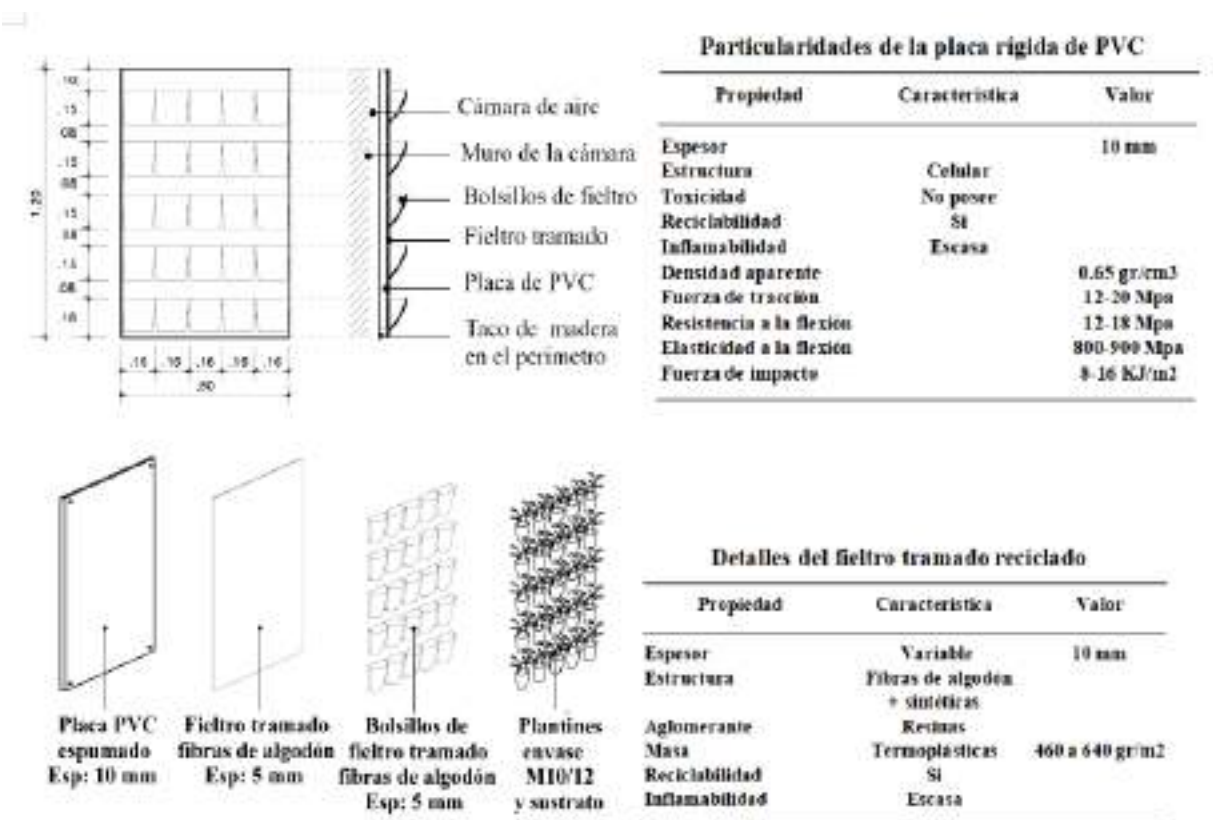


Figura 1. Conformación y detalles del panel base.

La selección de especies se basó en rusticidad y tolerancia en las condiciones locales, ajustándose tras una fase de aclimatación para optimizar desarrollo además de la consideración de estudios previos que relacionan características foliares con absorción acústica (Yang et al., 2013; Paull et al., 2020).

La composición inicial se conformó por cuatro especies distribuidas en el panel en igual proporción (25%) ubicadas dentro de los bolsillos con la cantidad de sustrato de características específicas tal como se indica en la Figura 2.

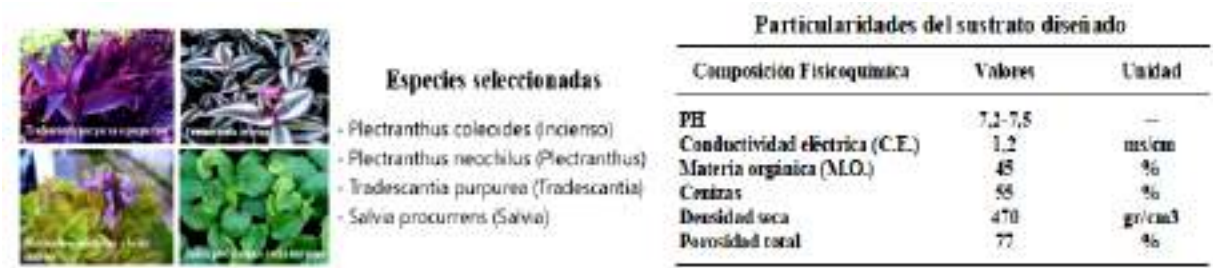


Figura 2. Particularidades de la vegetación y el sustrato.

Durante la fase de aclimatación previa a la medición acústica, se observaron problemas en el desarrollo de las especies lo que motivó la sustitución parcial o total de algunas. La conformación definitiva incluyó *Plectranthus neochilus* (40%), *P. coleoides* (33%), *Tradescantia purpurea* (25%), y en menor proporción *T. zebrina* y *Soleirolia soleirolii* o Manto de virgen (1% cada una). *Salvia procurrens* fue descartada por falta de adaptación.

- **Método de medición**

Los ensayos se realizaron en la cámara reverberante del Laboratorio de Acústica y Luminotecnia de la CIC, conforme a ISO 354:2003 e IRAM 4065-1, utilizando 12 módulos que cubrieron 11,52 m<sup>2</sup> sobre un bastidor con cámara de aire de 5 cm. Se evaluaron cuatro configuraciones: paneles vacíos y paneles vegetados en condiciones de humedad mínima, media y saturada, replicando escenarios operativos típicos (Bakker et al., 2023). Se registraron 36 mediciones por condición, calculando coeficientes  $\alpha$  para bandas entre 100 Hz y 5000 Hz, además de indicadores NRC y SAA según ASTM C423-02a.

La muestra relevada presentaba una cobertura vegetal del 70%, distribuida de forma homogénea, con un total de 300 ejemplares. Este tipo de ensayos permite cuantificar la variación acústica ante distintos niveles de humedad del sustrato, un factor que, según Wang et al. (2022), influye significativamente en el desempeño acústico de los sistemas vegetados.

Las mediciones se desarrollaron en dos jornadas consecutivas para permitir la transición entre las distintas condiciones de humedad (Figura 3). En la primera jornada se evaluaron las condiciones “vacío” y “B”, mientras que en la segunda se midieron las condiciones “A” (deshidratada) y “C” (saturada). Cada etapa fue precedida y seguida por mediciones de la cámara vacía para permitir el cálculo diferencial del coeficiente de absorción  $\alpha$  para cada caso.



Figura 3. Presentación de la muestra en la cámara reverberante.



Este enfoque experimental permitió cuantificar el comportamiento acústico del jardín vertical modular considerando variables reales de instalación, crecimiento vegetal y humedad, proporcionando una base objetiva para su análisis en entornos urbanos simulados.

#### **- Simulación acústica urbana**

Para estudiar la propagación sonora en entorno urbano, se diseñó un modelo tipo cañón urbano de 100 m de largo, 12 m de ancho y 30 m de altura, simulando calles angostas con fachadas paralelas (Wong et al., 2010). Se utilizó el software CATT-Acoustic v7.2, que combina trazado de rayos y modelos estadísticos híbridos.

Se evaluaron 14 puntos de recepción sonora distribuidos verticalmente cada 5 m en dos planos opuestos, permitiendo análisis de niveles sonoros a diferentes alturas (Figura 4).

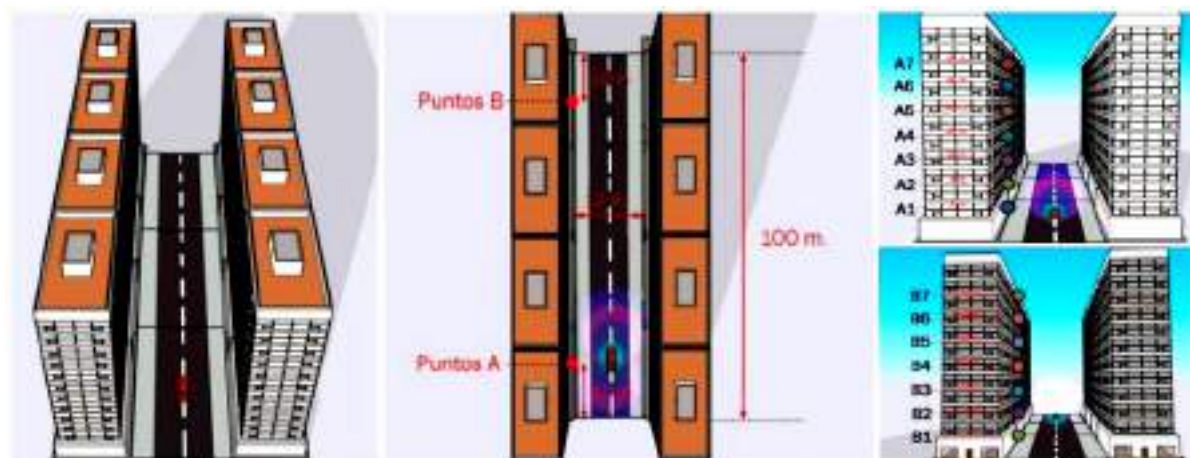


*Figura 4. Características del cañón urbano simulado.*

Los puntos de medición A1 a A7 se dispusieron en un mismo plano vertical, con una separación de 5 m entre ellos, comenzando en A1, situado a 1 m sobre el nivel del piso. De forma simétrica, los puntos B1 a B7 se ubicaron a 80 m de la fuente, es decir, a 10 m del extremo opuesto. Estos puntos también se distribuyeron verticalmente cada 5 m, comenzando en B1 a 1 m del suelo.

#### **- Escenarios de fachada**

Para las simulaciones, se asignaron las siguientes superficies:

Calle: hormigón

Ventanales: vidrio

Paredes: revoque tradicional

Zonas vegetadas: jardín vertical medido experimentalmente

Se modelaron tres escenarios de fachada: (a) reflectante (vidrio y revoque tipo damero), (b) mixta (vidrio y jardín vertical en sectores de muro) y (c) completamente absorbente (jardín vertical cubriendo toda la fachada). Esta secuencia permitió analizar el efecto progresivo de la vegetación sobre la atenuación del ruido en entornos urbanos.

#### **- Características acústicas de la fuente de ruido utilizada**

El espectro de la fuente, mostrado en la Tabla I, proviene de mediciones de ruido de tránsito realizadas en la ciudad de La Plata, según un estudio previo (Velis et al., 2015). Por motivos de simplicidad y relevancia acústica, se excluyeron las bandas de frecuencia por debajo de la octava de 125 Hz y por encima de 4000 Hz.

*Tabla I. Espectro de la fuente de ruido utilizada*



| Frecuencias en tercios de octavos |        |        |         |         |         |
|-----------------------------------|--------|--------|---------|---------|---------|
| 125 Hz                            | 250 Hz | 500 Hz | 1000 Hz | 2000 Hz | 4000 Hz |
| 85,5                              | 80,9   | 78,4   | 80,0    | 76,4    | 68,2    |

El nivel global corresponde entonces a 88,4 dB, o medido con compensación en frecuencia A, quedaría en 83,5 dB(A).

#### - *Parámetros relevados*

La fuente sonora simulada fue tal como lo mencionado en el punto anterior. Los coeficientes de absorción para materiales convencionales se tomaron de la biblioteca del software, y para el sistema vegetal se usaron los valores medidos experimentalmente bajo norma ISO 354:2003, siguiendo el enfoque metodológico adoptado por Paull et al. (2020) y Wang et al. (2022).

Las simulaciones arrojaron diversos valores de nivel sonoro (dB(A)) a lo largo del cañón urbano, permitiendo comparar cuantitativamente el impacto acústico de cada configuración de fachada.

## RESULTADOS Y DISCUSIONES

### *Resultados del ensayo en cámara reverberante de laboratorio*

En la Figura 5 (Rizzo La Malfa et al., 2020; Rizzo La Malfa, 2023) se presenta un gráfico que muestra el coeficiente de absorción acústica  $\alpha_s$ , tanto para los paneles por sí solos (sin sustrato ni vegetación) como para el sistema completo, considerando tres niveles distintos de humedad. Como conclusión principal, se observa que el coeficiente resulta prácticamente independiente de la presencia de plantas —al menos en este caso específico, con una cobertura vegetal del 60 al 70%—, así como también de la existencia o no del sustrato y de su grado de humedad. Este resultado, aunque era esperable, no se encontraba demostrado previamente. La explicación radica en que el tipo de panel utilizado en el sistema ya actúa como un buen absorbente acústico, especialmente en el rango de frecuencias altas. Esto se debe, en gran medida, a la textura del fieltro empleado en la confección de los bolsillos soporte, así como al revestimiento aplicado sobre los paneles de PVC espumado.

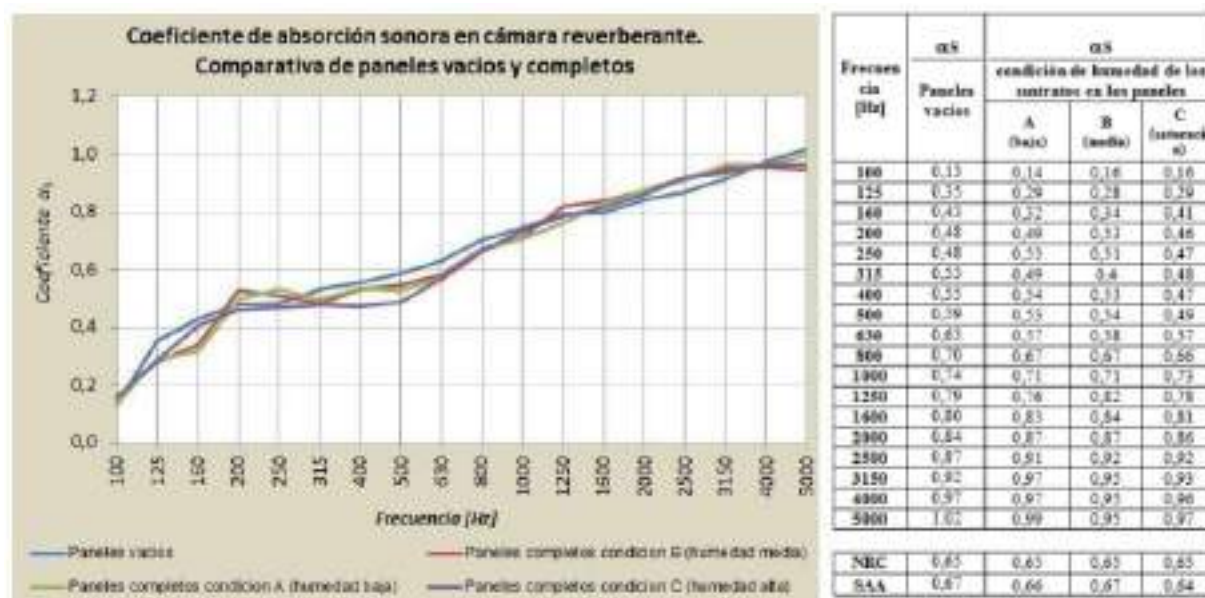


Figura 5. Variación del coeficiente  $\alpha$  en los cuatro estados según la frecuencia.

Finalmente, se realizó una comparación del desempeño acústico promedio entre el sistema vegetado —considerando el promedio de las tres condiciones de humedad— y distintos materiales convencionales habitualmente empleados en la construcción de envoltentes edilicias. La Figura 6 ilustra esta

comparación, poniendo en evidencia que el sistema vegetado presenta un rendimiento acústico comparable, e incluso superior en algunos casos, al de otros materiales constructivos convencionales, lo que resalta su viabilidad técnica como solución pasiva con el valor agregado de aportar beneficios ambientales adicionales.

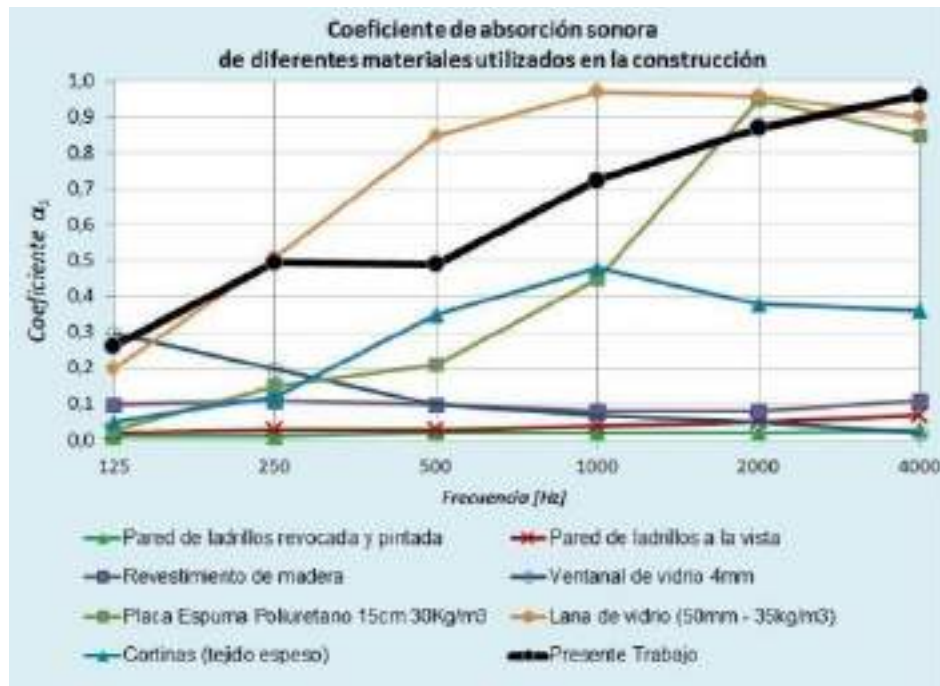


Figura 6. Comparación entre el coeficiente de absorción sonora  $\alpha$  de la muestra respecto a otros materiales

### Resultados de simulación

En la Figura 7 se presentan los tres modelos geométricos utilizados en la simulación, junto con la disposición de los puntos de medición. Estos modelos fueron denominados: Condición 1: fachada totalmente reflejante (compuesta por vidrio y pared, Figura 7a); Condición 2: fachada semiabsorbente (vidrio y jardín vertical, Figura 7b); y Condición 3: fachada totalmente absorbente (cubierta íntegramente por jardín vertical, Figura 7c). En todas las condiciones se emplearon la misma distribución de puntos de medición.

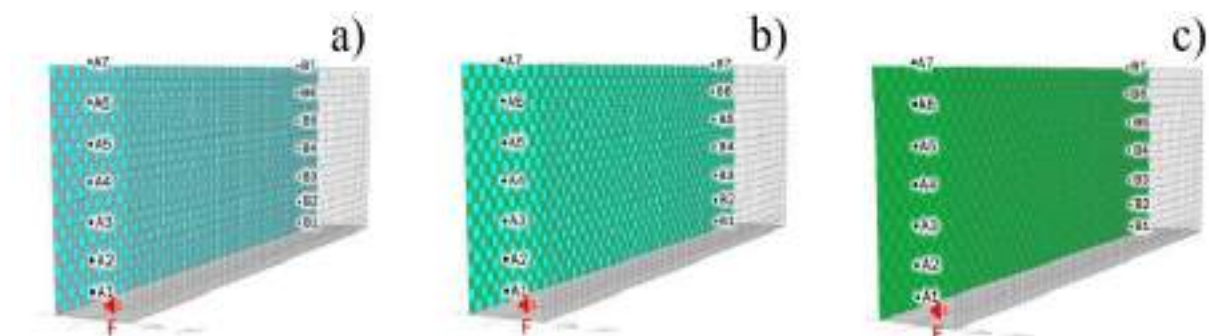


Figura 7. Modelos geométricos de simulación de las 3 condiciones: a) Vidrio y pared, b) Vidrio y jardín y c) Jardín completo

### - Simulación condición 1. “Fachada totalmente reflejante”

En la Figura 8 se muestra el nivel sonoro registrado en cada punto de interés. En el gráfico de la izquierda, cada serie corresponde a un punto y está representada en función de la frecuencia. En cambio,

en el gráfico de la derecha, cada serie representa una frecuencia específica y se muestra en función de los distintos puntos de ubicación (ordenados desde el más cercano hasta el más lejano a la fuente).

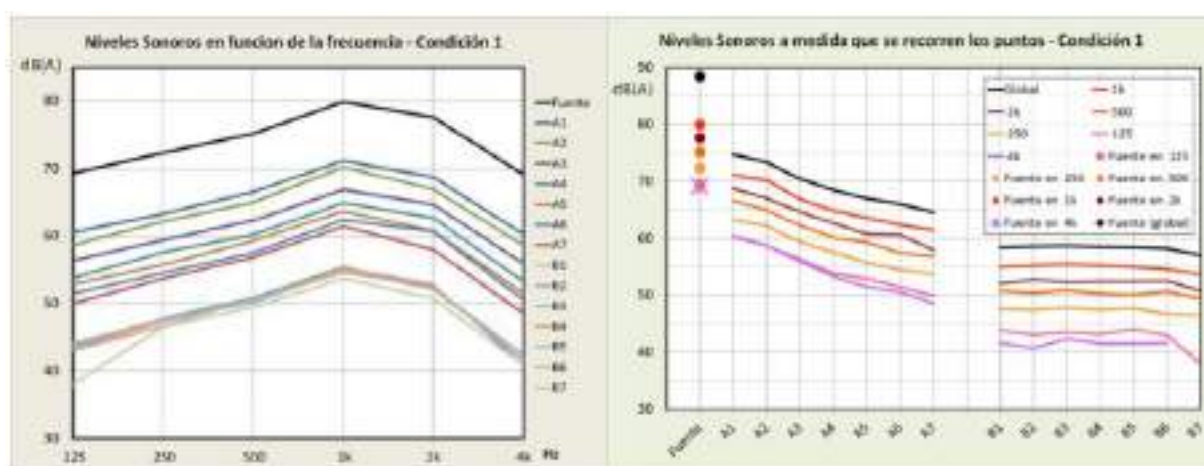


Figura 8. Condición 1. Espectro de niveles sonoros compensados “A” en cada punto de medición.

Los resultados de simulación de una fachada totalmente reflejante muestran los niveles sonoros más elevados del conjunto, coherentes con la presencia de superficies de vidrio y revoque que preservan la energía incidente y favorecen reflexiones especulares. La distribución espacial entre los 14 puntos de medición revela máximos locales vinculados a interferencias y focos de reflexión, lo que genera un campo sonoro heterogéneo y picos de nivel según altura y distancia a la fuente. Espectralmente, la falta de absorción en la envolvente mantiene bandas medias y altas con mayor energía, incrementando la contribución de componentes reflejadas al nivel global A. La geometría del cañón simulado favorece trayectorias largas y múltiples rebotes que amplifican estos efectos especulares. En síntesis, la condición 1 actúa como línea base crítica para exposición acústica urbana y evidencia la necesidad de tratar la envolvente para reducir picos y reverberación.

#### - Simulación condición 2. “Fachada semiabsorbente”

Los resultados se muestran en la Figura 9, siguiendo el mismo criterio gráfico que en la condición anterior, para facilitar su comparación.

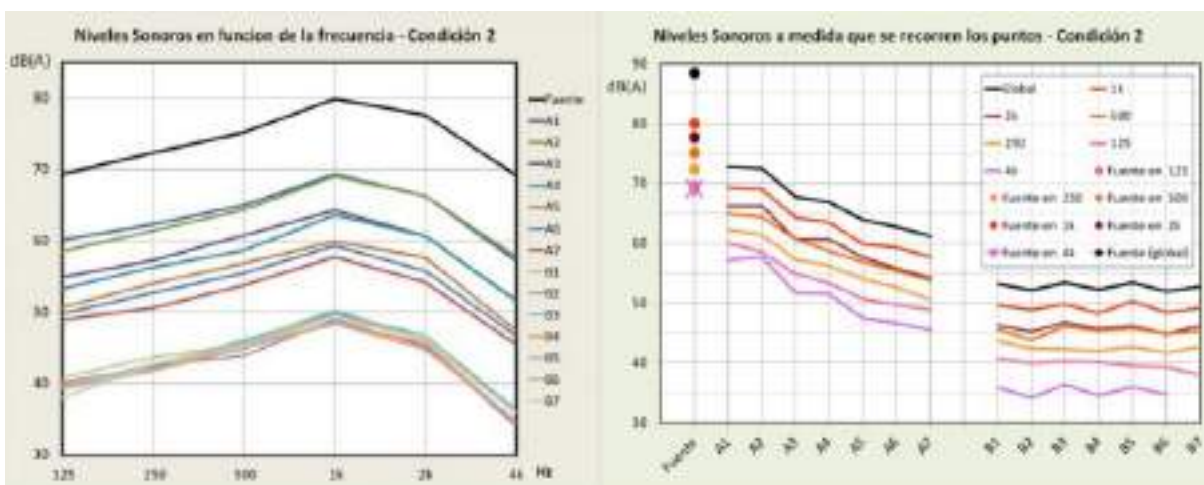


Figura 9. Condición 2. Espectro de niveles sonoros compensados “A” en cada punto de medición.

La incorporación parcial de módulos vegetados introduce mecanismos de absorción y dispersión que atenúan el campo sonoro con reducciones promedio intermedias (orden de magnitud consistentemente de 3 a 5 dB respecto a la condición reflejante). El efecto es espacialmente no uniforme: los receptores más cercanos a la fuente muestran menor cambio, mientras que los puntos intermedios y lejanos

evidencian mayor caída de nivel por la disminución del campo reverberante. La atenuación es más marcada en bandas medias-altas ( $>500$  Hz), coherente con los coeficientes de absorción medidos experimentalmente empleados en el modelo. La presencia parcial de vegetación también aumenta la difusión superficial, reduciendo la formación de lóbulos de radiación especular y suavizando la respuesta espectral. Así, la condición 2 representa una solución de compromiso con beneficios reales pero dependientes de la distribución espacial de la cobertura.

### - Simulación condición 3. “Fachada absorbente”

Al igual que en las condiciones anteriores, en la Figura 10 se muestran los resultados obtenidos.

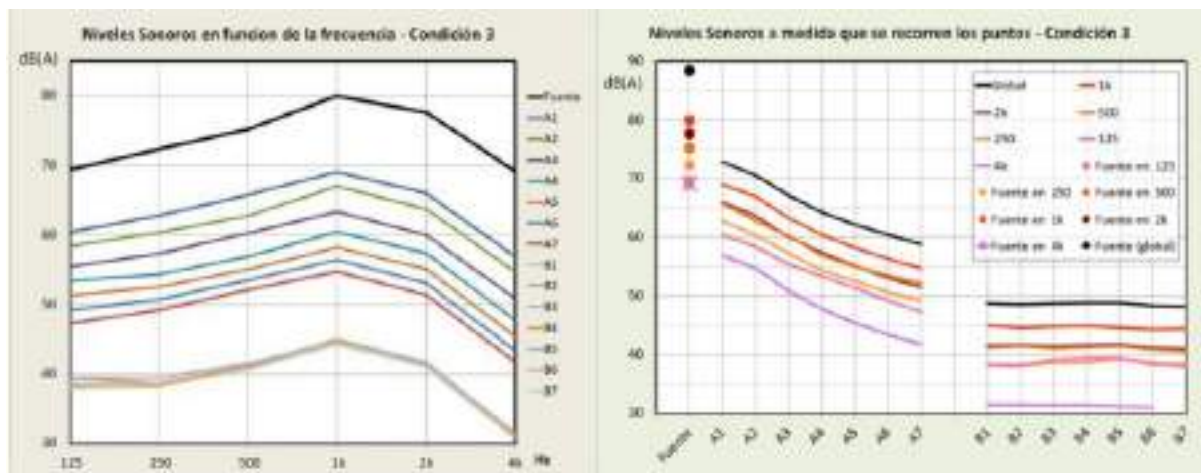


Figura 10. Condición 3. Espectro de niveles sonoros compensados “A” en cada punto de medición.

Cubrir íntegramente la envolvente con el sistema vegetado produce la mayor atenuación, alcanzando reducciones de hasta aproximadamente 10 dB en niveles globales A en puntos favorables y mejorando la uniformidad del campo sonoro. La disminución de energía reflejada es especialmente notable en receptores lejanos y en bandas medias-altas, donde el comportamiento del sistema aporta absorción consistente. No obstante, la eficacia disminuye hacia las bajas frecuencias por la limitada capacidad de los materiales porosos y del panel en ese rango. En conjunto, la condición 3 evidencia el mayor potencial de mitigación pasiva sobre la envolvente.



Figura 11. Niveles sonoros globales “A” para las tres condiciones



### **Comparativa de las 3 condiciones**

La Figura 11 muestra los niveles globales, compensados A en los diferentes puntos y para las 3 condiciones. El análisis comparativo muestra una progresión clara en reducción de niveles: condición 1 (peor) → condición 2 (intermedia) → condición 3 (mejor), con diferencias máximas de hasta 10 dB entre extremos y alrededor de 5 dB entre estados intermedios en puntos y bandas seleccionadas. La variabilidad espacial y espectral indica que la cobertura total proporciona mayor beneficio en bandas medias-altas y en receptores distantes, mientras que la intervención parcial aporta ganancias relevantes pero localizadas.

### **CONCLUSIONES**

Los resultados obtenidos a partir de ensayos en laboratorio y simulaciones digitales permitieron validar el desempeño acústico del sistema modular de jardín vertical como una solución pasiva eficaz para la mitigación del ruido urbano. Las pruebas en cámara reverberante mostraron un comportamiento acústico notable, con coeficientes de absorción superiores a 0,5 a partir de 500 Hz y un coeficiente de reducción de ruido (NRC) de 0,65. Este rendimiento se atribuye principalmente a la acción combinada de los distintos componentes del sistema —vegetación, sustrato y estructura portante—, y en particular al fieltro de algodón que recubre los bolsillos del panel, el cual demostró ser el principal responsable de la absorción sonora gracias a su alta porosidad y rugosidad superficial, propiedades que favorecen los mecanismos de fricción y disipación de la energía acústica incidente.

Por otra parte, la humedad contenida en el sistema no parece alterar de forma apreciable su comportamiento acústico en términos de absorción.

Las simulaciones tridimensionales, realizadas sobre un modelo simplificado de cañón urbano, complementaron los resultados experimentales y evidenciaron reducciones del nivel sonoro global de hasta 10 dB al comparar una fachada sin tratamiento vegetado con una cobertura total (100%), y de hasta 5 dB respecto a una cobertura parcial del 50%. Estas reducciones dependen fuertemente de la distancia al punto receptor respecto de la fuente sonora y de la frecuencia analizada, observándose las atenuaciones más significativas en las frecuencias altas y en los puntos más alejados.

Desde una perspectiva integral, el sistema evaluado no solo demuestra un desempeño técnico consistente en términos de mitigación sonora, sino que también brinda servicios ecosistémicos relevantes, como la regulación térmica, la retención hídrica y la promoción de la biodiversidad. Estas cualidades lo posicionan como una tecnología coherente con los principios de infraestructura verde urbana, naturación arquitectónica y arquitectura regenerativa. Su incorporación en estrategias de diseño urbano sostenible no solo es deseable, sino también técnica y ambientalmente justificada.

### **REFERENCIAS**

- Aletta, F., Kang, J., Zhou, Y. (2016). Soundscape and soundscape ecology – From theory to applications. *Science of the Total Environment*, 553, 1–8. Dirección URL: [https://www.researchgate.net/publication/367054751\\_Soundscape\\_in\\_city\\_and\\_built\\_environment\\_current\\_developments\\_and\\_design\\_potentials](https://www.researchgate.net/publication/367054751_Soundscape_in_city_and_built_environment_current_developments_and_design_potentials) [consulta: 5 Junio de 2025]
- Asdrubali, F., D'Alessandro, F., Mencarelli, N., Horoshenkov, K.. (2014). Sound absorption properties of tropical plants for indoor applications. The 21st international congress on sound and vibration, Beijing, China. 1-8. Dirección URL: [https://www.researchgate.net/publication/312368939\\_Sound\\_absorption\\_properties\\_of\\_tropical\\_plants\\_for\\_indoor\\_applications](https://www.researchgate.net/publication/312368939_Sound_absorption_properties_of_tropical_plants_for_indoor_applications)
- ASTM C 423-02<sup>a</sup> (2012) Standard test method for sound absorption and sound absorption coefficients by the reverberation room method - Método de prueba estándar para absorción de sonido y coeficientes de absorción de sonido por el método de sala de reverberación. Resumen recuperado de: <https://standards.globalspec.com/std/3812206/ASTM%20C423-02a>
- Bakker, J., Lugten, M., Tenpierik, M. (2023). Applying vertical greening systems to reduce traffic noise in outdoor environments: Overview of key design parameters and research methods. *Building*

- Acoustics, 30(1), 1–23. Dirección URL: <https://research.tudelft.nl/en/publications/applying-vertical-greening-systems-to-reduce-traffic-noise-in-out> [consulta: 1 Junio de 2025]
- Bakker, J., Lugten, M., Ottelé, M., Tenpierik, M., Pietsch, S. (2021). Improving the acoustic absorption of vertical greening systems. Master's thesis, Delft University of Technology. Dirección URL: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3Aebb67d29-4ab9-4c12-873c-c2bfc05d3b36> [consulta: 1 Junio de 2025]
- Cohen-Shacham E., Janzen C, Maginnis S, et al. (2026) Nature-based solutions to address global societal challenges. Gland, Switzerland: International Union for Conservation of Nature and Natural Resources (IUCN). Dirección URL: <https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/2016-036.pdf> [consulta: 26 de julio de 2025]
- Eggenschwiler, K., Jansohn, T., Blau, M., Schäffer, B. (2024). Effects of sound absorbing facades on the acoustical quality in different simulated inner courtyard situations. Acta Acustica, 8, 9. Dirección URL: [https://acta-acustica.edpsciences.org/articles/aacus/full\\_html/2024/01/aacus230092/aacus230092.html](https://acta-acustica.edpsciences.org/articles/aacus/full_html/2024/01/aacus230092/aacus230092.html) [consulta: 22 de julio de 2025]
- Horoshenkov, K. V., Khan, A., Benkreira, H. (2013). Acoustic properties of low growing plants. The Journal of the Acoustical Society of America, 133(5), 2554–2565. Dirección URL: [https://www.researchgate.net/publication/236662584\\_Acoustic\\_properties\\_of\\_low\\_growing\\_plants](https://www.researchgate.net/publication/236662584_Acoustic_properties_of_low_growing_plants) [consulta: 4 Junio de 2025]
- IRAM 4065 (1995) Acústica. Medición de absorción de sonido en cámara reverberante
- ISO 354:2003 Acoustics-Measurement of sound absorption in a reverberation room (Acústica: medición de la absorción acústica en una sala reverberante). Dirección URL: <https://www.iso.org/standard/4308.html> [consulta: 14 Junio de 2025]
- Kabisch, N., Frantzeskaki, N., Hansen, R. (2022) Principles for urban nature-based solutions. Ambio 51, 1388–1401. Dirección URL: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s13280-021-01685-w.pdf> [consulta: 9 Junio de 2025]
- Lee, S., Park, H., Kim, Y. (2023). Acoustic benefits of green infrastructure in urban areas. Tranquil City. Dirección URL: <https://tranquilitycity.co.uk/reports/2023-acoustic-benefits> [consulta: 3 Junio de 2025]
- Manso, M., Teotónio, I., Silva, C. M., Cruz, C. O. (2021). Green roof and green wall benefits and costs: A review of the quantitative evidence. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 135, 110111. Dirección URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032120304020> [consulta: 5 Junio de 2025]
- Pauleit, S., Andersson, E., Anton, B., Buijs, A., Haase, D., Hansen, R., Kowarik, I., Niemelä, J., Olafsson, A., van der Jagt, A. (2019). Urban Green Infrastructure – Connecting People and Nature for Sustainable Cities. Urban Forestry and Urban Greening. 40. 10.1016/j.ufug.2019.04.007. Dirección URL: [https://www.researchgate.net/publication/332406549\\_Urban\\_Green\\_Infrastructure\\_-\\_Connecting\\_People\\_and\\_Nature\\_for\\_Sustainable\\_Cities](https://www.researchgate.net/publication/332406549_Urban_Green_Infrastructure_-_Connecting_People_and_Nature_for_Sustainable_Cities) [consulta: 10 Junio de 2025]
- Paull, N. J., Krix, D., Torpy, F. R., Irga, P. J. (2020). Can green walls reduce outdoor ambient particulate matter, noise pollution and temperature? International Journal of Environmental Research and Public Health, 17(15), 5084. Dirección URL: <https://www.mdpi.com/1660-4601/17/14/5084> [consulta: 30 mayo de 2025]
- Rizzo La Malfa, A. (2023). Estrategias sustentables para controlar la contaminación acústica en espacios urbanos y residenciales. Tecnologías de naturación urbana aplicada a fachadas. Tesis doctoral Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad Nacional de La Plata. Dirección URL: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/161161> [consulta: 22 de julio de 2025]
- Rizzo La Malfa, A.; Velis, A.; Posse, C.; Armas, A.; Miguel, S.; Figueira, A.; Gabin Portmann, J.; Cortés, R.; Favre, M.; Mini, P.; Bretti, J. (2020). Sistemas modulares verticales: Evaluación de la absorción acústica en laboratorio, Revista ECOS Volumen 1, N° 1, pp. 48-51, Dirección URL: <https://doi.org/10.36044/EC.V1.N1.7> [consulta: 22 de julio de 2025]
- Van Renterghem, T., Botteldooren, D. (2016). View on outdoor vegetation reduces noise annoyance for dwellers near busy roads Landscape and Urban Planning, Volume 148, 203-215, ISSN 0169-2046. Dirección URL: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.12.018> [consulta: 4 Junio de 2025]
- Van Renterghem, T., Dekoninck, L., Botteldooren, D. (2020). Multi-stage sound planning methodology for urban redevelopment. Sustainable Cities and Society, 62, 102362. Dirección URL: <https://biblio.ugent.be/publication/8680491> [consulta: 22 de julio de 2025]

- Van Renterghem, T., Botteldooren, D., Horoshenkov, K. V. (2013). The potential of building envelope greening to achieve quietness. *Building and Environment*, 61, 34–44. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.12.007> [consulta: 3 Junio de 2025].
- Velis, A. G., Iasi, F., Armas, A., Posse, C., Vechiatti, N., Tomeo, D. (2015). Análisis de la evolución de parámetros acústicos del ruido urbano en la ciudad de La Plata a lo largo de un día. XIII Congreso Argentino de Acústica – VII Jornadas de Acústica, Electroacústica y Áreas Vinculadas, Buenos Aires, Argentina. <https://adaa.org.ar/wp-content/uploads/2021/04/adaa2015-021.pdf>.
- Wong, N. H., Tan, A. Y. K., Tan, P. Y., Chiang, K., Wong, N. C. (2010). Acoustic evaluation of vertical greenery systems for building walls. *Building and Environment*, 45(2), 411–420. Dirección URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132309001632> [consulta: 30 mayo de 2025]
- Yan, F., Shen, J., Zhang, W., Ye, L., Lin, X. (2022). A review of the application of green walls in the acoustic field. *Building Acoustics*, 29(2), 295–313. Dirección URL: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/1351010X221096789> [consulta: 1 Junio de 2025]
- Yang, H.-S., Kang, J., Cheal, C. (2013). Random-incidence absorption and scattering coefficients of vegetation. *Acta Acustica united with Acustica*, 99(3), 379–388. Dirección URL: [https://www.researchgate.net/profile/Hong-Seok-Yang/publication/258455034\\_Random-Incidence\\_Absorption\\_and\\_Scattering\\_Coefficients\\_of\\_Vegetation/links/5c43281992851c22a3812440/Random-Incidence-Absorption-and-Scattering-Coefficients-of-Vegetation.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Hong-Seok-Yang/publication/258455034_Random-Incidence_Absorption_and_Scattering_Coefficients_of_Vegetation/links/5c43281992851c22a3812440/Random-Incidence-Absorption-and-Scattering-Coefficients-of-Vegetation.pdf) [consulta: 3 Junio de 2025]
- Wang, P., Wong, Y. H., Tan, C. Y., Li, S., Chong, W. T. (2022). Vertical Greening Systems: Technological Benefits, Progresses and Prospects. *Sustainability*, 14(20), 12997. Dirección URL: <https://doi.org/10.3390/su142012997> [consulta: 3 Junio de 2025]
- World Health Organization, Regional Office for Europe (2018), Environmental noise guidelines for the European Region. Dirección URL: <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/279952/9789289053563-eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [consulta: 29 junio de 2025]

## ACOUSTIC EVALUATION OF A MODULAR GREEN WALL AS AN URBAN GREEN INFRASTRUCTURE SOLUTION

**ABSTRACT:** Urban Green Infrastructure (UGI) and Nature-Based Solutions (NbS) are integrated approaches to mitigate environmental issues in urban settings. This study evaluates the acoustic performance of a modular vertical garden system—composed of perennial native species and independent modules—installed on a simulated façade exposed to traffic noise.

The analysis was carried out in two stages: tests in a reverberation chamber under controlled conditions, and acoustic simulations in a simplified urban canyon model. In the laboratory, the system achieved sound absorption coefficients higher than 0.5 from 500 Hz onwards, and a Noise Reduction Coefficient (NRC) of 0.65.

The simulations compared three types of façades: reflective, semi-absorbent (50% vegetated), and fully vegetated. Results showed that incorporating the vertical garden can reduce façade sound levels by up to 10 dB, depending on the frequency and the measurement point location.

While the results are promising, validation at an urban scale is required. In addition to its acoustic benefits, the system provides ecosystem services such as thermal regulation, water retention, and biodiversity enhancement.

**Keywords:** vertical gardens, sound absorption, urban green infrastructure, urban greening, nature-based solutions, traffic noise

## EVALUACIÓN DE UNA PROPUESTA DE REHABILITACIÓN TÉRMICO-ENERGÉTICA DE EDIFICIO ESCOLAR EXISTENTE A PARTIR DE SIMULACIÓN DINÁMICA

Guillermina Ré<sup>1</sup>, Celina Filippín<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto Regional de Planeamiento y Hábitat, Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Diseño, Universidad Nacional de San Juan (IRPha-CONICET-UNSJ).

<sup>2</sup>Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

Tel.: +54(0)264 4232395 / 3259 Int. 318 - <http://www.irpha.faud.unsj.ar>

E-mails: [guillerminare@faud.unsj.edu.ar](mailto:guillerminare@faud.unsj.edu.ar), [cfilippin@cpenet.com.ar](mailto:cfilippin@cpenet.com.ar)

**RESUMEN:** El consumo energético de edificios escolares convencionales de la ciudad de San Juan se centra principalmente en los sistemas de calefacción y de iluminación. Sin embargo, diversos estudios realizados en casos de estudio, evidencian un déficit térmico que condiciona el adecuado desarrollo de las actividades educativas. El presente trabajo tiene por objetivo evaluar una propuesta de diseño para la rehabilitación térmico-energética de un edificio escolar existente en zona árida. Para ello, se selecciona la temporada fría por ser la de mayor consumo energético. El análisis de las condiciones interiores de los espacios se realiza a partir de simulación dinámica, con la producción de modelos termofísicos, calibrados con datos obtenidos de las mediciones higrotérmicas *in situ* durante el período de receso invernal. Se concluye que la implementación de un cierre vidriado en las galerías, que originalmente funcionan como circulaciones semicubiertas, permite elevar la temperatura en 5,5 °C promedio durante el intervalo de estudio y reducir las corrientes de aire indeseadas en el interior de los espacios áulicos. A su vez, se verifica que la propuesta no evidencia sobrecalentamiento del nuevo espacio de transición en época cálida, lo cual muestra el importante potencial de intervención.

**Palabras clave:** infraestructura escolar, acondicionamiento térmico, rehabilitación, simulación

### INTRODUCCIÓN

El último Informe Global elaborado por la Agencia Internacional de Energía (IEA, 2024) establece que la demanda energética del sector de la construcción se redujo un 0,7% en 2023, después de una década en la que el crecimiento anual promedio representara más del 1%. La reciente caída se debe principalmente a un invierno con temperaturas cálidas y, en consecuencia, una menor demanda de calefacción. Por el contrario, el uso de electricidad sigue aumentando y su participación en el sector de la construcción es del 37% en 2023, frente al 31% en 2010. Al analizar la intensidad en el uso de la energía, el informe indica que la superficie edilicia crece rápidamente en conjunto con un incremento del consumo de electrodomésticos, especialmente aires acondicionados. Debido a la larga vida útil de las estructuras y de los sistemas de calefacción y refrigeración, las decisiones de diseño y elección de equipamiento que se tomen en la actualidad, determinan el uso de la energía durante los años por venir.

El consumo energético de los edificios escolares se centra principalmente en el sistema de climatización, con un elevado uso de la energía y costos asociados, que demandan de medidas de optimización desde el punto de vista térmico (Satpal et al., 2023). Dichos establecimientos también son grandes consumidores de electricidad para iluminación, ya que necesitan garantizar niveles confortables para llevar a cabo actividades de lectura y escritura. A pesar de tener un funcionamiento principalmente diurno, algunos problemas de orientación o colores de paredes interiores, hacen que la iluminación natural no resulte suficiente, y sea necesario recurrir a sistemas artificiales (De Faria Rodrigues et al. 2019). En el ámbito internacional, la tipología escolar muestra un consumo de energía variado, con valores de referencia que rondan promedios de 192 kWh/m<sup>2</sup> año (Pereira et al., 2014).





A nivel nacional, existen estudios que analizan los consumos anuales de escuelas y su relación con los Grados Días (GD) en calefacción (IRAM 11603, 2013). En la ciudad de San Juan (GD °18=1096), para una muestra de 17 edificios, los resultados indican consumos totales entre 26 kWh/m<sup>2</sup> año y 115,1 kWh/m<sup>2</sup>.año, mientras que para calefacción, los resultados se ubican entre 13,8 kWh/m<sup>2</sup>/año y 104,3 kWh/m<sup>2</sup>/año (Ré, 2025). En la provincia de La Pampa, Filippín (2005) registra que los consumos energéticos promedio de 15 establecimientos de la ciudad de Santa Rosa (GD °18 = 1500) ascienden a 120,8 kWh/m<sup>2</sup>/año. De ese total, el gas natural representa un 89,2%, mientras que la electricidad, un 10,8%, situación muy diferente que la identificada en San Juan, donde la participación es de 49,5% y 50,5% respectivamente (Ré, 2025).

En este contexto, las contribuciones ambientales del sector se pueden lograr a través de la rehabilitación energética, el reemplazo de artefactos, equipos y luminarias por unos eficientes, el uso de sistemas pasivos o híbridos de acondicionamiento, la integración de las energías renovables y la aplicación de estrategias bioclimáticas de diseño como orientación del edificio, aislación térmica, materiales utilizados y ganancia directa, entre otros. Gonzalo (2015) manifiesta que el clima debe entenderse como un elemento constitutivo y condicionante de la obra de arquitectura, siendo responsabilidad del proyectista el hecho de integrar al proceso de diseño la relación hombre-hábitat-clima para que los edificios sean capaces de adaptarse a las variaciones ambientales y brindar mayor confort y seguridad.

Distintas investigaciones encaminan sus estudios a la realización de recomendaciones bioclimáticas que permitan guiar las formas constructivas hacia diseños de edificios escolares energéticamente eficientes (Katafygiotou y Serghides, 2014; Barbosa et al., 2020; Mansouri y Guedouh, 2022). El propósito de climatizar y acondicionar pasivamente los espacios interiores de este tipo de establecimientos responde principalmente a la necesidad, cada día creciente, de disminuir el consumo energético.

En relación a la temática, desde el ámbito científico se estudia la complejidad entre el confort térmico y los parámetros climáticos externos que lo configuran. Las investigaciones realizadas por Singh et al. (2019) y por Heracleous y Michael (2020) reflejan una asociación significativa entre la temperatura de confort experimentada en los entornos educativos y las condiciones climáticas exteriores a las que están expuestos. Dentro de las estrategias pasivas de diseño dirigidas a la eficiencia energética para edificios de zonas áridas con grandes amplitudes de temperatura, los espacios de transición cerrados funcionan como amortiguadores térmicos, mitigando las pérdidas de calor de los ambientes calefaccionados (Salameh y Taleb, 2017; Hou et al., 2024). Por su parte, a nivel nacional, Boutet y Hernandez (2022) analizan propuestas de optimización ambiental de la infraestructura de un jardín de infantes de tipología compacta las cuales son validadas mediante simulación dinámica utilizando modelos termofísicos calibrados con datos medidos *in situ*.

En esta línea, el objetivo del presente trabajo es evaluar el comportamiento térmico-energético de una propuesta de rehabilitación arquitectónica de un edificio escolar existente de la ciudad de San Juan, a partir de simulación dinámica.

## **METODOLOGÍA**

La metodología responde a una investigación aplicada basada en el estudio de caso. El proceso implica el estudio profundo de un caso específico para comprender un fenómeno particular y extraer conclusiones aplicables a otros edificios de similares características. Para ello, se selecciona una infraestructura del Programa Nacional 700 Escuelas, cuyo prototipo funcional y arquitectónico es ampliamente utilizado en edificios educativos de la ciudad de San Juan.

El trabajo se desarrolla para la crujía sur del caso seleccionado, la cual está conformada por dos aulas (A5 y A6) y un laboratorio (LAB), con una Galería que funciona como circulación abierta y espacio semicubierto. Para el análisis se selecciona el período invernal por ser el de mayor uso durante el ciclo lectivo, y por tal razón, el que registra los mayores consumos energéticos en climatización. Igualmente, el funcionamiento de la intervención, también se verifica para época cálida.

La evaluación térmico-energética de la propuesta de rehabilitación se realiza con técnicas de simulación dinámica, utilizando el software Simedif V2.0 (2020). Esta herramienta permite analizar la temperatura de espacios interiores frente a diferentes condiciones climáticas y alternativas constructivas, durante la etapa de proyecto. El programa establece que cada área funcional es una *zona térmica* compuesta por un volumen de aire considerado a una temperatura uniforme. El software calcula la evolución de la

temperatura en el tiempo y realiza el balance energético sobre el volumen de aire. La zona térmica puede ser forzada a tener una temperatura fijada por el usuario (temperatura de termostato), opción que habilita a estimar la carga de calefacción y/o refrigeración (Flores Larsen, 2019).

En una primera instancia del trabajo se muestra la calibración del modelo termofísico, para lo cual se utiliza, como base empírica, los datos climáticos y de temperatura interior registrados durante las actividades de auditoría y monitoreo higrotérmico, que se describen en Ré et al. (2016). El período seleccionado corresponde al receso invernal y se desarrolla desde el 8 al 20 de julio. En esta franja de tiempo el edificio se encuentra vacío, sin asistencia de alumnos. Durante el proceso de calibración se comparan los registros de las mediciones con los valores obtenidos de la simulación. A su vez, se realiza el análisis estadístico de regresión lineal simple con el software Statgraphics, que complementa la verificación de datos. Una vez alcanzado el modelo calibrado para cada espacio, se procede al análisis de la propuesta de mejora del sector seleccionado.

La segunda instancia corresponde a la evaluación de las condiciones interiores de los espacios existentes (A4, A5 y LAB) y de la nueva zona térmica generada con la instalación de puertas ventanas de vidrio para el cierre de la galería. La propuesta de rehabilitación arquitectónica se analiza durante el período del 12 al 20 de julio, ya que los primeros días de la simulación se desestiman hasta que el modelo entre en régimen y que los espacios adquieran su respuesta térmica. En un primer momento se analizan los ambientes sin alumnos y sin cargas auxiliares, para identificar el aporte térmico de la galería cerrada. Posteriormente se consideran las ganancias internas y, como cierre del apartado, se calcula el requerimiento energético para calefacción, utilizando para ello el programa Simedif.

En la última instancia del trabajo, se realiza la verificación de la propuesta en época cálida, con el fin de detectar el posible sobrecalentamiento de los ambientes. Para el análisis se toma un día del mes de noviembre con altas temperaturas y niveles de radiación solar.

## **CASO DE ESTUDIO**

El Colegio Provincial de Rivadavia (CPR) es un establecimiento educativo del sector estatal que alberga Nivel Secundario de educación común (Ré et al., 2016).

*Arquitectura:* la infraestructura posee una tipología en U, conformada de un sector administrativo y de apoyaturas que se conecta, a través de galerías, con dos crujías en las cuales se hallan las zonas de aulas y laboratorio. La fachada principal se encuentra orientada hacia el oeste, mientras que las aulas lo hacen al norte y al sur, permitiendo la ventilación cruzada. El edificio cuenta con una superficie cubierta de 1169,4 m<sup>2</sup> y una superficie climatizada de 604,38 m<sup>2</sup>, que se indica en color verde, en la Figura 1.

*Envolvente:* la tecnología constructiva es másica con terminación de revoque. Los muros exteriores son de 30 cm y 20 cm de espesor. Los cerramientos superiores difieren en su materialidad. Para las aulas y laboratorio es losa inclinada con terminación de baldosa cerámica. Para las galerías, administración y servicios, los techos son de losa plana. La carpintería es de marco de chapa con vidrio simple y cuenta con parasoles en las orientaciones norte y oeste.

*Características de uso:* el funcionamiento del colegio es de lunes a viernes de 7.30 h a 18.30 h para actividades escolares y del personal de limpieza. Además, los días sábados, las instalaciones se ocupan para actividades especiales en horarios de 13 h a 18 h. La cantidad de alumnos total asciende a 285, mientras que el personal de limpieza, directivos y docentes, suman 30 personas.

## **LOCALIZACIÓN Y CLIMA**

El caso CPR se encuentra ubicado en el departamento de Rivadavia, provincia de San Juan, en un entorno urbano de uso residencial. Por su localización geográfica cercana a la Cordillera de los Andes, posee clima mediterráneo continental que se caracteriza por ser seco y desértico, con escasez de precipitaciones, principalmente en invierno. La zona bioambiental corresponde a la clasificación III-a, templada cálida, y se caracteriza por veranos calurosos, con temperatura media de 26 °C y máxima media superior a los 30 °C (IRAM 11603, 2012). Los inviernos son moderados, con temperatura media de 10 °C. La subzona “a” presenta amplitudes térmicas, iguales o mayores a los 14 °C. En el gráfico de la Figura 2, desarrollado por el SMN (2024), se observan claramente los máximos y mínimos alcanzados en la temperatura del aire, para un intervalo de tiempo comprendido entre los años 1967 a 2024.



Figura 1: Planta del Colegio Provincial de Rivadavia con indicación de artefactos y espacios climatizados. Corte, vista y fotografías. Fuente: elaboración propia.

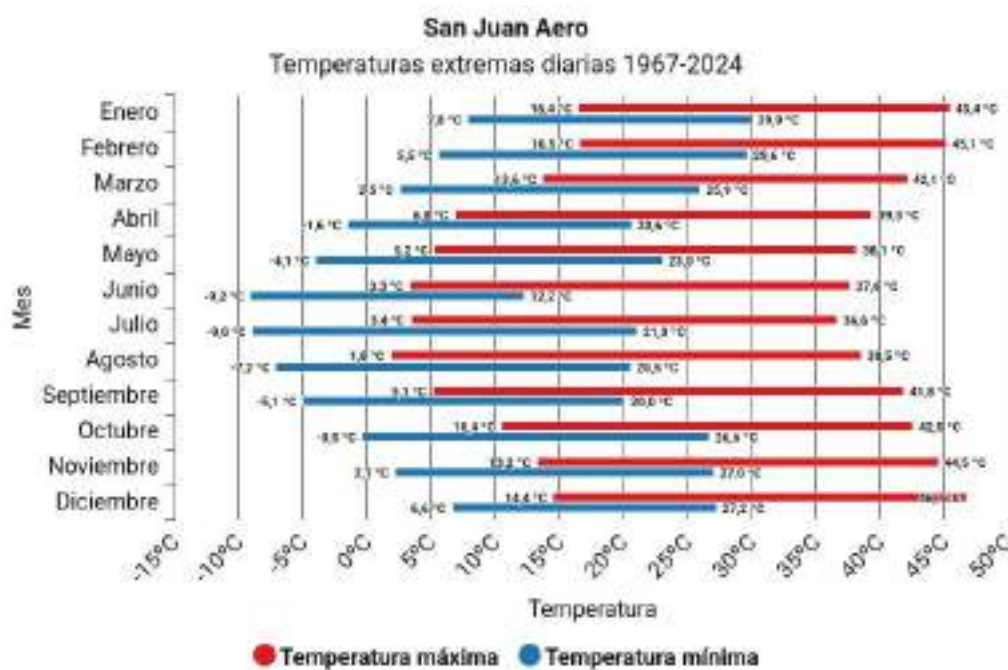


Figura 2: Rangos mensuales de T° máxima y mínima, registradas históricamente. Fuente: SMN (2024).

## RESULTADOS Y DISCUSIONES

### *Propuesta de rehabilitación arquitectónica*

Los resultados del monitoreo térmico-energético del caso de estudio (Ré et al., 2016) y de la evaluación subjetiva de las condiciones ambientales interiores (Alamino y Ré, 2022) exponen la necesidad de elaborar soluciones que den respuesta a los problemas de confort. Los diagnósticos, energético y ambiental, evidencian que el caso CPR exhibe un comportamiento térmico inadecuado durante las estaciones frías y cálidas, lo que resulta en ambientes que, con frecuencia, quedan fuera de la zona de confort. El estudio, realizado en diferentes períodos de un año calendario, demuestra que la infraestructura no cumple con los requisitos térmicos esenciales para el bienestar de sus ocupantes (Ré et al., 2016). Además, la ventilación cruzada norte-sur en las aulas promueve un movimiento del aire que se percibe con insatisfacción por los usuarios, al menos en temporada fría. Esto se encuentra potenciado por la disposición de circulaciones abiertas, como las galerías, que no funcionan como espacio de transición térmica, ni de protección contra el viento (Alamino y Ré, 2022). Como respuesta a las problemáticas detectadas en las auditorías y diagnósticos, se elaboran, en trabajos previos, propuestas de mejoras constructivas de las envolventes y de recambio tecnológico que permitirían alcanzar ahorros en los consumos energéticos, en hasta un 60 % (Ré et al., 2021).

Sin embargo, se considera necesario complementar las intervenciones mencionadas precedentemente con modificaciones arquitectónicas orientadas a minimizar las corrientes de aire indeseadas y optimizar las condiciones térmicas. Las mismas, pueden traducirse en un aumento de las horas de confort, con la disminución del uso de artefactos mecánicos de calefacción y refrigeración.

A partir de lo expuesto, este trabajo presenta y evalúa una propuesta de rehabilitación térmico-energética para un edificio escolar existente, que consiste en efectuar el cerramiento transparente de las circulaciones semicubiertas con la incorporación de puertas-ventanas de aluminio, que mantengan la conexión interior-exterior, pero generen un ambiente térmico con posibilidades de cierre y apertura (Figura 3). Para el estudio, se selecciona la crujía sur, cuya galería posee orientación al norte.

La zona térmica de la Galería cerrada se conecta con las aulas A5 y A6, y el laboratorio. Las ventanas orientadas al norte poseen una superficie de 68 m<sup>2</sup> que funciona como área captadora del recurso solar. La acumulación de energía se logra en la superficie de piso de 85,5 m<sup>2</sup> y en la pared que conecta la galería con aulas y laboratorio, cuyo coeficiente de absorción es de 0,70.



Figura 3: Izquierda: Planta de detalle de crujía sur y propuesta de cerramiento de Galería, como zona térmica simulada con Simedif. Derecha: Fotografías de la circulación e interior del Aula 5.

### Calibración con datos medidos

En esta primera instancia del trabajo convergen, por un lado, los datos que surgen de las mediciones higrotérmicas y del registro detallado de la información provista por los usuarios; por otro, las prestaciones del propio modelo de simulación en Simedif con la carga de datos relacionados a la materialidad y superficies de envolventes y de las zonas térmicas.

Según la auditoría, entre los días 8 y 13 de julio (excepto el día 9) se realiza la limpieza del edificio en horario de la mañana. Los resultados de las mediciones y registros energéticos, evidencian que desde el día 13 y hasta el fin del receso escolar los calefactores quedan encendidos en piloto y/o al mínimo de potencia. Otro dato tenido en cuenta, según la información registrada en visitas al establecimiento, es que las cortinas de tela en el laboratorio permanecen cerradas durante todo el período de monitoreo.

A su vez, el estudio de los datos climáticos revela que las condiciones externas entre el 8 y el 16 de julio se caracterizan por valores similares de irradiancia solar (alrededor de  $500 \text{ W/m}^2$ ). La temperatura alcanza su mayor valor el día 16 a las 16 h, con  $25,1^\circ\text{C}$ . Posteriormente, se observa un descenso brusco de la temperatura hasta los  $0^\circ\text{C}$ , que tiene lugar el día 19 a las 9 h. La irradiancia también desciende a  $200 \text{ W/m}^2$  al mediodía solar.

En la Figura 4 se observan los resultados de la calibración para cada área funcional. De acuerdo con los resultados de la evolución de la temperatura, la galería evidencia fluctuaciones térmicas en concordancia con la temperatura exterior. La misma es considerada como zona térmica. Para maximizar el intercambio de aire con el exterior se colocaron tres puertas que permanecen abiertas las 24 h. Para la galería se estiman 6 renovaciones por hora, mientras que para los espacios educativos el valor corresponde a 0,5.

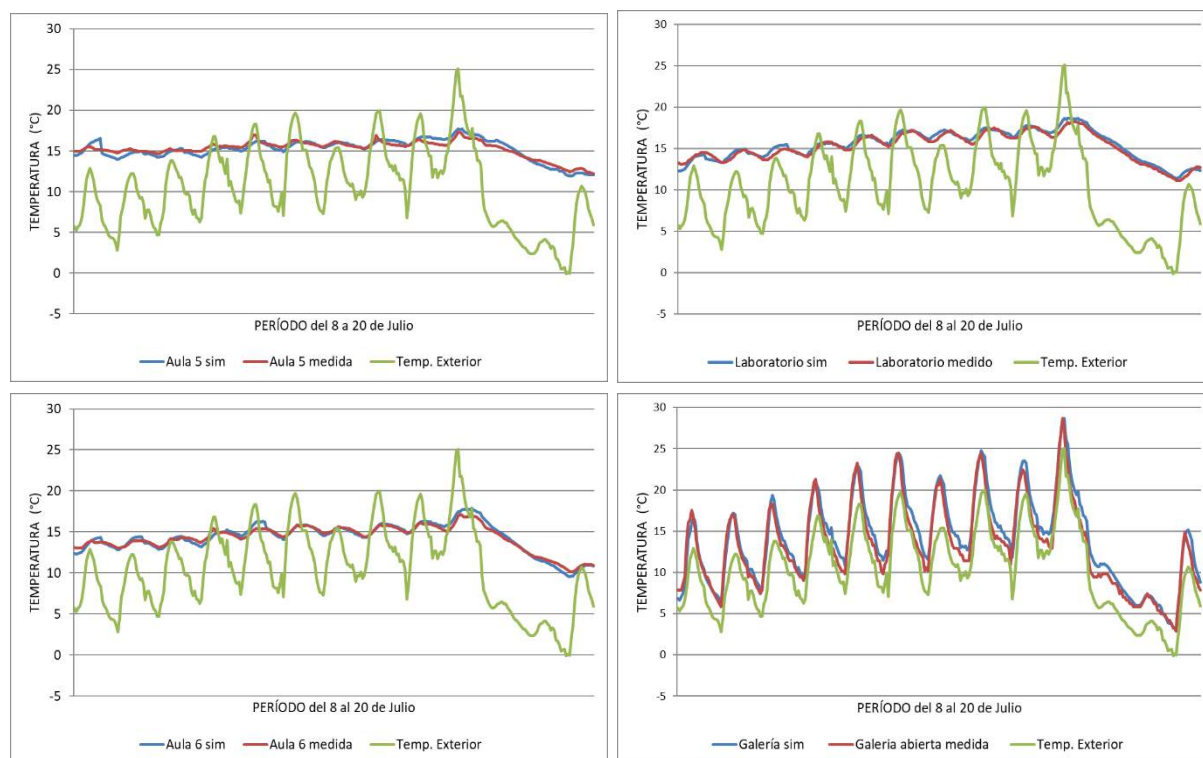


Figura 4: Datos medidos (rojo) y ajustados con SIMEDIF (azul) para el período del 8 al 20 de julio.

Conjuntamente, se realiza un análisis de regresión lineal simple para estudiar el grado de asociación entre los datos medidos y los simulados. La Tabla 1 muestra las correlaciones de Pearson, en las cuales se evidencian coeficientes elevados en cada espacio, lo que demuestra una fuerte relación lineal en las distintas áreas funcionales. En la misma Tabla se indica el Valor-P, que confirma la significancia estadística de las correlaciones, con valores de 0,0 y un nivel de confianza del 95%. Estos resultados permiten ratificar la validez del modelo termofísico y avalan su uso para el estudio del potencial de intervención energética.



Tabla 1: Correlación y Valor-P entre la temperatura del aire, medida y simulada.

| Zona térmica | Correlaciones de Pearson | Valor-P |
|--------------|--------------------------|---------|
| Aula 5       | 0,945                    | 0,00    |
| Aula 6       | 0,983                    | 0,00    |
| Laboratorio  | 0,981                    | 0,00    |
| Galería      | 0,983                    | 0,00    |

### Estudio del potencial de intervención: Galería cerrada en invierno

Una vez calibrado el modelo se procede a realizar la simulación de las distintas zonas térmicas con la galería cerrada, como espacio intermedio de transición. En un primer momento se analiza el comportamiento sin alumnos y sin carga térmica auxiliar, recreando el uso característico del período de receso escolar. En la Figura 5 se comparan los resultados de las simulaciones con los datos de las mediciones in-situ con el fin de identificar el impacto de las mejoras en cada uno de los locales. En los gráficos de la izquierda, se observa que existe una importante similitud entre las temperaturas interiores del Aula 5 y del Aula 6, ambas con un comportamiento equilibrado que suaviza la variabilidad y amplitud térmica exterior. Es posible observar que, entre los días 15 a 18, las temperaturas interiores de A5 y A6 superan a los registros de las mediciones. Sin embargo, hacia el final del período con el ingreso de un frente frío y descenso de temperatura, se identifica que A6, ubicada en el extremo de la crujía y con tres envolventes verticales en contacto con el exterior, registra un mayor descenso de la temperatura interior y evidencia ser más propensa a los efectos de cambios meteorológicos.

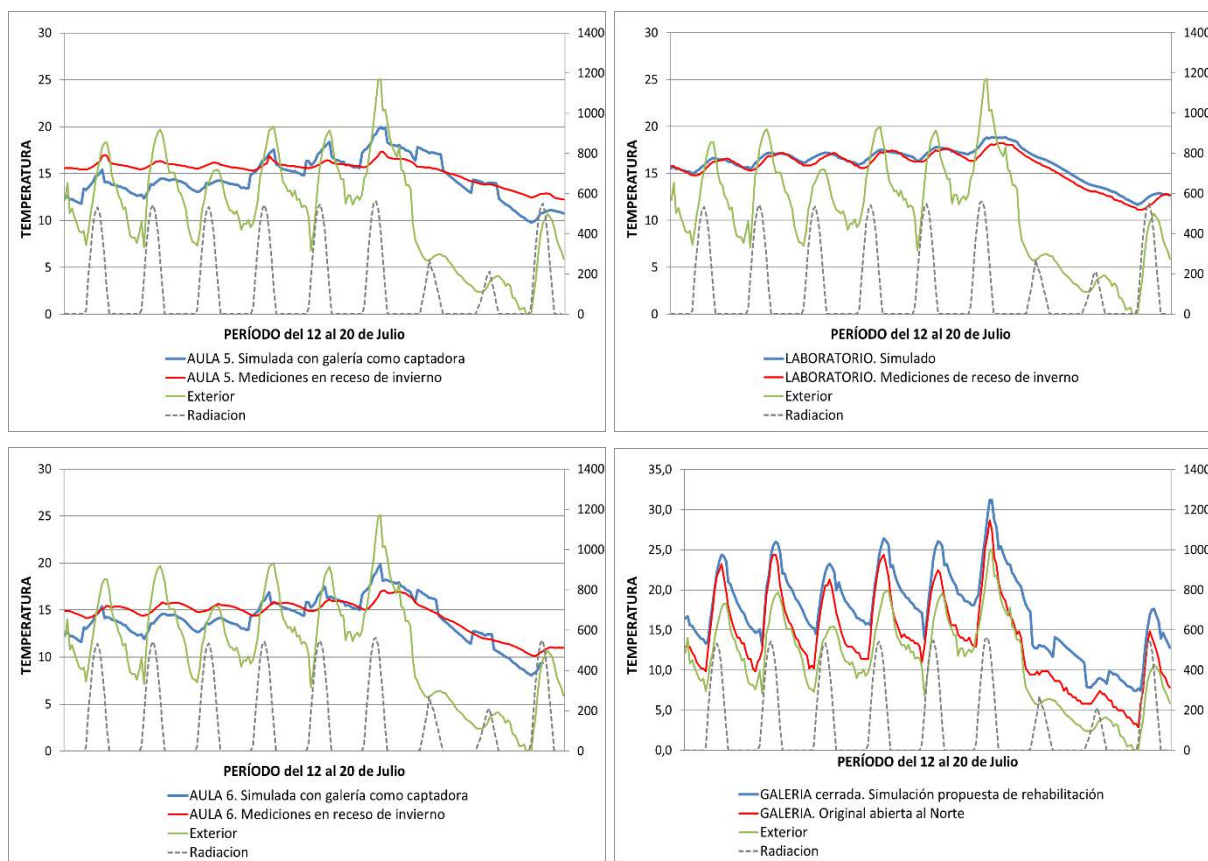


Figura 5: Resultado de la simulación en aulas, laboratorio y galería abierta.

En relación a la galería cerrada como estrategia de diseño pasivo para el mejoramiento térmico, la imagen inferior derecha de la Figura 5 refleja su importante potencial de intervención. El cerramiento

vidriado actúa como colector de la energía y la masa de las envolventes permite su acumulación, lo cual impacta con temperaturas más elevadas durante todo el período de análisis. Los datos indican que el nuevo espacio de transición es capaz de aumentar los valores entre un mínimo de 0,4 °C y un máximo 10 °C en distintos días y horarios, con un promedio de 5,5 °C superior a la temperatura exterior. Esta diferencia térmica repercute en las condiciones interiores de los locales, optimizando su comportamiento y la convierte en una adecuada medida de rehabilitación edilicia para la climatización de época fría. En base a lo detallado, se decide representar el comportamiento térmico de los espacios en un gráfico unificado (Figura 6).

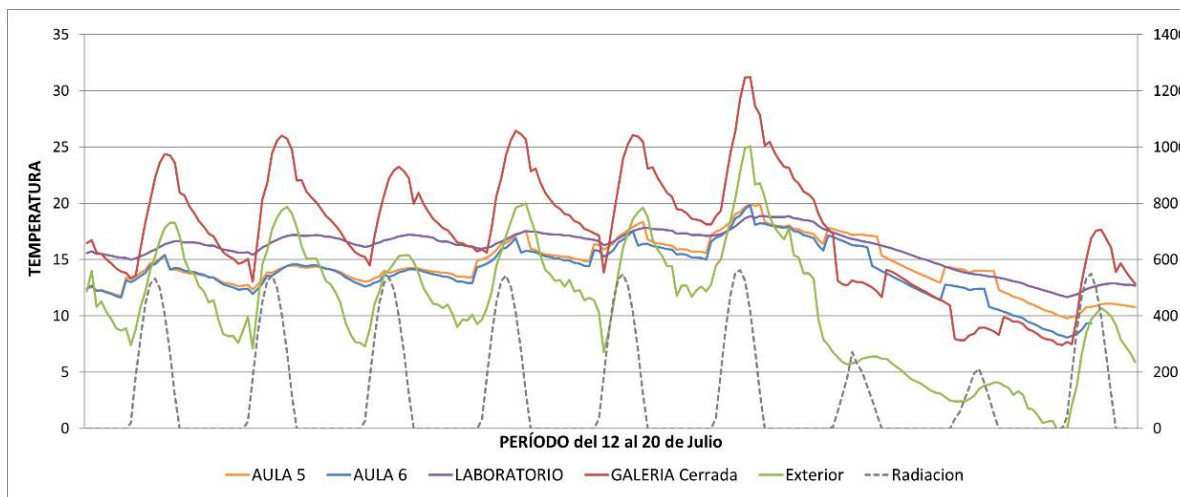


Figura 6: Simulación térmica con galería cerrada y apertura de puertas entre las 10h y 19h.

Posteriormente, se desea conocer el impacto de las ganancias internas en el comportamiento térmico de las Aulas 5 y 6 por el aporte de 27 alumnos en los turnos mañana y tarde. En la Tabla 2 se exponen los valores de las temperaturas promedio, por local. Los resultados muestran que se registra un incremento de 1,6 °C en A5 y de 1,5 °C en A6. Por su parte, en la Galería, el aumento de 1,9 °C es producto del cierre vidriado.

Tabla 2: Temperatura promedio de cada zona térmica sin calefacción auxiliar.

| Zona térmica              | Temperatura promedio (°C) |                                                            |
|---------------------------|---------------------------|------------------------------------------------------------|
|                           | Galería abierta           | Galería cerrada cuyas puertas se abren entre las 10h y 19h |
| Aula 5 (con alumnos)      | 11,2                      | 12,8                                                       |
| Aula 6 (con alumnos)      | 11,0                      | 12,5                                                       |
| Laboratorio (sin alumnos) | 10,9                      | 11,4                                                       |
| Galería                   | 13,6                      | 15,5                                                       |
| Exterior                  | 10,2                      |                                                            |

En complemento, se analiza el requerimiento energético del sector de estudio. Con la utilización del programa de simulación se calcula el consumo de gas natural diario para calefacción, considerando las horas de la jornada escolar. Como datos de temperatura, se utilizan los valores promedio del período, máxima (18,5 °C), media (10,6 °C) y mínima (2,7 °C). Para la radiación solar sobre superficie horizontal se toma 10,8 MJ/m². Además, se contempla la superficie captadora al norte y las cargas internas por alumnos. Por otro lado, en relación al uso, se configura el termostato a 16 °C y se dispone la galería abierta entre las 10 h y las 19 h. El resultado obtenido es un consumo total de 25 m³ para toda la crujía, con valor unitario de 0,12m³/m². Con este dato, el consumo en calefacción se distribuye en 5m³ para A5, en 9 m³ para A6 y en 11 m³ para LAB. Los valores acuerdan con las características de los ambientes. En A6, son mayores las pérdidas de calor debido a la mayor superficie de envoltente expuesta al exterior, mientras que en LAB, la ausencia de ganancias internas, junto con un mayor volumen y área climatizada, aumentan la demanda en calefacción.



### Comportamiento de época cálida: Galería con ventilación nocturna

Con el objetivo de analizar la posibilidad de un sobrecalentamiento indeseado de la galería vidriada, se realiza la simulación térmica para un día de primavera perteneciente al calendario escolar y caracterizado por sus elevadas temperaturas. Dado que el cierre de este espacio de transición corresponde a un recurso favorable para estaciones frías es necesario conocer su comportamiento en época cálida.

Para el análisis se considera el espacio sin aire acondicionado (AA) y con las puertas de la galería abiertas durante las horas nocturnas. La jornada a evaluar es la del 29 de noviembre, pero se cargan datos de temperaturas del aire desde las 12 h del medio día del 28 hasta las 12 h del 30. Para el estudio se hace uso del del modelo termo-físico del edificio previamente calibrado, se utilizan las temperaturas promedio (máxima 33,1 °C, media 25,5 °C y mínima 18,0 °C), la radiación solar sobre superficie horizontal (25,2 MJ/m<sup>2</sup>) y se simula en estado periódico permanente representativo de la temporada de verano. En este proceso se examina meticulosamente la dinámica térmica de los espacios.

Como estrategia de refrescamiento se evalúa la apertura nocturna de puertas exteriores entre las 0 h y las 7 h, con 7 renovaciones de aire. A su vez, se resuelve la apertura puertas que conectan las aulas con la galería, entre las 5 h y las 7 h, previniendo el horario de llegada del personal de maestranza e inicio jornada escolar. Con dichos datos cargados, el programa hace el cálculo de temperaturas horarias.

Los resultados de la simulación evidencian que la temperatura promedio diaria es de 30,2 °C en A5, de 29,6 °C en A6 y de 27,9 °C en LAB. A su vez, en la galería, se registran 28,8 °C, que representa 3,3 °C por encima de la T° exterior (25,5 °C). En la Figura 7 se observa el aumento de la temperatura en las aulas (con una media de 5 °C) como resultado de las ganancias internas durante la jornada escolar. Entre las 8 h y las 18 h, en período sin AA, los resultados muestran temperaturas promedio de 31,3 °C (A5), 30,6 °C (A6) y 28,1 °C (laboratorio), con una T° exterior de 28,4 °C. Por su parte, los datos medidos en comparación con los simulados quedan expresados en la tabla derecha. En ella se reconocen las similitudes entre ambas situaciones, indicando que no existe sobrecalentamiento significativo en la propuesta de cerramiento vidriado de la galería. La mayor diferencia se registra en A5, donde se la T° promedio es 1,8 °C más elevada.

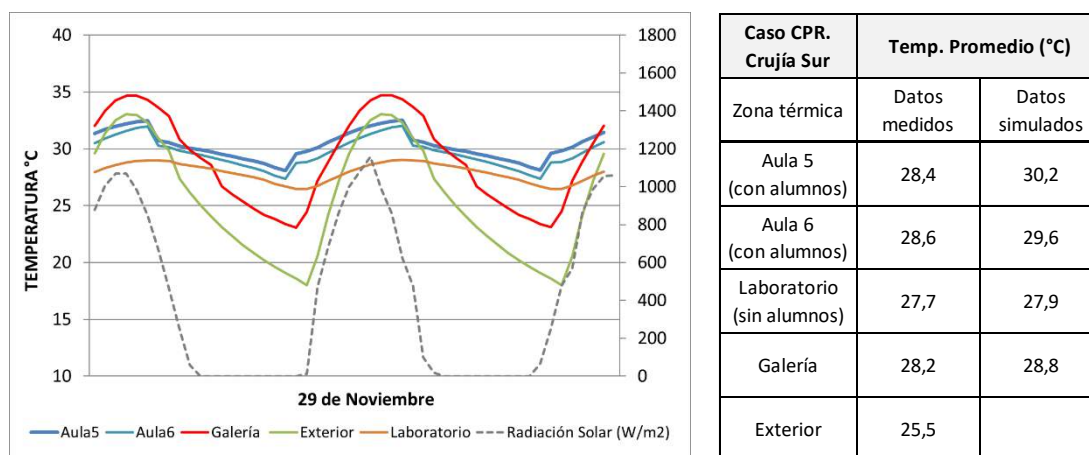


Figura 7: Simulación del comportamiento térmico de la propuesta de rehabilitación en época cálida. Tabla con datos de temperatura, medidos y simulados.

Respecto a los valores de T°<sub>min</sub> y T°<sub>max</sub>, se observa que, A5 registra 28,0 °C (6 h) y 32,5 °C (17 h), A6 alcanza 27,3 °C (6 h) y trepa hasta los 32 °C (17 h), mientras que LAB, evidencia 26,4 °C (7 h) y 29 °C (17 h) respectivamente. Por su parte, en la galería, la T°<sub>max</sub> asciende a 34,5 °C a las 16 h, con un desfase de una hora respecto a la máxima exterior, y la T°<sub>min</sub> es de 22,8 °C a las 7 h. Con ello se identifica la posibilidad de optimizar la transferencia de calor por convención desde las aulas hacia el espacio de transición por medio de un ventilador y eliminarlo a través de un extractor eólico ubicado en el techo.

Por último, se analizan los requerimientos de climatización mecánica para dichos ambientes, estimando la carga de refrigeración diaria. Para el estudio se considera una temperatura de termostato de 26 °C (IRAM 11659-1). Los resultados obtenidos indican que el consumo energético es de 57 kWh para la jornada escolar desarrollada entre las 8h y las 18h, los cuales corresponden a 24 kWh (A5), 19 kWh (A6) y 13 kWh (laboratorio). El consumo de energía por unidad de superficie útil es de 0,27 kWh/m<sup>2</sup>. Vale destacar que no se observan diferencias en la carga de refrigeración requerida en cuanto al horario de apertura de las puertas de la galería. En base a ello se dimensionan los equipos necesarios, siendo los mismos de 5500 fg/h (Frigorías) para el aula 5, 4472 fg/h para el aula 6, y 2924 fg/h para el laboratorio.

## **CONCLUSIONES**

El estudio desarrollado permite verificar el potencial de intervención de una propuesta de diseño pasivo, elaborada para la rehabilitación térmico-energética de un edificio escolar existente de zona árida. La misma consiste en la conformación de una nueva zona térmica en el espacio Galería, que funcione como ambiente cerrado de transición, entre el patio exterior y los espacios educativos interiores.

El modelo de simulación dinámica, calibrado con los datos de temperatura medidos en instancias de monitoreo in-situ, otorgan validez y confiabilidad a los resultados alcanzados. Además, los registros de los relevamientos y auditorías, junto con la participación activa de los usuarios durante las mediciones, permite contar con la información necesaria para la carga de datos precisos, minimizando las discrepancias entre simulación y calibración.

El análisis de los ambientes que integran la crujía sur del caso CPR, a partir del uso de la herramienta de simulación, muestra que se pueden alcanzar temperaturas más elevadas, tanto mínimas como máximas, durante la época fría. Los resultados conseguidos verifican la contribución de la propuesta de adecuación arquitectónica, a la optimización del acondicionamiento térmico. Se destaca que la galería cerrada, con envolventes vidriadas y con posibilidad de apertura, actúa como colectora y acumuladora, es decir que involucra los procesos de solarización y conservación de la energía. En este aspecto, los datos indican que dicha estrategia es capaz de elevar las temperaturas del nuevo espacio, en un promedio de 5,5 °C superior a la temperatura exterior. Esta diferencia térmica repercute en las condiciones interiores de los locales mejorando su comportamiento.

Por último, la propuesta de rehabilitación también es estudiada para un día de época cálida, con el objetivo de analizar la posibilidad de sobrecalentamiento indeseado. Para esto, se lleva a cabo el proceso de simulación para días lectivos del mes de noviembre que presenten elevadas temperaturas. Los resultados obtenidos demuestran que no existen grandes diferencias térmicas con los datos de las mediciones.

Se concluye que el trabajo representa una importante contribución para la rehabilitación térmico-energética de edificios escolares existentes en la ciudad de San Juan, al evaluar una propuesta de fácil implementación. A su vez, la identificación del potencial térmico de las circulaciones cerradas, que actúen como espacios intermedios entre el interior y el exterior, es una pauta de diseño a destacar para instancias proyectuales de nuevas infraestructuras escolares.

## **FUENTES DE FINANCIAMIENTO**

La presente investigación se enmarca en el proyecto CICITCA 2023-2025 (Código 21A/0987). A su vez, la base de datos de auditorías y monitoreos utilizada para la elaboración del trabajo, forma parte de la Tesis Doctoral de la Mg. Arq. María Guillermina Ré, con dirección de la Dra. Arq. Celina Filippín, del Doctorado en Arquitectura, de la Universidad de Mendoza.

## **AGRADECIMIENTOS**

Se agradece a la Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Diseño de la Universidad Nacional de San Juan por la contribución en el financiamiento de la investigación en el marco de los proyectos mencionados.

## REFERENCIAS

- Alamino-Naranjo, Y. y Ré, M. G. (2022). Ambiente interior y satisfacción de usuarios en aulas de zona árida. Estudio de caso. *Revista de Arquitectura*, vol. 27, pp. 126-139.
- Barbosa, F.C.; de Freitas, V.P. y Almeida, M. (2020) School building experimental characterization in Mediterranean climate regarding comfort, indoor air quality and energy consumption. *Energy & Buildings*, Vol. 212. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109782>
- Boutet, M.L y Hernández, A.L. (2022). Validación de propuestas de optimización ambiental de un jardín de infantes de tipología compacta, en clima muy cálido-húmedo. *Revista Hábitat Sustentable* Vol. 12, N°1, pp. 24 -43. DOI: <https://doi.org/10.22320/07190700.2022.12.01.02>
- De Faria Rodrigues, Siene; Herbst Vazquez, Gisele; Morais, Jonder (2019). Replacement of fluorescent lamps with Light Emitting Diode (LED) in an educational institution: environmental, energetic and economic concern. *Eng Sanit Ambient*, v.24, n.4, pp. 799-808.
- Gonzalo, G. (2015). *Manual de arquitectura bioclimática y Sustentable*. (5° ed). Colaboración: Nota, V.M. Editorial Nobuko.
- Heracleous, C., y Michael, A. (2020). Thermal comfort models and perception of users in free-running school buildings of the East-Mediterranean region. *Energy and Buildings*, 215. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109912>
- Hou, G., Zhai, X., Kuai, Y., Shu, P., Ping, Z., y Wei, S. (2024). A systematic review on studies of thermal comfort in building transitional space. *Journal of Building Engineering*, 89, 109280. <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.109280>
- IEA (2024-b). *World energy Outlook*. International Energy Agency. Recuperado de <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>
- IRAM 11603 (2012). Acondicionamiento térmico de edificios. Clasificación Bioambiental de la República Argentina. Instituto Argentino de Normalización.
- IRAM 11659- 1 (2004). Aislamiento térmico de edificios. Verificación de sus condiciones higrotérmicas. Ahorro de energía en refrigeración. Parte 1: Vocabulario. (1° ed.) Instituto Argentino de Normalización.
- Katafygiotou, M.C. y Serghides, D.K. (2014). Analysis of structural elements and energy consumption of schoolbuilding stock in Cyprus: Energy simulations and upgrade scenarios of a typical school. *Energy and Buildings*, v.72, p. 8–16.
- Filippín, C. (2005) *Uso eficiente de la energía en edificios*. Ediciones Amerindia. Santa Rosa, La Pampa.
- Flores Larsen, S. (2019). SIMEDIF 2.0 (Versión Beta). Software para el cálculo del comportamiento térmico transitorio de edificios. Manual del Usuario. INENCO, UNSa-CONICET, Salta, Argentina.
- Mansouri, K.; Sriti, L. y Guedouh, M. S. (2022). Post-Occupancy Evaluation of Thermal Comfort Sensation of Pupils in School Establishments under Hot Arid Climate Conditions. *Technium Social Sciences Journal*, Vol. 34, pp. 180-192. [www.techniumscience.com](http://www.techniumscience.com)
- Pereira, L., Raimondo, D., Stefano, P., Corgnati., M., Da Silva. G. (2014). Energy consumption in schools. A review paper. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. DOI: 10.1016/J.RSER.2014.08.010
- Ré, G. (2025). Eficiencia térmico-energética de edificios escolares existentes en el Área Metropolitana de San Juan. Propuesta metodológica de evaluación y calificación. Tesis doctoral. Doctorado en Arquitectura. Universidad de Mendoza.
- Ré, G., Mazzocco, M. P. y Filippín, C. (2021). Mejoras de eficiencia energética en calefacción. Potencial de intervención en edificio escolar existente del Área Metropolitana de San Juan, Argentina. En *Revista Hábitat Sustentable*. Vol.11, N°1, pp. 21-31.

- Ré, G., Blasco Lucas, I. y Filippín, C. (2016). Evaluación higrotérmica y energética de un edificio escolar perteneciente al Programa Nacional 700 Escuelas, en el Área Metropolitana de San Juan, Argentina. *Revista Hábitat Sustentable*. Vol. 6, N°2, pp. 40-51.
- Salameh, M., & Taleb, H. (2017). Courtyard as passive design solution for school buildings in hot area. <https://doi.org/10.11159/AWSPT17.141>
- Satpal, Kalpana, Bhunik Kumar (2023). Optimizing Energy Efficiency to Design IGBC Green Schools in Composite Climate. IOP conference series: Earth and Environmental Science, Volume 1326, International Conference on Creative and Innovative Solutions in Civil Engineering (CISCE-2023). Jaipur, India. DOI: 10.1088/1755-1315/1326/1/012045
- SIMEDIF (2020). Simedif. Versión 2.0. Programa de diseño y cálculo del comportamiento térmico de edificios. INENCO- UNSa- CONICET. Salta, Argentina.
- Singh, M. K., Ooka, R., Rijal, H. B., Kumar, S., Kumar, A., y Mahapatra, S. (2019). Progress in thermal comfort studies in classrooms over the last 50 years and way forward. *Energy and Buildings*, 188-189, 149-174. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.01.051>

## **EVALUATION OF A THERMAL-ENERGY REHABILITATION PROPOSAL FOR AN EXISTING SCHOOL BUILDING BASED ON DYNAMIC SIMULATION**

**ABSTRACT:** The energy consumption of conventional school buildings in the city of San Juan is primarily focused on heating and lighting systems. However, various case studies show a thermal deficit that hinders the proper development of educational activities. This paper aims to evaluate a design proposal for the thermal and energy renovation of an existing school building in arid zone. For this purpose, the cold season was selected as the period with the highest energy consumption. The analysis of the interior conditions of the spaces is performed using dynamic simulation, with the production of thermophysical models calibrated with data obtained from in-situ hygrothermal measurements during the winter recess period. It is concluded that the implementation of a glass enclosure in the galleries, which originally functioned as semi-covered circulation areas, allows the temperature to be raised by an average of 5.5°C during the study period and reduces unwanted drafts inside the classrooms. At the same time, it is verified that the proposal does not show evidence of overheating of the new transition area during the warm season, which demonstrates the significant potential for intervention.

**Keywords:** school building, thermal conditioning, rehabilitation, dynamic simulation

## **CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DE PLACAS BASADAS EN DESCARTES TEXTILES. COMPARATIVA ENTRE MEDICIONES EN CONDICIONES REALES Y DE LABORATORIO**

**Marta Edith Yajnes,<sup>1,2</sup>; Abraham Alexis Becerra Araneda,<sup>1,2</sup>; Sebastián Niemetschek<sup>1</sup>**

**1** Centro Experimental de la Producción, FADU, UBA, Ciudad Universitaria, 1428 CABA

**2** Mat Lab, EHyS, UNSAM, 25 de Mayo 1169, 1650 SAN MARTIN

Tel. 011-49910465 E-mail: myajnes@unsam.edu.ar.

**RESUMEN :** Este trabajo cuestiona la eficacia de estimar el rendimiento térmico de materiales usando exclusivamente ensayos de laboratorio para determinar la transmitancia térmica a través del coeficiente de conductividad térmica  $\lambda$  y plantea la necesidad de metodologías mixtas (de laboratorio y en condiciones reales) para evaluar su comportamiento térmico, frente a efectos del cambio climático en las temperaturas ambientales y a las diferentes tipologías de envolventes constructivas.

Se comparó el comportamiento térmico medido en condiciones reales de placas cementicias TEXACEM® basadas en residuos textiles frente a placas de poliestireno expandido EPS y a una cortina de madera emulando un cerramiento precario.

Midiendo temperaturas superficiales con un Data Logger con tres sensores, se observó que tanto la placa TEXACEM® como la de EPS presentaron en su superficie interior 4°C menos que de la cortina de madera, contrastando con los resultados de conductividad térmica  $\lambda$  medida en laboratorios según la norma IRAM 11601 Aislamiento térmico de edificios, donde el valor para TEXACEM® más que duplica al de EPS. Esto sugiere que la conductividad térmica es insuficiente para seleccionar materiales aislantes y que deben considerarse otros parámetros con mediciones reales como la inercia térmica, la radiación solar incidente, la tipología de envolvente, entre otras.

**Palabras clave:** conductividad térmica, residuos textiles, comportamiento térmico dinámico, evaluación in situ, calidad ambiental.

## **INTRODUCCION**

### Justificación de la temática

El cambio climático ha exacerbado las temperaturas extremas en Buenos Aires, donde se registran máximas históricas de hasta 41,5°C y olas de calor prolongadas (Servicio Metrológico Nacional SMN, 2025), Figura 1. Según el SMN “*un evento de ola de calor se define cuando las temperaturas máximas y mínimas superan o igualan, por lo menos durante 3 días consecutivos y en forma simultánea, a ciertos valores umbrales que dependen de cada localidad (percentil 90 del semestre cálido octubre-marzo)*”. Para Buenos Aires los valores umbrales son calculados a partir del período 1961-2010, Durante las olas de calor ocurridas en 2023 se alcanzaron temperaturas de más de 38 grados por 7 días.

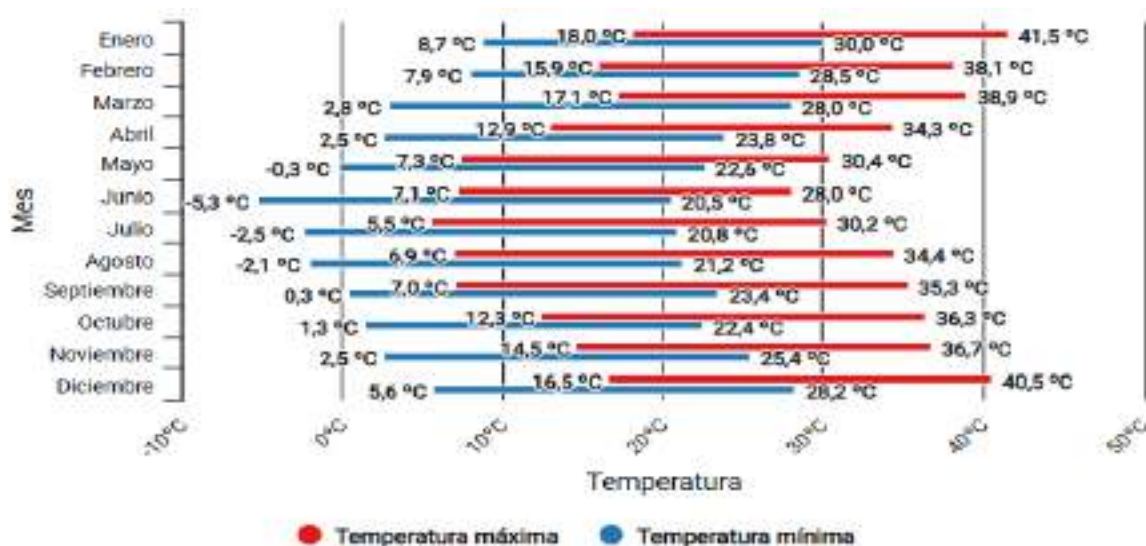


Figura 1. Temperaturas extremas diarias en Buenos Aires 1961-2024. Fuente SMN estadísticas.

En la Figura 2 se observa en cuadro elaborado por el sitio <https://es.weatherspark.com> donde se detalla: “El intervalo diario de temperaturas reportadas (barras grises) y las máximas (marcas rojas) y mínimas (marcas azules) de 24 horas, colocadas arriba del promedio diario de la máxima (línea rojo claro) y de la mínima (línea azul claro), con las bandas de los percentiles 25 a 75 y 10 a 90.” Se visualizan picos cercanos a los 40 grados.

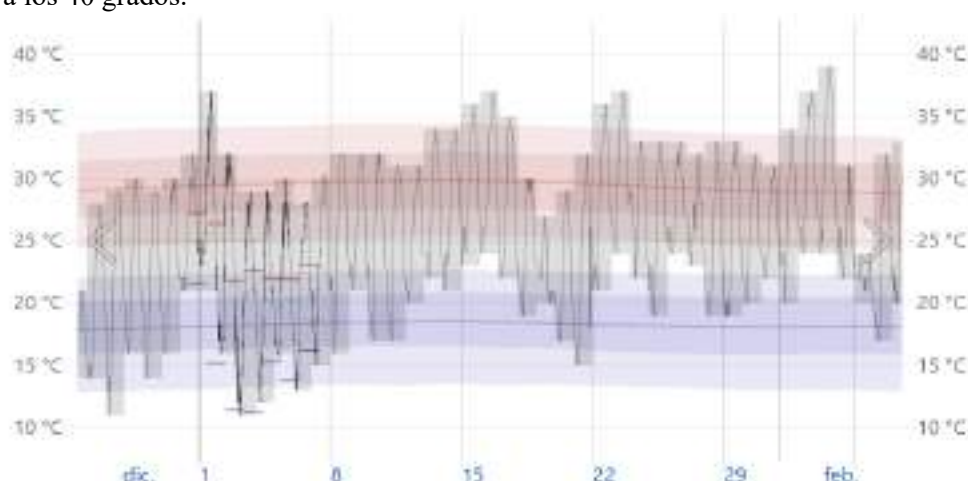


Figura 2. Temperaturas extremas. Fuente [https://es.weatherspark.com/h/m/28981/2025/1/Tiempo-hist%C3%B3rico-en-enero-de-2025-en-Buenos-Aires-Argentina#google\\_vignette](https://es.weatherspark.com/h/m/28981/2025/1/Tiempo-hist%C3%B3rico-en-enero-de-2025-en-Buenos-Aires-Argentina#google_vignette)

Estas condiciones de temperaturas extremas afectan especialmente a viviendas mal aisladas y a poblaciones vulnerables, como adultos mayores de 65 años (17,6% de los habitantes de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, CABA (Instituto Nacional de Estadística y Censos INDEC, 2022) y a los habitantes de barrios populares. El 40% de estos barrios se localizan en CABA y en la provincia de Buenos Aires y albergan a más de 723.000 familias Registro Nacional de Barrios Populares ReNaBaP. Estos barrios poseen más de 657.000 viviendas precarias con frentes expuestos a altas radiaciones sin aleros ni otras protecciones, como arboledas. La aislación de estas viviendas es clave para mejorar la situación de estas familias. A su vez la mayoría de las viviendas urbanas y suburbanas tienen frentes expuestos a altas radiaciones al estar edificadas sobre líneas municipales sin aleros ni otras protecciones (como arboledas). Este dato surge de relevamientos propios del territorio. La construcción del común de la población no cuenta con materiales aislantes, probablemente por los costos de los convencionales, la falta de conocimiento de otros alternativos, en conjunto con una cultura constructiva que no reconoce



sus beneficios higrotérmicos ni sus reducciones de consumo. Estos materiales además conllevan un extractivismo implícito en su fabricación ya que implican el uso de recursos no renovables. Otras opciones basadas en fuentes recicladas, como la lana de PET, son actualmente importadas de Brasil o tienen una producción de baja escala como la elaborada a partir de lana ovina descartada aún poseen alto costo inicial para estas familias.

Este trabajo aborda el rendimiento térmico en condiciones reales de una alternativa de aislación basada en descartes textiles valorizados y fabricada en el territorio utilizando procesos sencillos denominada TEXACEM<sup>®</sup>, Figura 3. Las placas tienen el beneficio adicional de estar cohesionadas con cemento dando así la posibilidad de ser colocadas con adhesivos de revestimientos cerámicos, una opción constructiva que se ajusta a las capacidades de la mano de obra tradicional.



*Figura 3. Proceso de manufactura desde la recepción del rollo de orillos y falsos orillos textiles hasta su corte, mezclado y fabricación de la placa TEXACEM<sup>®</sup>. Referencia: elaboración propia.*

La evaluación del rendimiento térmico de materiales aislantes se basa normalmente en parámetros estacionarios, es decir, conductividad térmica (valor  $\lambda$ , W/mK) y transmitancia térmica (valor K, W/m<sup>2</sup>K). El valor K cuantifica la cantidad de calor que fluye a través de 1 m<sup>2</sup> de un elemento de construcción cuando existe una diferencia de temperatura entre sus superficies interna y externa (Knuutila y col., 2022). A medida que bajan los valores de  $\lambda$ , el material o sistema constructivo mejora su rendimiento térmico y es más competitivo frente a otras opciones. El coeficiente de conductividad térmica lambda ( $\lambda$ ) se mide en laboratorios mediante pruebas experimentales en condiciones controladas, utilizando equipos como el Aparato de Placa Caliente con Guarda (APCG) para materiales aislantes. El procedimiento implica calentar una muestra de material bajo una diferencia de temperatura específica y medir el flujo de calor que atraviesa una sección transversal conocida para así determinar el valor de  $\lambda$  de cada material.

Sin embargo, los valores K ignoran dinámicas críticas en climas reales, como la radiación solar, la inercia térmica o el retardo en la transferencia de calor. Los cálculos de K basados en suposiciones de estado estacionario simplifican las condiciones reales porque eliminan de las ecuaciones los cambios de temperatura dependientes del tiempo y la capacidad calorífica (Nakaya, 2018). Esto ignora el comportamiento dinámico de un edificio en condiciones reales (Mohammad et al. 2018).

También están las características arquitectónicas y los elementos de diseño de un edificio no considerados para calcular K. Por ejemplo, el valor K de un sistema constructivo disminuye a mayor espesor de pared y aumenta al introducir aberturas de ventana (Wang et al. 2024).

Para incluir el espesor de pared y el efecto combinado de todos los materiales en un conjunto de pared, se utiliza el valor de resistencia térmica (R) como la inversa de K (Mohamed et al. 2018). Los materiales con igual valor  $\lambda$  pueden absorber y emitir calor a tasas significativamente diferentes en condiciones climáticas dinámicas, lo que resulta en rendimiento térmico diferentes (Mohammad y col., 2018). Esto puede ser crítico en climas variables durante los días calurosos (Gengembre y Jacquemet. 2021) como el de Buenos Aires en verano.

Para incluir el área de toda una envolvente, se pueden utilizar el valor KA (o UA) (valor K por el área de envolvente) y el valor HTC (Heat Transfer Coefficient) o Coeficiente Global de Transferencia de Calor, que es un valor equivalente y real obtenido en condiciones reales para un edificio. A diferencia el valor KA más teórico y basado en ensayos de laboratorio, el valor HTC integra las pérdidas reales, incluyendo aquellos puentes térmicos no considerados en el cálculo teórico del valor KA.

En resumen, se requiere un enfoque integral para evaluar el rendimiento térmico, más allá de los cálculos del valor K. El análisis térmico dinámico aborda las limitaciones mencionadas arriba al incorporar variables dependientes del tiempo, tales como: *Índice de inercia térmica* (Shen et al. 2023), *Transmitancia térmica periódica* (Yie) (Levi et al. 2020), *Factor de decremento* ( $\delta$ ) (Yuan, 2018), *Retardo temporal* ( $\phi$ ) (Yuan, 2018), *Admitancia térmica* ( $Y$ ) y *adelanto temporal de la admitancia* ( $\omega$ ) (Yuan, 2018), *Factor de superficie* ( $F$ ) (Yuan, 2018) y *Capacidad térmica* ( $\eta$ ) (Yuan, 2018). La relación entre estos parámetros varía según el tipo de aislamiento, el espesor y la disposición del material (Yuan, 2018). Por estos motivos, los valores  $\lambda$  y K y junto a mediciones recolectadas en condiciones reales son esenciales para una evaluación fiable del rendimiento energético de un material o sistema constructivo.

## ESTADO DE LA CUESTIÓN

Se cuenta con el desarrollo de un protocolo simple de pruebas in situ para medir valores K en edificios existentes mediante el monitoreo de las temperaturas de la superficie manteniendo las condiciones de calefacción interior controladas de Tavukcuoglu (2018). La recolección de datos con mediciones a través de un Data Logger de productos innovativos con materiales provenientes del procesamiento de residuos textiles en mezclas cementicias ya fue utilizada por otros autores como Rodrigues Magalhães (2017) quienes trabajaron con mezclas cementicias y residuos textiles generando piezas de 550 kg/m<sup>3</sup> de densidad promedio. Los textiles empleados contenían fibras de lana y viscosa con un pequeño aporte de elastano fraccionados en trozos de 3 x 3 cm. Vidal y Barona (2023) analizaron y evaluaron el desempeño térmico de sistemas de cubiertas utilizadas en construcciones en seco para edificaciones de vivienda ubicadas en la ciudad de Santiago de Cali y su área de influencia a partir del empleo de varios equipos Data Logger EXTECH RHT10 que aportaron lecturas sobre temperatura y humedad relativa en intervalos de 30 minutos al interior y exterior de 28 probetas correspondientes a 28 sistemas constructivos.

## HIPÓTESIS

La transmitancia térmica basada en la conductividad térmica es insuficiente para caracterizar y predecir el rendimiento térmico de un sistema constructivo, con materiales basados en residuos, en diferentes estaciones del año, en esta presentación se estudia en particular en un período de verano. La respuesta de placas cementicias que incluyen residuos textiles acrílicos son equivalentes a placas de EPS a igualdad de espesor independientemente de los valores obtenidos de conductividad en ensayos de laboratorio por la influencia de la radiación solar y de la inexistencia de protecciones.

## OBJETIVOS

General: Caracterizar en condiciones reales el rendimiento térmico de un novedoso producto basado en residuos textiles. Específicos: Evaluar en condiciones reales parámetros adicionales a la conductividad térmica para abordar el rendimiento térmico de un producto de construcción en cuanto a la evolución de temperaturas como complemento de mediciones de conductividad térmica a través del índice lambda. Proponer un método de análisis de la evolución de temperaturas de los paramentos interiores.

El presente trabajo deja el análisis de otros términos que afectan la transferencia de calor para investigaciones futuras, tales como ganancias solares (que dependen de la orientación, radiación y absortividad de las superficies), las infiltraciones de aire exterior, el efecto del viento (que altera la convección en las superficies externas) y la humedad (que puede modificar las propiedades térmicas de los materiales).

## METODOLOGÍA

La investigación presenta un propósito exploratorio, con abordaje de herramientas cualicuantitativas. En su desarrollo, se parte de una fase de definición de los marcos teóricos y operativos, a partir del análisis bibliográfico y estudio de casos referentes. Luego, se desarrolla una fase analítica con trabajo de laboratorio y comparación. Por último, como fase sintética, se comparan los resultados obtenidos con los supuestos teóricos, para exponer las conclusiones.

### Tratamiento operativo

Se estudiaron tres materiales: placa TEXACEM®, placa de EPS de 4 cm de espesor y 15 kg/m<sup>3</sup>, y una persiana de enrollar simple de madera de 1,2 cm de espesor sin aislación. Esta placa EPS constituye un material de aislación muy utilizado en la Argentina. Esta persiana de madera emuló los cerramientos de viviendas precarias por ser esta la solución de menor rendimiento térmico empleada, instaladas en un muro que mira en dirección norte en verano en la Ciudad de Buenos Aires. TEXACEM® es una placa cementicia, surgida de la tesis de maestría en Gestión Ambiental Metropolitana Universidad de Buenos Aires UBA de una de las autoras de esta investigación, que incluye residuos textiles de fibras acrílicas provenientes de residuos de la tejeduría plana denominados orillo y falso orillo generados en su proceso productivo sin posibilidad de ser reducirlos, esta materia prima se genera en forma lineal conformando bollos de hasta 2000 metros de longitud con un ancho de entre 2 y 3 cm, que luego son fraccionados a 7,5 cm para su uso en las placas. Estas presentan una cara lisa y otra rugosa, y se fabrican en dos medidas: 40 cm x 60 cm x 3,2 cm y 33 cm x 57 cm x 3,2 cm, según el sistema constructivo a emplear. Para este trabajo, se usó esta última. Figura 1. Su densidad promedio es de 500 kg/m<sup>3</sup> sin nivelación con una dosificación de 1:0,25:1,75 -cemento, fibras, agua. Las placas recibieron reconocimiento para exposición y catálogo en el concurso INNOVAR en las ediciones 2022 como investigación aplicada y 2023 como producto innovador y tienen una doble función de aislación térmica y acondicionamiento acústico.

Las placas TEXACEM® cuentan con valores  $\lambda$  medidos en dos oportunidades en el Instituto Nacional de Tecnología Industrial INTI, Tabla 1. Debido a requerimientos de la técnica experimental y del equipo de medición, se tuvieron que nivelar las placas TEXACEM® que poseen superficies irregulares. Se utilizaron dos variantes de nivelación: una con mezcla cementicia y otra con espuma de poliuretano. A modo comparativo, la Tabla 1 también incluye los valores  $\lambda$  de placas EPS de 4 cm de espesor según lo reportado en la norma IRAM 11601-2002.

*Tabla 1. Comparativa de valores de conductividad térmica. Elaboración propia en base a datos de ensayos de laboratorio en el INTI y de la norma IRAM 11601-2002.*

| Laboratorio / origen del dato | Material               | Densidad kg/m <sup>3</sup> | Nivelacion  | conductividad lambda (W/mK) |
|-------------------------------|------------------------|----------------------------|-------------|-----------------------------|
| INTI                          | TEXACEM <sup>(R)</sup> | 699                        | cementicia  | 0,106                       |
|                               |                        | 514                        | poliuretano | 0,0968                      |
| Norma IRAM 11601:2002         | EPS en planchas        | 15                         |             | 0,037                       |

Se realizaron mediciones de temperatura en las placas colocadas en el muro de frente del primer piso de la fachada de una vivienda de planta baja y un piso, ubicada en un sector de pasajes del barrio de Caballito, caracterizado por sus casas bajas, en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, CABA, ver Figura 4, desde el 12 hasta el 31 de enero de 2025, por considerarse un periodo con registro histórico de temperaturas máximas en esta ciudad.

La Figura 5 muestra la disposición de los materiales en las aberturas de las ventanas de la fachada y de los sensores de temperatura en contacto con la superficie de estos materiales que mira hacia el interior de la vivienda. Para estas mediciones, se utilizó un monitor y medidor en tiempo real de temperaturas: el Data Logger marca ESP Design modelo DXT 1720 P, que incluye tres sensores de temperatura DS18820 con un rango de temperaturas desde -55 hasta 125°C, con una 1 m de longitud, Figura 5. Para recolectar las mediciones y monitorearlas a distancia, el Data Logger se conectó por wifi a una computadora y a un celular. La recolección de datos con el Data Logger para estos fines ya fue utilizada por otros autores (Rodrigues Magalhães, 2017). El área de cada material expuesto a la radiación solar fue de 2400 cm<sup>2</sup> para la placa TEXACEM, de 2400 cm<sup>2</sup> para la placa de EPS y de 4800 cm<sup>2</sup> para la persiana de madera sin aislación.



Figura 4. Ubicación del caso de estudio, con coordenadas geográficas -34.614801, -58.444454. Referencia: Elaboración propia.

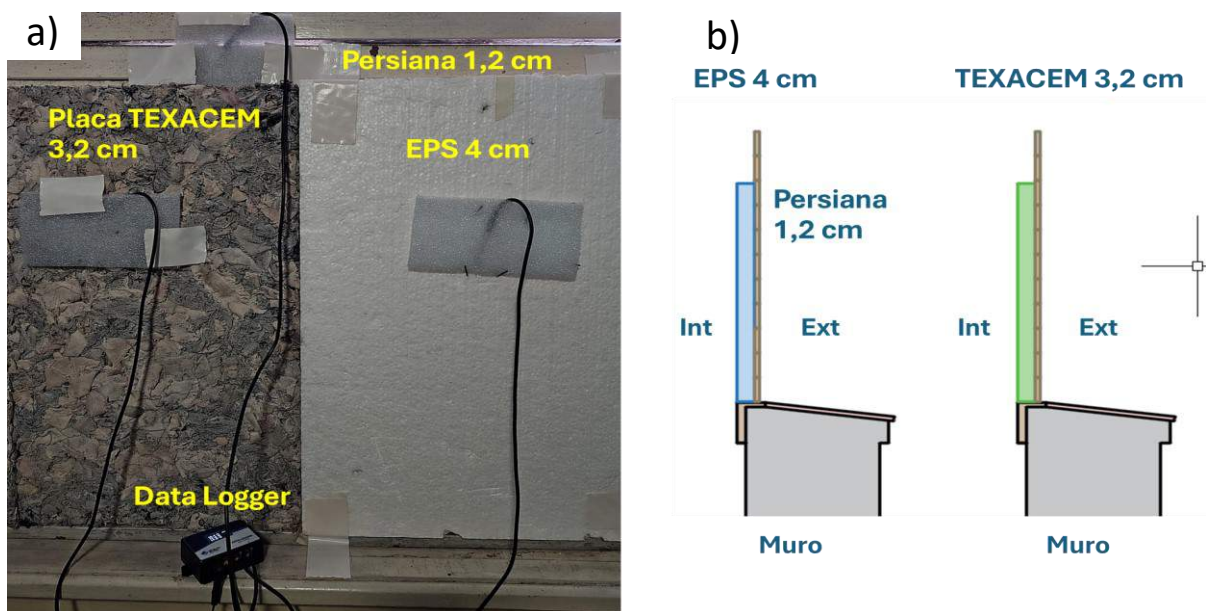


Figura 5. a) Disposición del Data Logger para las mediciones de temperatura de los materiales estudiados en este trabajo: placa TEXACEM®, placa de EPS y persiana de madera. b) Disposición de los materiales de estudio en la pared de la vivienda. Referencia: Elaboración propia.



En la figura 6 se observa una fotografía del conjunto de la ventana con las placa TEXACEM® y EPS, tomada con cámara termográfica Hickmicro Pocket Series, al inicio de las mediciones donde se observa la paridad de temperaturas de las placas y la diferencia entre ellas y el valor de la cortina de madera sin aislación alguna.



Figura 6. Imagen termográfica tomada in situ. Elaboracion Propia.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Mediciones en condiciones reales

La Figura 7 muestra las curvas de temperatura recolectados durante todo el periodo de mediciones para los tres materiales estudiados.

Durante los momentos más calurosos del día (entre las 15:00 y 17:00 h), las placas de EPS y las placas TEXACEM® tuvieron en promedio temperaturas 4°C menor frente a la cortina de madera (curvas azul y verde vs curva naranja en Figura 7).

En general, durante las franjas horarias entre 20:00 y 8:00 h, ambas placas mostraron temperaturas levemente mayores a esta cortina. La máxima oscilación de temperatura durante un día se registró en la cortina y fue de 5°C el 23 de enero entre las 15 y 16,30 horas, seguido de 4,88°C el 16 y 26 de enero en el mismo horario. Las diferencias de temperatura entre estas placas fueron siempre menores a 0,8 °C, incluso entre las 15:00 y 17:00 h. Además, en ciertos días de enero (del 12 al 14 y del 29 al 31) estas diferencias fueron mínimas, sólo décimas de grado.

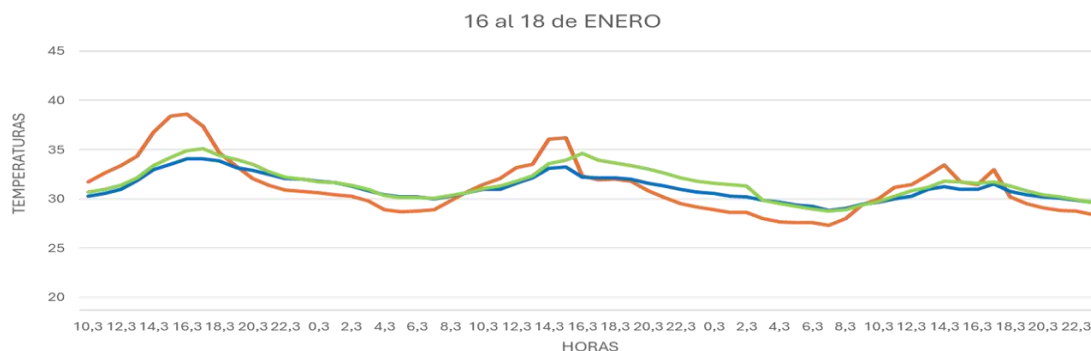




Figura 7. Curvas de temperatura medidas en grados centígrados, con el Data Logger desde el 12 hasta el 31 de enero de 2025 en las superficies materiales mostradas en la Figura 5. Las horas indicadas concuerdan con las horas del día, donde la hora 0 es medianoche. Elaboración propia.

### Comparación entre mediciones en condiciones reales y de laboratorio (valores $\lambda$ )

Los valores  $\lambda$  medidos para la placa TEXACEM® son en promedio 2,75 veces mayor que los reportados para las placas de EPS, Tabla 1 considerando las mediciones en el laboratorio del INTI, tanto en su versión de nivelación cementicia como con poliuretano para las placas TEXACEM® y valores de Norma IRAM 11601 para las de EPS.

Por otro lado se observa en las curvas de la Fig. 7 que los dos materiales comparados, las placas de EPS de 4 cm de espesor y las placas TEXACEM® de 3,2 cm van parejos, especialmente en los días y horas con mayor diferencia con las temperaturas registradas por el equipo para la persiana, sin ninguna aislación. A su vez como se cita *ut supra* la diferencia entre ambos materiales aislantes y la persiana llega a 4 grados en los días y horas con mayor registro térmico

Si bien el umbral de conductividad térmica que define a un material aislante varía según las normas, el valor  $\lambda$  más citado es alrededor de 0,07 W/mK, y los materiales por debajo de este valor se consideran aislantes térmicos según varias normas (ISO 9164:1989, DIN 4108) (Hadded et al. 2016). Otras normas menos exigentes en este aspecto exigen un valor  $\lambda$  menor o igual 0,1 W/mK (Reza et al. 2023). Según este criterio, las placas TEXACEM® serían consideradas como materiales no aislantes. Sin embargo, las mediciones *in situ* demostraron que su capacidad para dificultar el paso del calor al interior de la vivienda (según la temperatura superficial medida) es bastante similar a una placa EPS que sí es aceptada como material aislante por su valor  $\lambda$ .

Según el método tradicional de cálculo de la caída de temperatura en un elemento constructivo que separa dos espacios con diferentes valores es proporcional a su resistencia térmica (R), esta a su vez resulta del cociente del espesor de cada capa sobre el valor  $\lambda$ , Norma IRAM 11625:2006. En este caso de estudio se demuestra que el valor  $\lambda$  resultaría insuficiente siendo que la caída de temperatura fue similar para las placas de EPS y TEXACEM®, cuando sus valores de  $\lambda$  difieren en un promedio de 2,75 menor en el caso del EPS y espesores similares.

Frente a la divergencia observada entre los comportamientos térmicos de las placas EPS y TEXACEM® medidas *in situ* con un Data Logger y en laboratorio (valores  $\lambda$ ), se propone el diseño interdisciplinario de nuevos procedimientos de laboratorio e *in situ* para caracterizar el rendimiento térmico real de soluciones constructivas para aislación térmica. Esta metodología debería incorporar en una versión óptima los conocimientos incluidos en la Tabla 2. También, tendría que adaptarse a materialidades basadas en residuos para así evitar la necesidad de añadir materiales exógenos para su adaptación, tal como ocurrió con las mediciones de  $\lambda$  para las placas TEXACEM® (Yajnes et al. 2024).

Si bien el sistema TEXACEM<sup>(R)</sup> se basa en mezclas cementicias con descartes textiles, internamente se generan capas con distinta relación cemento/descarte textil debido a su proceso de fabricación (para detalles ver Yajnes, 2024) dado que el cemento decanta y la capa superior disminuye notablemente su densidad comparada a la capa basal. Según Vejelis et al. 2023 el efecto de la densidad para disminuir la conductividad térmica se altera entre 50 y 70 kg/m<sup>3</sup> porque en este rango la transferencia de calor a través del aire atrapado dentro del material se minimiza. Esta variabilidad en la densidad según capas en el sistema TEXACEM<sup>(R)</sup> podría dificultar su caracterización del rendimiento térmico basado en ensayos tradicionales como la medición de conductividad térmica  $\lambda$ .



*Tabla 2. Resumen de disciplinas y sus respectivos conocimientos que aportar al diseño de un método para caracterizar el rendimiento térmico de soluciones constructivas tradicionales y no tradicionales (ej.: basadas en residuos) combinando mediciones de laboratorio y en condiciones reales.*

| Disciplina                                       | Conocimientos                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Física de materiales</b>                      | Propiedades termofísicas ( $\lambda$ , difusividad, capacidad calorífica) y comportamiento bajo radiación solar y humedad que validar parámetros dinámicos en condiciones reales vs. laboratorio.                                                                                                                                                                                   |
| <b>Ingeniería de procesos térmicos</b>           | Modelado de transferencia de calor dinámica y calibración de equipos de medición (data loggers, termografía) para diseñar protocolos que integren mediciones in situ y ensayos normalizados.                                                                                                                                                                                        |
| <b>Tecnología de materiales no tradicionales</b> | Caracterización del comportamiento térmico de materiales no tradicionales en contacto con materialidades tradicionales cuando se usan como productos de aislación.                                                                                                                                                                                                                  |
| <b>Arquitectura</b>                              | Diseño de envolventes (protección solar, inercia térmica, entre otros) y normativa de eficiencia energética para vincular resultados con soluciones constructivas reales.                                                                                                                                                                                                           |
| <b>Estadística y ciencia de datos</b>            | Análisis de datos multivariados y series temporales debido a fluctuaciones térmicas y a la incertidumbre en mediciones para optimizar la recolección de datos in situ que minimicen ruido. Esto ayudará a interpretar modelos predictivos para correlacionar $\lambda$ teórico y rendimiento real y curvas térmicas para desarrollar herramientas que integren laboratorio y campo. |

Para abordar esta última cuestión, en la Unión Europea establecieron un procedimiento estandarizado llevado a cabo por los mismos fabricantes. Cuando un producto no está cubierto por alguna Harmonised European standard (hEN), que puede ocurrir con productos no tradicionales basados en residuos, se puede solicitar una European Technical Assessment (ETA), la cual es emitida por European Organisation for Technical Assessment (EOTA) (ETA 2025). Desde 2014, la EOTA desarrolla ETAs utilizando la experiencia científica y tecnológica para desarrollar y adoptar European Assessment Document (EAD). Las EADs son una interesante fuente de información técnica de un producto porque contienen la lista de propiedades esenciales del producto, los métodos y criterios para evaluar el rendimiento del producto y las acciones del fabricante durante el procedimiento de evaluación y verificación de la constancia de rendimiento del producto.

## CONCLUSIONES

A partir de las mediciones in situ con el equipo Data Logger de 3 sensores, se verifica que la respuesta de las placas cementicias TEXACEM® de 3,2 cm de espesor que incluyen residuos textiles acrílicos, aplicadas sobre una superficie de muy baja capacidad de aislación térmica con orientación Norte NO, en una locación urbana en un área de viviendas de baja altura – planta baja y 1 piso –, son equivalentes a placas de EPS de 4 cm, prácticamente a igualdad de espesor, independientemente de su densidad y valores obtenidos de conductividad en ensayos de laboratorio. Concluimos que este resultado está justificado por la influencia de la radiación solar y la difusividad de los materiales (Oktay et al. 2020),

De lo expuesto resulta imprescindible para anticipar rendimientos reales de productos destinados a mejorar el confort edilicio incluir la influencia de la radiación solar, la inercia térmica y el retardo en la transferencia de calor. Por otro lado, es fundamental considerar la inexistencia de protecciones sobre los paramentos para evaluar la ganancia térmica de los paramentos. Se refuerza así la necesidad de considerar el efecto de los cambios de temperatura dependientes del tiempo y la capacidad calorífica (Nakaya, 2018), dado que el comportamiento de un edificio en condiciones reales es dinámico (Jannat et al. 2020) (Mohammad et al. 2013). Los nuevos cálculos deberían reflejar el hecho que los materiales pueden absorber y emitir calor a tasas significativamente diferentes en condiciones climáticas dinámicas

afectando su rendimiento térmico (Jannat et al. 2020) (Mohammad et al. 2013) especialmente en climas variables durante los días calurosos (Gengembre y Jacquemet. 2021).

Se plantean como complemento a los métodos tradicionales de medición de  $\lambda$  un estudio de evolución de temperaturas como el presentado en este trabajo para lo cual se propone el diseño de una metodología de medición de materiales con equipos Data Logger que estandarice el proceso en cuanto a duración de ensayos, frecuencia de mediciones, orientación de la superficie expuesta y radiación mínima y máxima requerida, superficies expuestas, materiales de comparación y condiciones de exposición y barreras físicas a la fuente de calor. En este caso se eligieron los siguientes parámetros: 15 días, orientación norte, cada 30 minutos, orientación norte, mes enero, superficie 2400 cm<sup>2</sup>, materiales EPS de 4 cm y madera de 1,2 cm y ausencia de barreras físicas al menos en 9 metros. Como mejora del ensayo se propone incluir la medición de temperatura superficial externa en correlación con los tres materiales para analizar el retardo temporal. A su vez se plantea la necesidad de la emulación de laboratorio de las condiciones reales a las que están expuestos los paramentos aportando fuentes de calor artificiales con parámetros controlados de igual modo que en la propuesta citada. En ambos casos se propone que estos protocolos se validen por autoridades competentes e internacionalicen de modo de contar con normativa unificada para la comparación de productos.

## FUENTE DE FINANCIACION

Proyecto de investigación UBACYT cat 1AIII Secretaria de Ciencia y Técnica UBA. 2020-2025.

## AGRADECIMIENTOS

UBA por la financiación, a UNSAM por sus instalaciones, ambas por los RRHH y a los pasantes, alumnos y voluntarios que hacen posibles los desarrollos y a las industrias que aportan sus residuos.

## REFERENCIAS

- Becerra, A; Yajnes, M; Busnelli, R; Aranda, Y; Niemetschek, S. II Jornadas internacionales de investigación y acción sobre residuos Hacia una economía circular desde los territorios. UNICEN RIAR (2024). “Sobre el desarrollo y la certificación de productos upcycled siguiendo pautas adaptadas al territorio”.
- Gengembre, E; Jacquemet, K. (2021). Static and dynamic thermal characterization of facade with mineral foam insulation using a hot-box apparatus. J. Phys.: Conf. Ser. 2069 012089. DOI 10.1088/1742-6596/2069/1/012089
- Hadded, A; Benltoufa, S; Fayala, F; Jemni, A. (2016). Thermo physical characterisation of recycled textile materials used for building insulating. Journal of Building Engineering. Volume 5, Pages 34-40. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2015.10.007>
- IRAM 11601 (2002), Aislamiento térmico de edificios Métodos de cálculo Propiedades térmicas de los componentes y elementos de construcción en régimen estacionario.
- IRAM 11625 (2006), Aislamiento térmico de edificios. Verificación de sus condiciones higrotérmicas.
- ISO 10456 (2007), Building materials and products. Hygrothermal properties. Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values
- Knuutila, M; Kosonen, A; Jaatinen-Värri, A; Laaksonen, P. (2022). Profitability comparison of active and passive energy efficiency improvements in public buildings. Energy Efficiency (2022) 15:38. <https://doi.org/10.1007/s12053-022-10046-9>.
- Levi, E; Neri, M; Pilotelli, M; Piana, E. (2020). Numerical and experimental study on metamaterials featuring acoustical and thermal properties. J. Phys.: Conf. Ser. 1599 012032. DOI 10.1088/1742-6596/1599/1/012032
- Magalhães, L. J. R. (2018). *Estudo do potencial de aplicação de resíduos têxteis em elementos de betão leve* (Doctoral dissertation, Universidade de Tras-os-Montes e Alto Douro (Portugal)).
- Mohamed, M; Almarshadi, M. (2018). Energy saving in air conditioning of buildings. MATEC Web of Conferences 162, 05024. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201816205024>.

- Nakaya (2018). Reduction the Effect of Heat Transmission for the Heat Capacity of Building Wall in Summer. *American Journal of Agriculture and Forestry* 6, 4. 10.11648/j.ajaf.20180604.15
- Reza, M; Begum, HA.; Jalal Uddin, A.J. (2023). Potentiality of sustainable corn starch-based biocomposites reinforced with cotton filter waste of spinning mill. *Heliyon*. 2023 Apr 23;9(5):e15697. doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e15697. PMID: 37215920; PMCID: PMC10195908.
- Shen, T.Q., Sun, L. (2023). Evaluating energy efficiency potential in residential buildings in China's hot summer and cold winter zones. *International Journal of Heat and Technology*, Vol. 41, No. 6, pp. 1468-1478. <https://doi.org/10.18280/ijht.410609>.
- Vėjelis, S.; Skulskis, V.; Kremensas, A.; Vaitkus, S., Kairytė, A. (2023). Performance of Thermal Insulation Material Produced from Lithuanian Sheep Wool. *Journal of Natural Fibers*, 20(2). doi: 10.1080/15440478.2023.2237682
- Vidal, S.; Barona, J. (2023). Análisis y evaluación del desempeño térmico de sistemas de cubiertas utilizadas en construcciones en seco para edificaciones de vivienda ubicadas en la ciudad de Santiago de Cali y su área de influencia. *Ingeniería Y Competitividad*, 25(1), e-20211363. <https://doi.org/10.25100/iyv.25i1.11363>
- Wang, Y; Liu, F; Yang, H; Fu, F. 2024. Thermal insulation performance of non-load-bearing light gauge slotted steel stud walls. *Sustainable Structures* Vol.4,No.1,2024 DOI:10.54113/j.sust.2024.000042.
- Yajnes, M; Becerra Araneda, A; Busnelli, R; Niemetschek, S; Aranda, Y; Mateo, F; Cervera, C; Abalone, R (2024) XLVI Reunión de Trabajo de Energías Renovables y Ambiente “Capacidad aislante térmica de nuevos productos cementicios para la construcción basados en residuos: desafíos experimentales”. ASADES. Rosario.
- Yuan (2018). Impact of Insulation Type and Thickness on the Dynamic Thermal Characteristics of an External Wall Structure. *Sustainability* 2018, 10(8), 2835; <https://doi.org/10.3390/su10082835>

#### WEBS

- ETA 2025. <https://www.eota.eu/what-is-an-eta-old>, leído el 9/8/2025
- <https://www.smn.gob.ar/estadisticas> leído el 7/7/2025
- [https://www.estadisticaciudad.gob.ar/si/demog/principal-indicador?indicador=b17&cortante={%22g\\_edad%22:true,%22sexo\\_2%22:true}%22#&grafico](https://www.estadisticaciudad.gob.ar/si/demog/principal-indicador?indicador=b17&cortante={%22g_edad%22:true,%22sexo_2%22:true}%22#&grafico) leído el 7/7/2025.
- [https://www.estadisticaciudad.gob.ar/eyc/wp-content/uploads/2024/07/ir\\_2024\\_1877.pdf](https://www.estadisticaciudad.gob.ar/eyc/wp-content/uploads/2024/07/ir_2024_1877.pdf) leído el 7/7/2025.
- <https://www.lahn.utexas.org/wp-content/uploads/2020/04/Buenos-Aires-Presentacion-de-los-casos-de-estudio.pdf> leído el 7/7/2025.
- [https://es.weatherspark.com/h/m/28981/2025/1/Tiempo-hist%C3%B3rico-en-enero-de-2025-en-Buenos-Aires-Argentina#google\\_vignette](https://es.weatherspark.com/h/m/28981/2025/1/Tiempo-hist%C3%B3rico-en-enero-de-2025-en-Buenos-Aires-Argentina#google_vignette) leído 6/7/2025
- <https://www.argentina.gob.ar/obras-publicas/sisu/renabap>. Leído 6/7/2025.

### THERMAL CHARACTERIZATION OF PLATES BASED ON TEXTILE WASTE. COMPARISON BETWEEN MEASUREMENTS UNDER REAL AND LABORATORY CONDITIONS

**ABSTRACT:** This study questions the effectiveness of estimating the thermal performance of materials using only laboratory tests to determine the thermal transmittance of insulators, through lambda coefficient, and argues that mixed methodologies (laboratory and real-world conditions) are needed to evaluate the actual thermal behavior of insulating materials, given the effects of climate change on ambient temperatures and the different types of building envelopes.

The thermal performance measured in real conditions of cementitious boards based on textile waste TEXACEM® was compared with EPS (expanded polystyrene) boards and a typical wooden curtain used in openings emulating a precarious enclosure.

By measuring surface temperatures with a data logger with three sensors, it was observed that both TEXACEM® and EPS boards reduced the interior temperature by up to 4°C compared to the wooden curtain, contrasting with the results of thermal conductivity measured in the laboratory according to standard IRAM 11601, where it was much higher for TEXACEM® than for EPS. This suggests that thermal conductivity alone is insufficient for selecting insulating materials and that other parameters must be considered, such as thermal inertia, incident solar radiation, and the type of building envelope, among others.

**Keywords:** thermal conductivity, textile waste, dynamic thermal behavior, in situ evaluation, environmental quality.

## MONITOREO, REFUNCIONALIZACION Y SIMULACIÓN ENERGÉTICA DE UNA VIVIENDA DE INTERÉS SOCIAL EN CATAMARCA

**Alicia Macías<sup>1</sup>, Ana Mariela Martinena<sup>1</sup>, Celina Filippín<sup>2</sup>, Víctor García<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Carrera de Arquitectura - Facultad de Tecnología y Ciencia Aplicadas – Universidad Nacional de Catamarca- Maximio Victoria 55 – CP 4700 – <http://tecno.unca.edu.ar/> Catamarca- Argentina

<sup>2</sup> CONICET, Santa Rosa, La Pampa

<sup>3</sup> Grupo de Energías Renovables Catamarca, Facultad de Ciencias Agrarias UNCA. CATAMARCA  
Tel. 0383 465 5886- e-mail: [arq.alimaciass@gmail.com](mailto:arq.alimaciass@gmail.com)

**RESUMEN:** En Catamarca, el Instituto Provincial de la Vivienda, creado por Ley N° 4084 (1984), constituye uno de los organismos responsables de dar respuesta al déficit habitacional. Entre 1979 y 2024 otorgó 25.791 viviendas en toda la provincia, de las cuales el 62 % se concentró en la capital. El objetivo general del estado es resolver la deficiencia habitacional, centrándose en la económica de recursos, dejando de lado criterios que respondan adecuadamente a las condiciones climáticas y las necesidades reales de confort térmico de quienes la habitan. El presente trabajo muestra los resultados del monitoreo higrotérmico, cuyas mediciones evidenciaron el sobrecalentamiento de los espacios, alejándose de la zona de confort (22°C y 27 °C). Se analizan las características termo físicas de los materiales y se plantea la rehabilitación térmica de la envolvente a bajo costo. Las simulaciones realizadas permiten disminuir un 35% la energía auxiliar necesaria para refrigerar y 37 % para calefaccionar. El estudio evidencia la necesidad de considerar criterios que respondan adecuadamente a las condiciones climáticas y las necesidades reales de confort térmico de los habitantes, para así reducir el gasto económico en que incurren para lograrlo.

**Palabras clave:** déficit habitacional, confort térmico, rehabilitación térmica.

### INTRODUCCIÓN

Las ciudades actuales funcionan como sistemas altamente ineficientes, grandes consumidoras de recursos naturales, lo que genera tanto el agotamiento de dichos recursos como un incremento sostenido de la contaminación ambiental. En Argentina, el abastecimiento eléctrico alcanza a más de doce millones de viviendas; sin embargo, la falta de inversión en el sector energético provoca situaciones de escasez, lo cual constituye una gran preocupación para el país, dado que la energía es un recurso esencial para el crecimiento económico y el desarrollo social (Secretaría de Energía de Argentina, 2021). En particular, el sector residencial representa el 36% del consumo total de energía y, en término de emisiones, es responsable del 14,7% de los gases de efecto invernadero. Particularmente, el acondicionamiento térmico de viviendas y edificios (calefacción y refrigeración) concentra aproximadamente el 18% de la energía utilizada (Secretaría de Energía de Argentina, 2021). No obstante, las políticas habitacionales de las últimas décadas se han enfocado casi exclusivamente en la reducción del déficit de viviendas y en la dinámica de la economía de la construcción, dejando en segundo plano aspectos relacionados con el ambiente, la eficiencia energética y el confort térmico de los hogares (Ministerio del Interior, Obras Públicas y Vivienda, 2019). Las decisiones de diseño y construcción, especialmente en los programas estatales, suelen centrarse en reducir los costos iniciales sin considerar el comportamiento térmico de la envolvente, lo que provoca mayores gastos en calefacción o refrigeración que impactan directamente en las familias; además cuando la envolvente no se adecua al clima local, surgen problemas como la condensación y deterioro de los cerramientos, incrementando los costos de mantenimiento. (Secretaría de Energía de Argentina, 2021) Conforme Martínez (2005), este aspecto no debería ser obviado en ningún tipo de construcción, especialmente en los emprendimientos de vivienda del Estado, debido a



que el gasto de funcionamiento y mantenimiento que generan las mismas posteriormente resultan significativos considerando el presupuesto familiar disponible de la mayoría de los usuarios.

En Catamarca, el Instituto Provincial de la Vivienda (I.P.V.), creado por Ley N° 4084, del 6 de marzo de 1984 - Decreto N° 670, se constituyó como un organismo descentralizado con fines sociales. En el periodo 1979-2024, ha entregado 25.791 soluciones en la provincia (I.P.V. Catamarca, 2025), además de otros programas de mejoramiento y refacción de viviendas construidas o no por el organismo aludido. Sin embargo, estas soluciones se proyectaron y construyeron sin un análisis climático adecuado, lo que obliga a los usuarios a recurrir a sistemas activos de acondicionamiento, generando mayor consumo de energía y un impacto ambiental considerable.

La problemática no es nueva, trabajos relevantes a lo largo del país han demostrado que muchas viviendas sociales presentan un comportamiento higrotérmico deficiente. A modo de ejemplo, en Tucumán, Martínez (2004-2005) expone los resultados del comportamiento térmico energético de uno de los tipos constructivos de cerramiento exterior usado tanto en viviendas de ejecución privada como las ejecutadas por el estado. Analizando la transmitancia térmica de los materiales, simulaciones y el balance térmico de diferentes superficies, considerando todas las orientaciones, arriba a la conclusión que la construcción de envolventes térmicamente eficientes no solo reduce los costos operativos, sino mejora otras áreas como la salud y el bienestar de sus ocupantes. En Tierra del Fuego, Díaz y Czajkowski (2006) presentan los resultados de su estudio referido a auditorías energéticas en viviendas de interés social, donde concluyen que se corrobora la hipótesis que la mayor parte de los elementos de la envolvente de los edificios no cumplen con los valores de transmitancia térmica establecidos por las Normas IRAM. En Córdoba, más precisamente en Villa Allende, Di Bernardo et al (2011), trabajaron sobre el monitoreo y simulación térmica energética de verano de una vivienda en condiciones reales de uso en clima templado cálido, llegando a la conclusión que los locales no alcanzan las condiciones higrotérmicas de confort en la mayor parte del tiempo debido a la ineficiencia de las envolventes, la falta de protección de estas y el inadecuado manejo climático de sus ocupantes. En Catamarca, Molas et al. (2008) realizaron una auditoría térmica sobre una vivienda ejecutada por el mismo organismo, difiriendo la tipología y la orientación. El objetivo principal fue conocer el comportamiento térmico en relación con parámetros de confort. Como conclusión se plantea que el diseño de la envolvente es insuficiente para alcanzar los rangos de confort térmicos establecidos y como consecuencia de ello demanda mayor cantidad de energía auxiliar para acondicionamiento.

De igual manera, acciones y estrategias bioclimáticas en el diseño de edificios se han transformado en una necesidad urgente para reducir el consumo energético del sector, dado que la envolvente de los edificios actúa como interfaz entre el ambiente interior y el exterior, determinando la ganancia y pérdida de calor y, por lo tanto, el requerimiento de energía necesario para calefaccionar o enfriar los espacios. La aislación térmica de muros y techos juega un papel fundamental, permitiendo disminuir los valores de transmitancia y evitando pérdidas o ganancias energéticas innecesarias. Al respecto Mercado et al. (2021), han analizado la incidencia de la aislación térmica en viviendas unifamiliares de distintas formas y materiales durante el período de enfriamiento en diversas zonas bioambientales de la República Argentina. Mediante simulaciones paramétricas con J-eplus, se combinaron variables de cuatro niveles de transmitancia térmica para muros y techos, cuatro proporciones de relación muro opaco/vidrio, dos sistemas constructivos y tres tipologías formales, alcanzando un total de 3456 simulaciones. Los resultados evidencian que, en climas muy cálidos, cálidos y templados cálidos, el consumo energético disminuye al aumentar los valores de transmitancia térmica en muros, mientras que los techos presentan un consumo menor cuando sus valores son más bajos, lo que resalta la importancia de un diseño integral de la envolvente para la eficiencia energética. En esta línea, la rehabilitación térmica surge como una estrategia complementaria para reducir el consumo de energía y las emisiones de CO<sub>2</sub> en viviendas existentes. Mazzocco et al. (2018) estudiaron el comportamiento térmico-energético de una vivienda social en la región central de Argentina, proponiendo su rehabilitación mediante simulaciones con ECOTECT y SIMEDIF. La intervención incluyó la incorporación de aislación térmica en la envolvente y un aumento del 10,8% al 20,3% del área vidriada colectora norte, logrando mejoras significativas: incremento de la energía contenida en los espacios (4,3–7,1%), ahorro de energía en calefacción de hasta 85,6%, y cumplimiento de las recomendaciones de las Normas IRAM, mejorando el etiquetado energético de la vivienda. Estos resultados muestran que tanto el diseño de la envolvente desde su



concepción como la rehabilitación energética de viviendas existentes son medidas eficaces para optimizar el desempeño térmico, reducir costos operativos y generar ambientes más confortables para sus ocupantes.

En este contexto, el Programa de Eficiencia Energética y Energías Renovables en la Vivienda Social Argentina (AR-G1002) constituye una iniciativa nacional orientada a mejorar la eficiencia energética y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en el sector residencial. Financiado por el Fondo para el Medio Ambiente Mundial y ejecutado en cooperación con el Banco Interamericano de Desarrollo el programa implementó 128 viviendas prototipo en 8 provincias, incorporando criterios de diseño bioclimático y tecnologías de energías renovables adaptadas a las condiciones climáticas locales. Las estrategias adoptadas incluyeron la instalación de sistemas fotovoltaicos, sistemas solares térmicos, optimización de orientación y ventilación, uso de materiales sustentables y capacitación de las comunidades. Los resultados evidenciaron una reducción del consumo energético de hasta un 30%, demostrando la efectividad de combinar diseño bioclimático, aislamiento térmico y energías renovables en la vivienda social, (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2023) aportando un marco de referencia para la rehabilitación energética de viviendas existentes, incluyendo las de Catamarca.

Bajo estas condiciones, el presente trabajo busca describir el diseño y la tecnología de la unidad habitacional analizada, evaluar su desempeño térmico y proponer una estrategia de rehabilitación que permitan revertir las deficiencias observadas, tomando como base la evidencia aportada por los estudios previos, adaptada a las condiciones del lugar de emplazamiento.

## LOCALIZACIÓN Y EMPLAZAMIENTO

La vivienda se encuentra en la capital de la provincia de Catamarca, que se desarrolla a orillas del río del Valle y al pie de la sierra de Ambato y de la sierra de Ancasti, tiene 399 km<sup>2</sup> y se halla a 550 m s. n. m. Cuenta con 159.139 habitantes, los que, sumados a los 35.916 habitantes de los otros departamentos del Valle Central (Valle Viejo y Fray Mamerto Esquiú), representan alrededor del 53,29 % de la población de la provincia, contando actualmente con 230.000 habitantes.

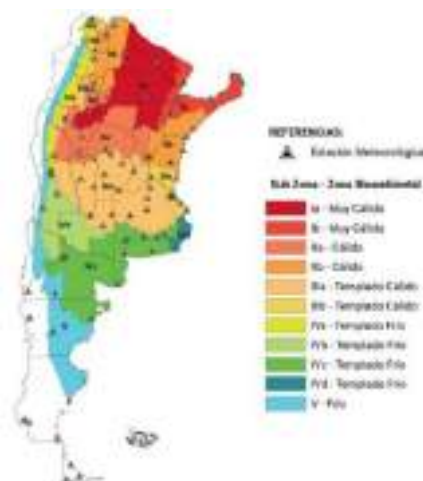


Figura 1: Zonas bioclimáticas de la República Argentina. Norma IRAM 11.603

De acuerdo con la Norma IRAM 11.603, la ciudad se encuentra en la zona II cálida, subzona IIa, (Figura 1) donde la estación crítica es el verano con valores de temperatura media mayores que 24 °C y temperatura máxima mayor que 30 °C. Las mayores amplitudes térmicas ocurren en esta época del año, con valores de 14° °C como máximo. En contraposición, el invierno es más seco, con bajas amplitudes térmicas y temperaturas medias comprendidas entre 8 °C y 12 °C.

La vivienda fue ejecutada y entregada en abril de 2021, emplazándose en un lote de 432 m<sup>2</sup> con orientación O-E en el sector este de la ciudad, (Figura 2a y 2b) en calle Cornelio Saavedra al 200, a 30 m de la Avda. Recale. El entorno inmediato es de viviendas particulares, en su mayoría en planta baja.



(a)



(b)

Figura 2: Vista Satelital, (a) Ciudad de Capital, (b) De la ubicación de la vivienda

## DESCRIPCIÓN DE LA VIVIENDA

El partido arquitectónico corresponde al de viviendas unifamiliares compactas desarrollada en una sola planta con orientación oeste, su eje principal en sentido este-oeste. Cuenta con energía eléctrica, red de agua potable, desagües cloacales independientes y carece de provisión de gas natural debido a que la zona no cuenta con el suministro. Posee una superficie cubierta de 55 m<sup>2</sup> y un volumen de 154 m<sup>3</sup>, adosada a la medianera sur (Figura 3). El programa de arquitectura se conforma por dos dormitorios, cocina-comedor y baño. Se prevé la posibilidad de ampliar un dormitorio más (Figuras 4a y 4b).

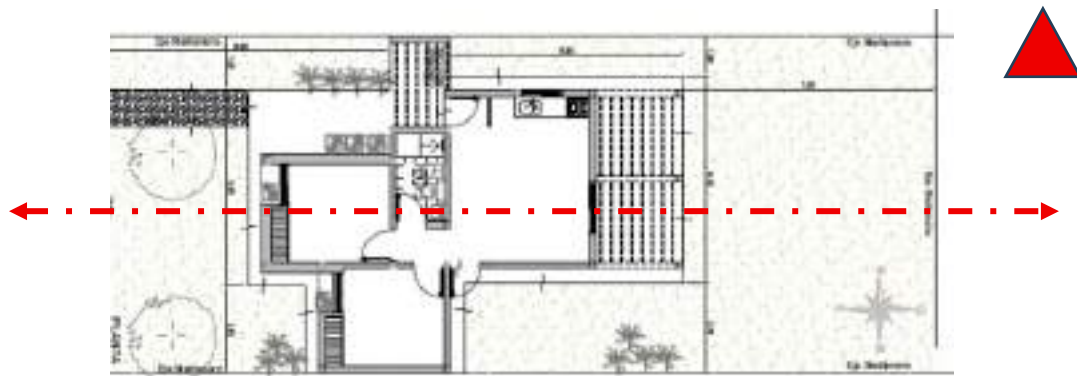


Figura 3: Ubicación de la vivienda en el terreno



(a)

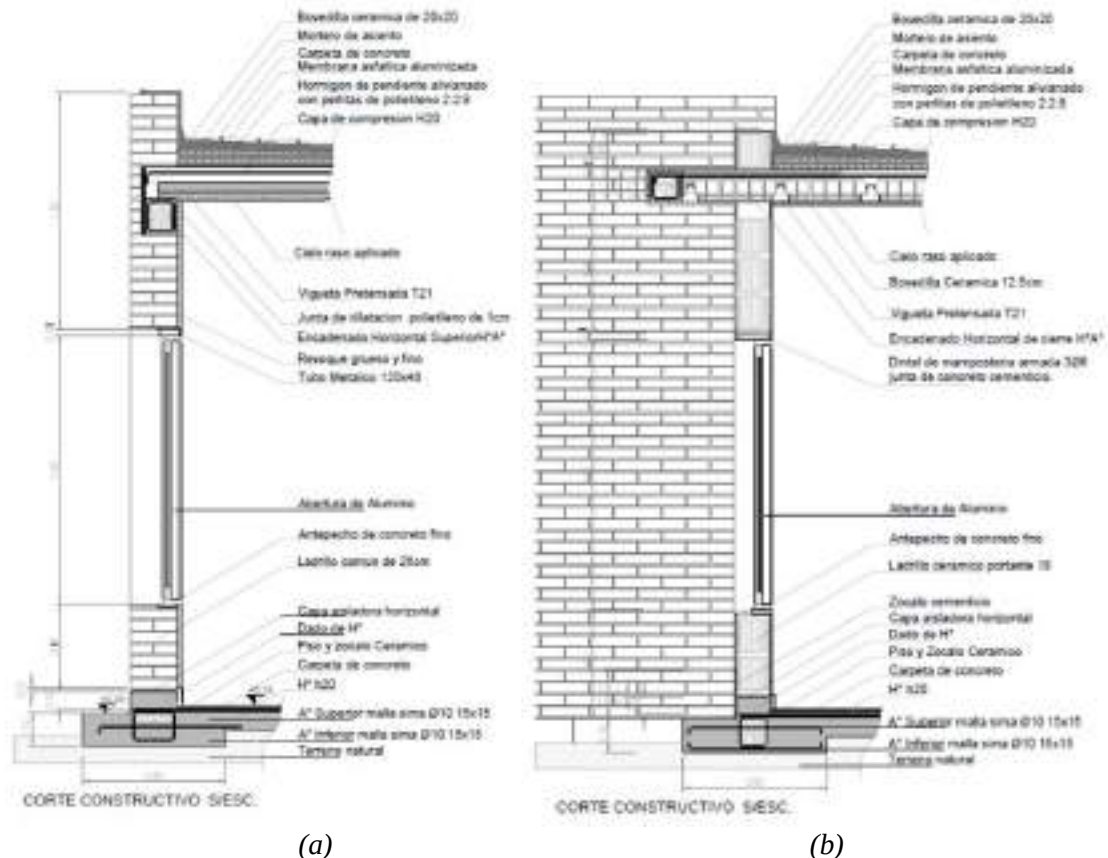


(b)

Figura 4: Fachadas, (a) Vista oeste (b) Vista este

Desde el punto de vista constructivo, la vivienda se edifica sobre una platea de hormigón armado con un espesor de 0,10 m. La estructura, también de hormigón armado, incorpora muros portantes cuya altura promedio es de 3,20 m, resueltos con dos tipologías constructivas. En primer lugar, se emplea un muro conformado por ladrillo común macizo a la vista de dimensiones 0,26 × 0,12 × 0,05 m dispuesto en aparejo inglés, con junta de mortero de asiento de 0,02 m y acabado revocado en su cara interior, alcanzando un espesor total de 0,28 m (véase Figura 5a). En segundo lugar, se utiliza un muro portante

de ladrillo cerámico hueco de 0,18 m, cuyas dos caras se revisten con revoque, obteniéndose así un espesor total de 0,20 m (véase Figura 5b). La envolvente horizontal superior se resuelve mediante un cielorraso aplicado de yeso, sobre el cual se dispone una losa compuesta por viguetas pretensadas T21 y bovedilla cerámica EPS de 13 cm, seguida de una capa de compresión. Adicionalmente, se incorpora una capa de hormigón con pendiente, aligerada mediante perlitas de polietileno en proporción 2:2:8, sobre la que se coloca una membrana asfáltica aluminizada, una carpeta de concreto, mortero de asiento y finalmente bovedilla cerámica de 20 × 20 cm. Respecto a la carpintería, las puertas exteriores presentan un núcleo inyectado y las ventanas, fabricadas en aluminio, cuentan con acristalamiento de vidrio transparente o translúcido de 4 mm de espesor.



(a) (b)  
Figura 4: Detalles constructivos, (a) muro 1, (b) muro2

## METODOLOGIA

El presente trabajo se organizó en diferentes fases que permitieron analizar integralmente la vivienda (Figura 6):

a) Revisión bibliográfica: Se evaluó y analizó material bibliográfico de antecedentes sobre el tema aplicables a las características de la región.

b) Análisis del contexto físico-ambiental: Se llevó a cabo el estudio del clima y marco geográfico de la ciudad de San Fernando del Valle de Catamarca.

c) Identificación de necesidades higrotérmicas: Se determinaron las necesidades higrotérmicas exteriores e interiores estableciendo los parámetros de confort de la localidad de análisis de modo de determinar estrategias bioclimáticas. Los métodos aplicados son el climograma de Olgay (1963), el Diagrama psicrométrico Givoni (1991) y las Recomendaciones de Normas IRAM 11603 (1996).

d) Estudio del emplazamiento y morfología de la vivienda: Se realizó el estudio particular del emplazamiento de la vivienda de análisis. Se analizó el impacto de la forma de la vivienda en relación

ganancia/pérdida de calor mediante la aplicación de los índices de compacidad (Mascaró,1999), Factor de Forma (Goulding, 1994) y Factor de Área Envolvente Piso (Esteves, 1997).



Figura 6: Metodología

e) Evaluación de materiales constructivos: Se estudiaron las propiedades termofísicas de los materiales empleados en la ejecución de la unidad habitacional mediante la Norma IRAM 11.605 (1996), que establece los valores máximos de transmitancia térmica aplicables a muros y techos tanto para invierno como para verano, además los criterios de evaluación de puentes térmicos. Se consideró Nivel B (medio) de confort higrotérmico.

f) Monitoreo de condiciones ambientales: Se midieron las condiciones del aire interior y exterior, durante el periodo más crítico (verano), durante 10 días seguidos entre el 20/12/2021 y el 30/12/2021. Para ello se utilizaron cuatro sensores, colocados aproximadamente a 2.10 m del nivel de piso, tipo HOBO U12-012, cuyas características técnicas se detallan a continuación: registro de temperatura entre -20°C y 70°C, con una precisión de  $\pm 0.35$  °C de 0°C a 50°C. Registro de nivel de humedad relativa de 5% a 95%, con una precisión de  $\pm 2.5\%$  de 10% a 90%. Acondicionados, en los distintos espacios de la vivienda: 1) cocina-comedor integrada con pasillo, 2) baño, 3 y 4) los dos dormitorios y 5) sensor exterior, en la salida este de la vivienda para medir las condiciones exteriores (Figura 7a y 7b). La toma de datos se realizó cada 15 minutos relevando temperatura y humedad relativa.

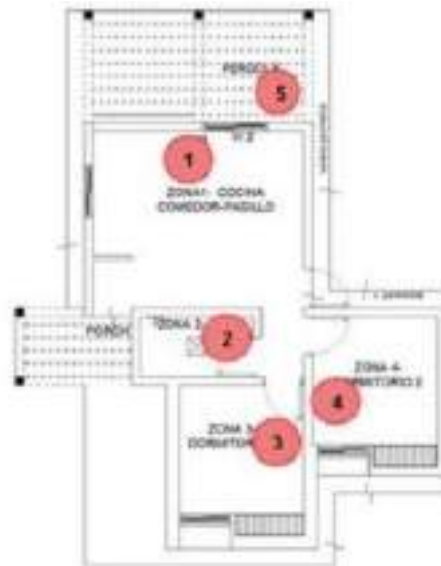
g) Cálculo del balance térmico: Se determinaron las pérdidas, ganancias de calor y los requerimientos de acondicionamiento artificial mediante el cálculo del balance térmico. Se utilizó el Programa Balance Térmico Invierno-verano para edificios sustentables (Esteves y Gelardi, 2003).

h) Simulación energética: Paralelamente al monitoreo se utilizó el programa SIMEDIF 2.0 (Versión Beta) para estimar la potencia necesaria de calefacción y refrigeración que permitiera alcanzar temperaturas de 20°C en invierno y de 26°C en verano. (Flores Larsen y Lesino 2001). Para verano se tomaron las temperaturas registradas el 26/12/2021 en el monitoreo y para invierno las registradas 05/07/2021 según S.M.N.

i) Resultados, conclusiones y propuestas: Se evaluaron comparativamente, el antes y el después de la propuesta, de manera de poder visualizar y justificar las ventajas de una intervención a bajo costo para los adjudicatarios.



(a)



(b)

Figura 7 Hobos, (a) Acondicionamiento, (b) ubicación en planta

## RESULTADOS

### Monitoreo

Se muestran los resultados obtenidos, para el periodo comprendido entre el 20/12 al 30/12. Las temperaturas máximas y mínimas registradas en el periodo son de 40°C y 21°C respectivamente. Para estas condiciones del ambiente exterior las temperaturas interiores se manejaron por arriba de los 26°C tomado como límite de la zona de confort. El 25/12 fue el día más riguroso de esta serie de datos con una temperatura máxima de 40°C y una mínima de 23°C (amplitud térmica de 21°C). El día menos cálido se produjo el 23/12 con una máxima de 30°C y una mínima de 21°C, las temperaturas interiores se mantienen por fuera zona de confort.

Se registra una fluctuación en las temperaturas interiores que responde al cambio de la temperatura exterior, presentando un desfase temporal de aproximadamente 4 a 5 horas. El comportamiento térmico de las zonas 3 y 4 resulta muy similar, exceptuando un momento puntual a las 18 horas, cuando la temperatura de la zona 4 supera en aproximadamente 2 °C a la zona 3. En términos generales, las curvas térmicas de todos los espacios presentan una evolución semejante (véase Figura 8). Además, se evidencia un claro sobrecalentamiento en los ambientes estudiados.

### Comportamiento termofísico de las envolventes

El comportamiento termofísico se evalúa conforme a lo establecido en la Norma IRAM 11.605 (1996). Para la condición invernal, el valor de conductancia térmica admisible ( $K_{adm}$ ) resulta de 0,87 W/m²K en muros y 0,72 W/m²K en techos. En la condición estival, los valores obtenidos son 1,10 W/m²K para muros y 0,45 W/m²K para techos, tal como se presenta en la Tabla 1.

Se tienen en cuenta los resultados del análisis de coeficientes de transmitancia térmica  $K$ , donde el cerramiento exterior superior verifica para los valores establecidos por la norma, no así en el caso de los cerramientos verticales. Habiendo advertido esta situación se propone la rehabilitación de la envolvente vertical, en la cual solo se procederá a la mejora del muro 2, por tener mayor superficie expuesta. El muro 1 no sufrirá modificaciones, fundamentado por el nivel de su terminación. En relación con el muro 2, la intervención será desde el exterior de forma tal que el aumento de espesor del cerramiento no modifique la superficie útil interior, ya que las mismas en este tipo de viviendas de interés social son mínimas (Figura 9a y 9b).



Con la intervención, el comportamiento del muro 2 mejora considerablemente en un 75% (Tabla 2).

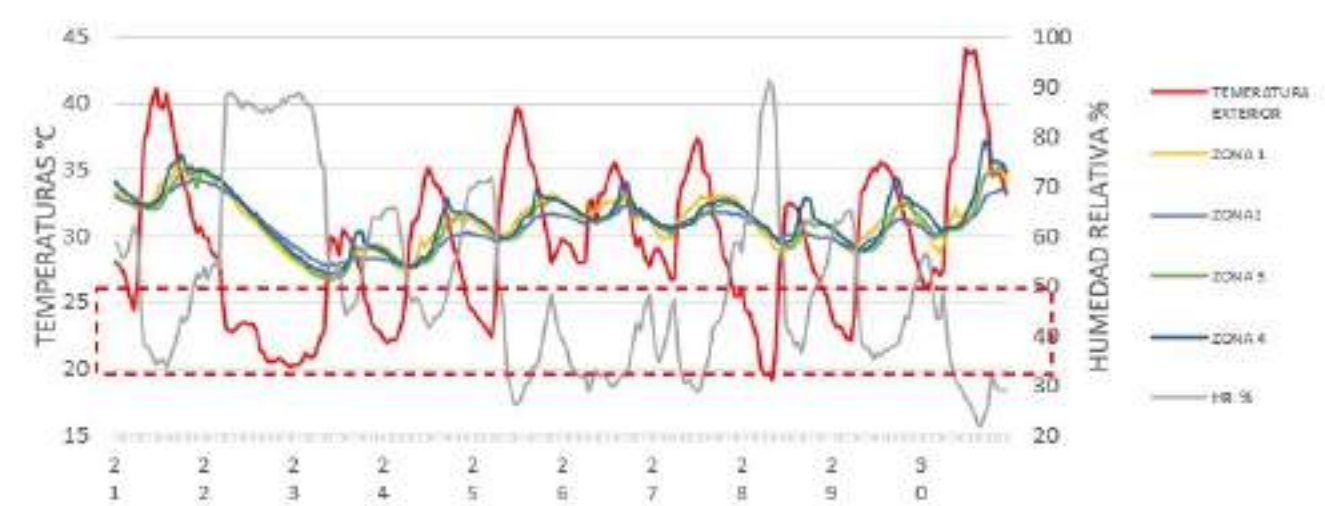


Figura 8: Curvas de temperaturas resultado del monitoreo

Tabla 1: Resultados para verificación con Normas IRAM

|        | K cálculo | K MAX INVIERNO NIVEL B | ADM | K MAX VERANO NIVEL B | ADM | NORMA IRAM 11625 k | NORMA IRAM 11625 CONDENSACIÓN SUPERFICIAL | NORMA IRAM 11625 CONDENSACIÓN INTERSTICIAL |
|--------|-----------|------------------------|-----|----------------------|-----|--------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------|
| MURO 1 | 1,92      | 0,91                   |     | 1,10                 |     | NO VERIFICA        | NO CONDENSA                               | NO CONDENSA                                |
| MURO2  | 1.73      | 0,80                   |     | 1,10                 |     | NO VERIFICA        | NO CONDENSA                               | NO CONDENSA                                |
| TECHO  | 0,248     | 0,67                   |     | 0,45                 |     | VERIFICA           | NO CONDENSA                               | NO CONDESA                                 |

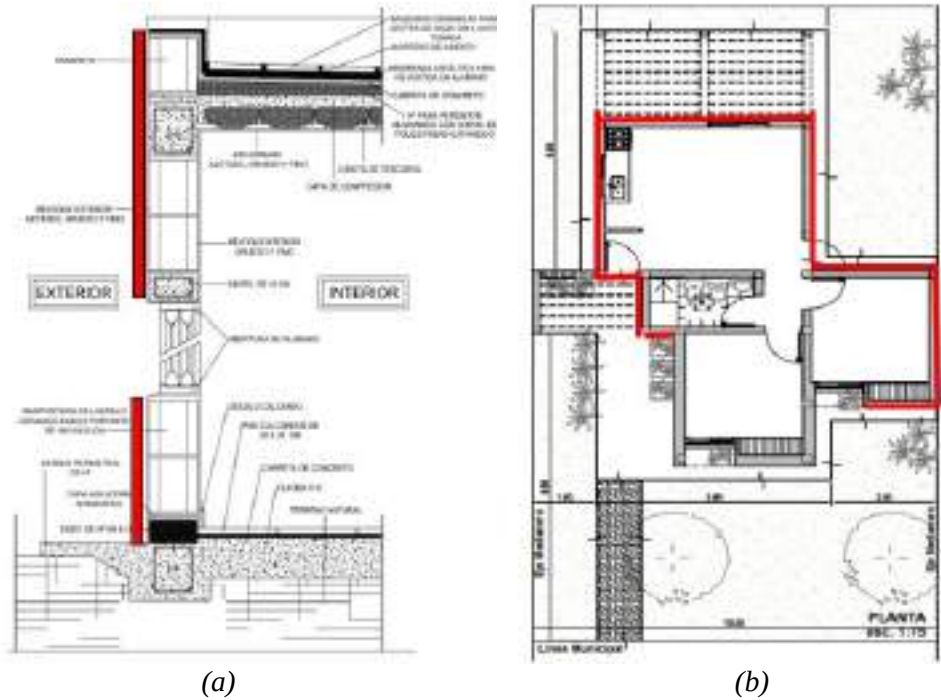


Figura 9: Rehabilitación de la envolvente en muro 2, (a) en corte, (b)en planta

Tabla 2: Mejoras producidas por las mejoras

| ELEMENTO | K SIN MEJORAS | K CON MEJORAS | K CON MEJORAS K MAX INVIERNO (CLASE B) | K MAX. VERANO (CLASE B) |
|----------|---------------|---------------|----------------------------------------|-------------------------|
| MURO 1   | 1.92          | --            | 0.91                                   | 1.1                     |
| MURO 2   | 1.73          | 0.42          | 0.8                                    | 1.1                     |
| TECHO    | 0.25          | 0.25          | 0.67                                   | 0.45                    |
| PUERTAS  | 2.78          | --            | --                                     | --                      |
| VENTANAS | 4.8           | --            | --                                     | --                      |

### Requerimiento de acondicionamiento artificial para verano.

Para el análisis del periodo de verano se tomaron las temperaturas registradas durante el penúltimo día de monitoreo, el 26/12/2021, considerando que los primeros días de la simulación fueron necesarios para que todo el sistema alcanzara el estado estacionario. De este modo, los datos analizados reflejan un comportamiento estabilizado de la vivienda frente a las condiciones climáticas más críticas del período. Como resultado, en la situación sin acondicionamiento térmico, las temperaturas interiores promedio oscilan entre 27°C y 35°C, y con intervención entre los 25°C y 30°C. En tanto, en el exterior se registra un rango promedio de temperaturas que va de 25°C a 37°C (Figura 10).

Este comportamiento nos lleva a la necesidad de cierta carga de refrigeración para mantener el interior con una temperatura predefinida de 26°C. En función de los resultados obtenidos podemos observar que se produce una disminución de la carga de refrigeración del 35% (Figura 11).

### Requerimiento de acondicionamiento artificial para invierno

Para determinar la carga de calefacción para el invierno, se consideran las temperaturas exteriores del día 05/07/2021, con valores promedios de 4°C y máxima de 20°C. La temperatura interior predefinida se ubica en 20°C. En la situación sin intervención las temperaturas interiores promedio oscilan entre 9°C y 15°C, mientras que, con intervención, entre los 13°C y 18°C. (Figura 12). En consecuencia, se produce la disminución de la carga térmica del 37% aproximadamente (Figura 13).

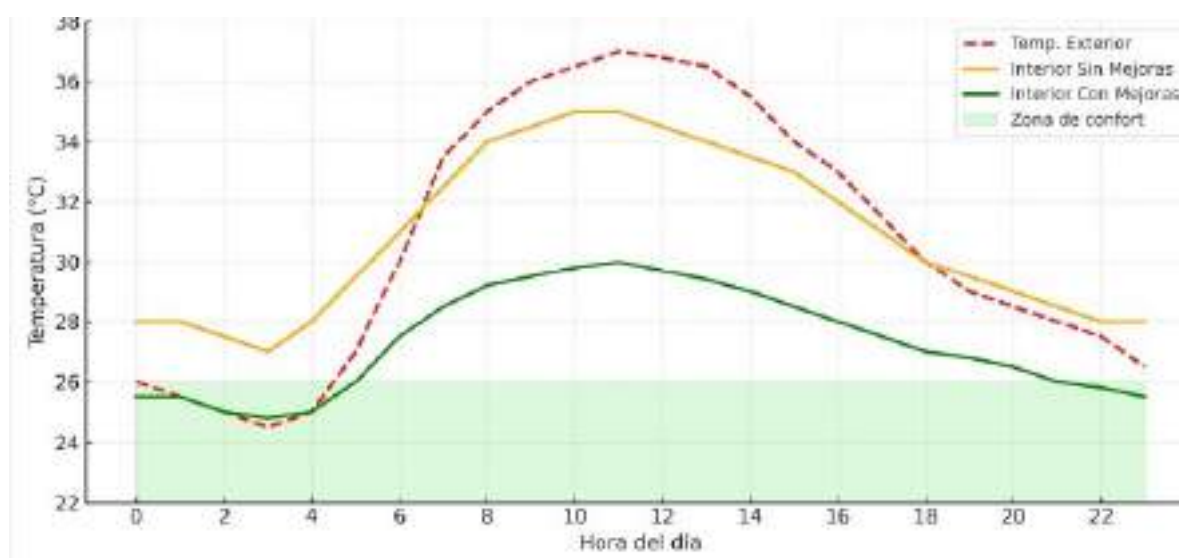


Figura 10: Comportamiento térmico penúltimo día monitoreado.





Figura 11: Carga de refrigeración - comparación.

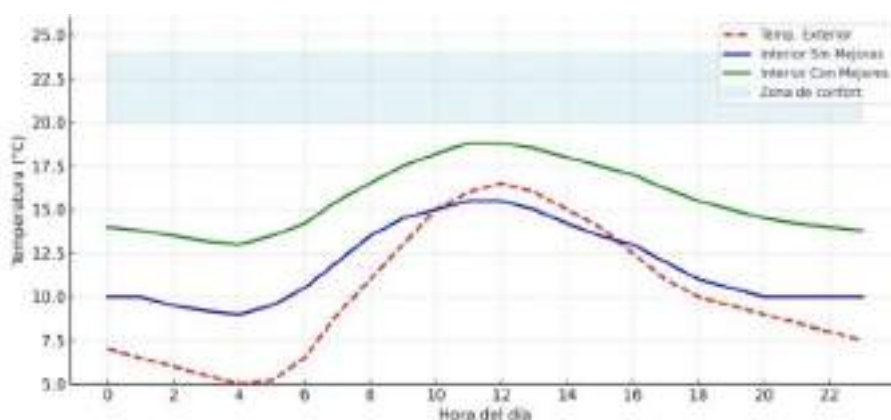


Figura 12: Comportamiento térmico día típico de invierno



Figura 53: Carga de calefacción - comparación

### Costos de la modificación

Se propone la rehabilitación del muro 2, en aquellos lugares que conecta con el exterior (Figura 9a y 9b). Para ello, se incorpora una aislación de lana de vidrio tipo ISOVER Rolac Plata con un espesor de 50 mm (0,05 m), la cual se protege mediante una mampostería de ladrillo cerámico hueco de 0,08 m, revestida exteriormente con revoque grueso y fino de 0,02 m de espesor. Se realiza el cómputo y presupuesto de materiales correspondientes, considerando valores actualizados a julio de 2025; en cuanto a la mano de obra, se estima que representa un 60% del costo total del ítem, como se detalla en la Tabla 3.

*Tabla 3: Cómputo y presupuesto de materiales*

|   | Items                             | Unidad         | Cantidad | Costo unitario (\$) | Costo parcial (\$) | Costo total (\$) |
|---|-----------------------------------|----------------|----------|---------------------|--------------------|------------------|
| 1 | Pegamento sobre revoque existente | m <sup>2</sup> | 74.05    | 5176.33             | 383307.38          |                  |
| 2 | Lana de vidrio + estructura       | m <sup>2</sup> | 74.05    | 17178.09            | 1272037.77         |                  |
| 3 | Tabique de ladrillo hueco 0,10 m  | m <sup>2</sup> | 74.05    | 20613.71            | 1526445.32         |                  |
| 4 | Revoque exterior                  | m <sup>2</sup> | 74.05    | 18323.30            | 1356840.29         |                  |
| 5 | Pintura látex exterior            | m <sup>2</sup> | 74.05    | 6871.24             | 508815.11          |                  |
|   |                                   |                |          |                     | TOTAL (\$)         | 5,047,445.87     |

Como se puede observar, el costo total en materiales (I.P.V., 2025) es de cinco millones, cuarenta y siete mil, cuatrocientos cuarenta y cinco con 87/100 cvos, (\$5.047.445.87) a lo que se le adiciona un 40% en concepto de mano de obra, llegando a la suma total de pesos siete millones, setecientos sesenta y cinco mil, trecentos uno con 34/100 cvos (\$7.765.301,34). En consecuencia, puesto que el valor de una vivienda ejecutada por el Instituto alcanza la suma de pesos cien millones con 00/100 cvos (\$100.000.000,00), sin contemplar el terreno, es que el costo total de la modificación implicaría un incremento de aproximadamente un 7.76%. Siendo el valor del terreno de \$20.000.000, resulta que el valor total de una unidad habitacional ejecutada por el instituto es de pesos ciento veintisiete millones, setecientos sesenta y cinco mil, trescientos uno con 34/100 cvos (\$127.765.301,34). El mismo es amortizado por los adjudicatarios en 300 cuotas consecutivas y mensuales de pesos cuatrocientos veinticinco mil, ochocientos ochenta y cuatro con 34/100 cvos (\$425.884,34). Teniendo en cuenta que en la actualidad existen plazos de amortización mayores a 300 cuotas, esto es, 480 y 560 cuotas, que el organismo ha aprobado dado la condición de ingresos de la demanda, resulta que la diferencia entre las opciones propuestas es de \$250.000 vs. \$266.177,71 (480 cuotas) y de \$214.285,7 vs \$228.152,32 (560 cuotas).

## CONCLUSIONES

El trabajo evidencia que la vivienda social analizada presenta un desempeño térmico deficiente debido a que los criterios de diseño y construcción estatales no consideraron adecuadamente el contexto climático ni las características constructivas locales, reflejando una desconexión histórica que persiste desde auditorías previas. El monitoreo higrotérmico mostró sobrecalentamiento en verano y bajas temperaturas en invierno, con temperaturas por fuera de la zona de confort (22°C–27°C). En lo específico, el análisis termofísico reveló que los cerramientos verticales, especialmente el muro 2, no cumplen con los valores máximos de transmitancia térmica para nivel de confort B, mientras que el techo sí. La simulación de la intervención propuesta permitió reducir un 35% la energía requerida para refrigerar y un 37% para calefaccionar. El costo total de la mejora (\$7.765.301,34) implica un incremento del 7,76% sobre el costo de ejecución de la vivienda, resultando en un impacto económico poco significativo en la cuota mensual para los adjudicatarios, lo que demuestra que la rehabilitación es viable tanto para el Estado como para los usuarios.

En conclusión, integrar criterios bioclimáticos y eficiencia energética en el diseño y rehabilitación de viviendas sociales permite mejorar el confort térmico, reducir el consumo energético y minimizar los costos operativos, corrigiendo la desconexión histórica entre los criterios constructivos estatales y las condiciones climáticas locales, y estableciendo un modelo sostenible para futuras políticas habitacionales.

## REFERENCIAS

Di Bernardo, A., Filippín, M. C., y Pipa, D. (2011). Monitoreo y simulación térmica energética de verano de una vivienda en condiciones reales de uso en clima templado cálido. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 15.

- Díaz, C. J., y Czajkowski, J. D. (2006). Auditorías energéticas en viviendas de interés social en Río Grande, Tierra del fuego. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 10.
- Martínez, C. F. (2005). Comportamiento térmico-energético de envolvente de vivienda en SM de Tucumán en relación con la adecuación climática. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 9.
- Instituto Provincial de la Vivienda de Catamarca (2025). Informe Auditoria 2025.
- Mercado, M. V., Filippin, M. C., y Barea Paci, G. J. (2021). Influencia de la envolvente con bajos niveles de transmitancia en el consumo energético de viviendas en climas cálidos.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2023). Reglamento Operativo de Programa AR-G1002: Eficiencia Energética y Energías Renovables en la Vivienda Social Argentina. Recuperado de <https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/if-2023-50510885-apn-dgpypsyemdyh.pdf>
- Ministerio del Interior, Obras Públicas y Vivienda (2019). Presidencia de la Nación. Manual de Vivienda Sustentable.
- Molas, L., García, V., Corre, E. (2008) Auditoria Térmica y Variables del Confort. Caso de una Vivienda del Instituto Provincial de la Vivienda (IPV), Ciudad de Catamarca. Grupo de Energía Renovable Catamarca (GERCA) Facultad de Ciencias Agrarias – Universidad Nacional de Catamarca.
- Norma IRAM 11601 (1996) Acondicionamiento térmico de edificios. Propiedades térmicas de los componentes y elementos de construcción en régimen estacionario. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales, Buenos Aires, Argentina.
- Norma IRAM 11603 (1996). Acondicionamiento térmico de edificios. Clasificación Bioambiental de la República Argentina. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales. Buenos Aires, Argentina.
- Norma IRAM 11604 (1990). Aislamiento térmico de edificios. Verificación de sus condiciones higrotérmicas. Ahorro de energía en calefacción. Coeficiente volumétrico G de pérdidas de calor. Cálculo y valores límites. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales, Buenos Aires, Argentina.
- Norma IRAM 11605 (1996) Acondicionamiento térmico de edificios. Condiciones de habitabilidad en edificios. Valores máximos de transmitancia térmica en cerramientos opacos. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales, Buenos Aires, Argentina.

## **MONITORING, REFUNCTIONALIZATION, AND ENERGY SIMULATION OF A SOCIAL HOUSING PROJECT IN CATAMARCA**

**ABSTRACT** In Catamarca, the Instituto Provincial de la Vivienda, created by Law No. 4084 (1984), is one of the agencies responsible for addressing the housing deficit. Between 1979 and 2024, it granted 25,791 homes throughout the province, 62% of which were concentrated in the capital. The general objective of the state is to resolve the housing shortage, focusing on economic resources and neglecting criteria that adequately respond to climatic conditions and the real thermal comfort needs of those who live there. This paper presents the results of hygrothermal monitoring, whose measurements showed that the spaces were overheated, falling outside the comfort zone (22°C and 27°C). The thermophysical characteristics of the materials are analyzed, and low-cost thermal rehabilitation of the building envelope is proposed. The simulations carried out show a 35% reduction in the auxiliary energy required for cooling and a 37% reduction for heating. The study highlights the need to consider criteria that adequately respond to climatic conditions and the real thermal comfort needs of the inhabitants, in order to reduce the economic costs incurred in achieving this.

**Keywords:** housing deficit, thermal comfort, thermal rehabilitation.

## CARACTERÍSTICAS ACÚSTICAS DE PANELES DISEÑADOS A PARTIR DE TABLEROS AGLOMERADOS DE BAGAZO CERVECERO

**Fernando Bacigalupo<sup>1</sup>, Nilda Vechiatti<sup>2</sup>, Federico Iasi<sup>2</sup>, Germán Galarza<sup>2</sup>,  
Lucia Rossi<sup>3</sup>, Emiliano Ciannamea<sup>3</sup>, Pablo Stefani<sup>3</sup>, María Andrea Farina<sup>1,4</sup>**

<sup>1</sup> Programa: Sistemas y espacialidad en el arte sonoro (SEAS). Escuela Universitaria de Artes.  
Universidad Nacional de Quilmes

<sup>2</sup> Laboratorio de Acústica y Luminotecnia, Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de  
Buenos Aires

<sup>3</sup> Instituto de Investigaciones en Ciencia y Tecnología de Materiales (INTEMA), Consejo Nacional de  
Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Universidad Nacional de Mar del Plata (UNMdP)

<sup>4</sup> Instituto de Investigación en Producción y Enseñanza del Arte Argentino y Latinoamericano  
(IPEAL). Facultad de Artes. Universidad Nacional de La Plata

**RESUMEN:** Este trabajo evalúa las propiedades acústicas de fonoabsorbentes microperforados fabricados a partir de tableros sostenibles elaborados con el residuo sólido de la producción de cerveza (bagazo cervecero). La temática se enmarca en la actual demanda global de estrategias de economía circular que promuevan la valorización de los residuos agroalimentarios mediante su reinserción como materias primas en nuevos procesos productivos. En particular, se aborda el aprovechamiento del bagazo, mediante su transformación en tableros aglomerados aptos para aplicaciones acústicas. Estos tableros, utilizados como base en el diseño de absorbentes, ofrecen una alternativa funcional y ambientalmente favorable frente a paneles comerciales convencionales. Se presentan algunos modelos posibles y los resultados de coeficiente de absorción sonora medidos en tubo de impedancia basado en la función de transferencia. Los resultados obtenidos muestran que estos materiales, con un 88% de contenido de componentes biobasados, presentan un alto potencial para aplicaciones de control acústico.

**Palabras clave:** fonoabsorbentes, biobasado, economía circular.

### INTRODUCCIÓN

El uso de materiales de construcción tradicionales genera un impacto ambiental considerable, asociado al elevado consumo de recursos naturales y a las emisiones derivadas de sus procesos de producción (Almusaed *et al.* 2024). Frente a esta problemática, se plantea la necesidad de innovar en el desarrollo de materiales constructivos sostenibles, promoviendo la extensión de la vida útil de los recursos a través de su reincorporación en nuevas cadenas productivas. Por ejemplo, los residuos de construcción y demolición representan entre el 13% y el 40% del total de los residuos sólidos urbanos dependiendo del país, y tienen un alto potencial como fuente alternativa en el diseño de nuevos materiales. En este contexto, el nuevo paradigma de la construcción sostenible es el desarrollo de materiales y sistemas constructivos con bajo impacto ambiental, que presenten propiedades específicas, como resistencia, rigidez, durabilidad y capacidad como aislante térmico y/o acústico, diseñadas en función de su aplicación (Vechiatti *et al.*, 2023; Ferrandez-Villena *et al.*, 2022).

Los paneles o tableros de madera aglomerada pueden ser utilizados como materiales con buena prestación acústica si se trabajan con un diseño de manera correcta. Se producen por prensado en caliente, combinando partículas de madera con adhesivos poliméricos (Ciannamea *et al.*, 2017). Según datos de la "Food and Agriculture Organization" (FAO) la producción mundial de tableros aglomerados de madera fue de 117 millones de m<sup>3</sup> en el año 2023 con un crecimiento de aproximadamente 40% en



los últimos 10 años (<https://www.fao.org/faostat/en/#data/FO>). Debido al aumento sostenido en la demanda de madera, se han impulsado estrategias sostenibles orientadas al diseño y cultivo de nuevos clones de especies de rápido crecimiento (Bulman *et al.*, 2023), así como el uso de materiales lignocelulósicos alternativos, que permitan reducir la presión sobre los recursos forestales (Chalapud *et al.*, 2020). En particular, como sustitutos de la madera, se han propuesto nuevos paneles aglomerados elaborados a partir de tallos de arroz (Yang *et al.*, 2003), fibras de coco (Zulkifly *et al.*, 2009), bambú (Karlinasari *et al.*, 2012), yute (Fatima *et al.*, 2011), entre otras biomásas (Ferrandez-Villena *et al.*, 2022).

El residuo sólido generado durante la producción de cerveza, conocido como bagazo cervecero, se presenta como un candidato atractivo para sustituir parcialmente a la madera en la fabricación de tableros aglomerados. A nivel global, la producción anual de cerveza alcanza los 190 millones de toneladas ([www.fao.org/faostat](https://www.fao.org/faostat)), generándose bagazo a una tasa aproximada de 20 kg por cada 100 litros elaborados (Barbu *et al.*, 2021). Este residuo se clasifica como un material lignocelulósico y está compuesto por hemicelulosas (19–40%), celulosa (10–25%), lignina (11–27%), proteínas (14–30%) y polisacáridos como el almidón (Rossi *et al.*, 2024). El alto contenido de humedad que adquiere posterior al proceso de maceración (80%) y su composición química (principalmente los carbohidratos y proteínas) lo hacen vulnerable al deterioro microbiano y químico, causado por hongos, levaduras y bacterias aeróbicas (Robertson *et al.*, 2010). Debido a estas características, su transporte se ve limitado a distancias reducidas desde el lugar de producción, lo que plantea importantes desafíos ambientales, logísticos y económicos. Actualmente, el bagazo cervecero se descarta o se utiliza principalmente como alimento para ganado porcino (Barbu *et al.*, 2021). La fabricación de tableros aglomerados sostenibles basados en bagazo cervecero, permitiría la reutilización a una alta escala del residuo, reduciría el impacto ambiental que genera el sobre consumo de la madera cultivada y, debido a que se obtiene directamente en forma de partículas, evitaría el consumo de energía asociado a los procesos de chipeado y molienda (Rossi *et al.*, 2024). En el ámbito acústico, los paneles de alta densidad de bagazo cervecero podrían sustituir a los tableros aglomerados tradicionales de madera cultivada comúnmente utilizados en el diseño de absorbentes acústicos microperforados. Estos dispositivos, están concebidos para atenuar frecuencias específicas, y son especialmente útiles en entornos donde se requiere controlar bandas de frecuencia determinadas.

El objetivo del presente trabajo es analizar las propiedades acústicas de fonoabsorbentes microperforados desarrollados a partir de paneles sostenibles elaborados con bagazo cervecero.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

### ***Materiales y acondicionamiento***

Se utilizó bagazo de malta Pilsner provisto por una cervecería de la ciudad de Mar del Plata (Argentina). El bagazo, tal como viene de la fábrica, se secó hasta alcanzar un contenido de humedad del 5% en peso en una estufa con circulación forzada (Memmert, Francia) a  $(80 \pm 2)^\circ\text{C}$  y luego se almacenó en recipientes herméticos a temperatura ambiente hasta su uso.

Como aglomerante se utilizó un adhesivo fenólico líquido (viscosidad 200 Pa·s a  $25^\circ\text{C}$ ) con un contenido de sólidos del 54% para uso en ambiente exterior, provisto por Industria Química Ltda. (Paraná, Brasil).

### ***Producción de los tableros aglomerados***

Se obtuvieron tableros aglomerados de manera similar a lo informado por Rossi *et al.* (2024), con una densidad y espesor objetivo de  $1000\text{ kg/m}^3$  y 5 mm, respectivamente. En todas las formulaciones se utilizó un contenido del 12% en base seca del adhesivo fenólico. El bagazo se mezcló con el adhesivo durante 10 minutos a temperatura ambiente en un mezclador orbital (Silcook, China). La mezcla resultante fue prensada en caliente (prensa E.M.S., Argentina) utilizando un molde de acero de 250 mm x 250 mm x 5 mm. Se obtuvieron tableros rígidos con la densidad y el espesor deseados aplicando una

presión de  $(2,1 \pm 0,1)$  MPa a 150 °C durante 20 minutos. Se prepararon un total de 8 tableros para su evaluación.

### ***Caracterización mecánica y estabilidad al agua de los tableros***

Los tableros aglomerados fueron acondicionados en una cámara con una humedad relativa del 65% y una temperatura de 20 °C durante 7 días antes de los ensayos. El desempeño de los tableros obtenidos se evaluó siguiendo los procedimientos estándar establecidos en la norma ASTM D 1037–93. Las propiedades mecánicas se determinaron utilizando una máquina de ensayo universal INSTRON-EMIC 2350 (Brasil). Las propiedades a la flexión, como el módulo de rotura (MOR) y el módulo de elasticidad (MOE), se evaluaron en probetas rectangulares de 50 mm × 200 mm × 5 mm, empleando una velocidad de desplazamiento del cabezal de 2,9 mm/min y una luz entre apoyos de 130 mm. La resistencia interna (RI) se midió utilizando muestras de 50 mm × 50 mm × 5 mm, con una velocidad de desplazamiento del cabezal de 1,33 mm/min. Adicionalmente, se extrajeron muestras de 50 mm × 50 mm × 5 mm de los especímenes sometidos al ensayo de flexión para evaluar el contenido de humedad de equilibrio (CHE), el hinchamiento (TS) y absorción (WA) por inmersión en agua a 2 h y 24 h. Las mediciones de ganancia de peso y espesor se realizaron inmediatamente después de cada inmersión. Se evaluó un mínimo de 10 muestras por cada propiedad medida.

### ***Diseño de los paneles acústicos***

En el diseño acústico de las muestras a ensayar se consideraron los aspectos que definen un fonoabsorbente microperforado: la cantidad, la distribución y la geometría de las perforaciones. Para un funcionamiento óptimo como resonador se tomó en cuenta la relación entre el espesor del tablero (limitado a 5 mm) y el diámetro de los agujeros. Otro factor que se estudió fue el índice de transparencia del resonador basado en la cantidad de perforaciones.

A partir de los tableros aglomerados de bagazo cervecero de 5 mm de espesor promedio, se confeccionaron muestras circulares de 99 y 29 mm de diámetro a las que se les practicaron diferentes configuraciones de perforación utilizando un equipo de control numérico por computadora (CNC):

- Muestra 1: Diámetro agujeros: 3 mm – Separación entre ejes de agujeros: 12 mm
- Muestra 2: Diámetro agujeros: 2,5 mm – Separación entre ejes de agujeros: 16 mm
- Muestra 3: Diámetro agujeros: 2 mm – Separación entre ejes de agujeros: 14 mm
- Muestra 4: Diámetro agujeros: 6 mm – Separación entre ejes de agujeros: 9 mm

En la Figura 1 pueden apreciarse las muestras ensayadas. En la Figura 2 se muestra la lana rústica de oveja con la que rellenó la cavidad de los resonadores en algunas de las configuraciones. Previo a los ensayos las muestras fueron estabilizadas nuevamente en una cámara con 65% de humedad relativa a 20 °C durante 7 días.



*Figura 1: De izquierda a derecha, muestras 1 a 4 ensayadas*





*Figura 2: Lana rústica de oveja (35 mm de espesor)*

### ***Ensayos de absorción sonora***

En el Laboratorio de Acústica y Luminotécnica de la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires se realizó la medición del coeficiente de absorción sonora para incidencia normal del sonido de las muestras empleando un tubo de impedancia basado en la función de transferencia.

#### ***Instrumental e instalaciones utilizadas***

- Tubo de impedancia con software de procesamiento de señal basado en la función de transferencia (TF), marca LAL-CIC, modelo GAG001.
- Tubo de impedancia basado en la relación de onda estacionaria (SWR), marca Brüel & Kjaer, modelo 4002.
- Oscilador, marca Brüel & Kjaer, modelo 1022.
- Espectrómetro analógico, marca Brüel & Kjaer, modelo 2112
- Frecuencímetro, marca Beckman Industrial, modelo FC 130

Ambos tubos de impedancia, SWR y TF, incluyen dos tubos: “grande” (diámetro interior: 100 mm) y “chico” (diámetro interior: 30 mm).

#### ***Metodología de las mediciones***

Para la realización de las mediciones con el tubo TF, también conocido como sistema de tubos de impedancia de dos micrófonos, se siguieron los lineamientos descritos en las normas:

ISO 10534-2 “Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes, Part 2: Transfer-function method”

ASTM E 1050 “Standard test method for impedance and absorption of acoustical materials using a tube, two microphones and a digital frequency analysis system”

Se midieron los coeficientes de absorción sonora para incidencia normal del sonido ( $\alpha_N$ ), generando ruido de banda ancha, en el rango de tercios de octava con frecuencias centrales comprendidas entre 100 Hz y 1 600 Hz. Se empleó el tubo grande, por lo que se utilizaron probetas de 99 mm de diámetro. En todos los casos, como se observa en la Figura 3, las probetas estuvieron colocadas en el borde externo del porta-muestras, dando lugar a la formación de una cámara posterior de 50 mm de profundidad detrás de cada placa ensayada.



*Figura 3: Porta-muestras*

Las muestras se evaluaron en dos condiciones:

- VACÍA: cámara posterior vacía, sólo con aire.
- CON LANA: cámara posterior con aire y con lana rústica de oveja, de 35 mm de espesor, colocada en la parte posterior de la cavidad (apoyada contra la superficie metálica del porta- muestras). La lana rústica de oveja es un material fibroso, fonoabsorbente (Vechiatti *et al.*, 2023).

Las mediciones realizadas con el tubo TF fueron validadas con mediciones realizadas en el tubo SWR, siguiendo los lineamientos establecidos en las normas:

ISO 10534-1:1996 - Acoustics - Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes. Part 1: Method using standing wave ratio (Last review: 2022).

ASTM C384-04 (Reapproved 2016): Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials by Impedance Tube Method.

Los resultados de las propiedades acústicas fueron obtenidos como el promedio sobre 5 probetas por configuración geométrica (muestra 1 a 4) con lana y sin lana.

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### ***Propiedades mecánicas y de inmersión en agua de los tableros***

Se obtuvieron tableros aglomerados sostenibles con un contenido biobasado del 88% a partir de bagazo de cerveza. En las Tablas 1 y 2 se resumen sus propiedades mecánicas y de estabilidad al agua. Se alcanzaron valores de resistencia (MOR) y rigidez (MOE) a la flexión, y especialmente de resistencia interna (RI), que se encuentran dentro del rango de los estándares establecidos para tableros aglomerados de madera convencionales o basados en otros sustratos (Ciannamea *et al.*, 2017; Hunt *et al.*, 2018). Asimismo, los valores de absorción de agua (WA) e hinchamiento del espesor (TS) resultaron notablemente bajos, lo que los hace adecuados para aplicaciones en ambiente exterior con mojado ocasional. Este comportamiento puede atribuirse a las características químicas y reológicas del adhesivo fenólico utilizado, que promueven una interacción eficiente entre las partículas del sustrato lignocelulósico (Ayrilmis *et al.*, 2012; Ciannamea *et al.*, 2017). Los adhesivos fenólicos poseen la capacidad de mojar, distribuirse uniformemente y penetrar tanto en los lúmenes como en las paredes celulares del sustrato vegetal, lo que favorece una adhesión eficaz entre las partículas que conforman el tablero (Rossi *et al.*, 2024). El proceso de prensado en caliente, permite simultáneamente consolidar una red polimérica altamente entrecruzada (Pascault, 2013). La formación de una red polimérica insoluble mejora significativamente el desempeño de los tableros bajo exposición al agua además de su integridad mecánica.

*Tabla 1: Resultados de las propiedades mecánicas de los tableros: contenido de humedad de equilibrio (CHE), módulo de rotura (MOR), módulo de elasticidad (MOE) y resistencia interna (RI)*

| <b>CHE (%)</b> | <b>MOR (MPa)</b> | <b>MOE(GPa)</b> | <b>RI(MPa)</b> |
|----------------|------------------|-----------------|----------------|
| 8,3 ± 0,1      | 6,80 ± 0,64      | 0,94 ± 0,07     | 0,7 ± 0,05     |

*Tabla 2: Resultados de absorción (WA) e hinchamiento del espesor (TS) a 2 y 24 h de inmersión en agua*

| <b>WA 2h (%)</b> | <b>TS 2h (%)</b> | <b>WA 24 h (%)</b> | <b>TS 24 h (%)</b> |
|------------------|------------------|--------------------|--------------------|
| 15,1 ± 2,1       | 11,2 ± 1,90      | 33,8 ± 2,3         | 33,6 ± 2,9         |

### **Resultados acústicos**

Los valores del coeficiente de absorción para incidencia normal del sonido ( $\alpha_N$ , adimensional) obtenidos para la condición con cámara de aire de 50 mm (VACÍA), se presentan en la Tabla 3 y en la Figura 4.

Para la condición con cámara de aire de 15 mm + 35 mm de lana rústica de oveja (CON LANA) los valores del coeficiente de absorción para incidencia normal del sonido ( $\alpha_N$ , adimensional) obtenidos para esta condición se presentan en la Tabla 4 y en la Figura 5.

En la Tabla 5 y en las Figuras 6 a 9 se presentan en forma individual y comparativamente los valores del coeficiente  $\alpha_N$  obtenidos para los cuatro materiales (VACÍA vs. CON LANA). En la Figura 9, además se incluye la curva de absorción de la lana rústica de oveja medida en forma separada.

Los resultados obtenidos muestran que las diferentes configuraciones de perforación practicadas a los tableros de aglomerado de bagazo cervicero, montadas con cámara posterior, tanto vacía como con material fibroso, se comportan como fonoabsorbentes microperforados.

Variando la configuración del perforado (densidad, diámetro y separación entre centros de agujeros), se puede modificar la frecuencia en la que la absorción sonora es máxima y el ancho de banda en el que son efectivos, lo que permite hacer diseño de resonadores acústicos sintonizados a las condiciones de aplicación requeridas.

El agregado de material fibroso en el fondo de la cavidad posterior no modificó la frecuencia de máxima absorción, pero aumentó el coeficiente de absorción en casi todas las frecuencias y esto generó un aumento del ancho de banda. Este efecto fue menos notable en el tablero con las perforaciones de menor diámetro (2 mm, Muestra 3).

La Muestra 4, con perforaciones cuyo diámetro es mayor que el de las otras muestras y, especialmente con diámetro de agujero mayor que el espesor del material, muestra cómo a medida que el material tiene mayor superficie perforada tiende a ser prácticamente “transparente” en cuanto a ser atravesado por el sonido. En la Figura 9 se observa que esta muestra, con lana por detrás, copia por debajo de los 400 Hz, el comportamiento de la lana sola.

Tabla 3: Coeficiente  $\alpha_N$  - Cavity: 50 mm de aire (VACÍA)

| Frecuencia [Hz] | Muestra 1<br>$\phi = 3 \text{ mm}$<br>$d = 12 \text{ mm}$ | Muestra 2<br>$\phi = 2,5 \text{ mm}$<br>$d = 16 \text{ mm}$ | Muestra 3<br>$\phi = 2 \text{ mm}$<br>$d = 14 \text{ mm}$ | Muestra 4<br>$\phi = 6 \text{ mm}$<br>$d = 9 \text{ mm}$ |
|-----------------|-----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| 100             | 0,04                                                      | 0,04                                                        | 0,05                                                      | 0,04                                                     |
| 125             | 0,04                                                      | 0,04                                                        | 0,05                                                      | 0,04                                                     |
| 160             | 0,03                                                      | 0,04                                                        | 0,05                                                      | 0,03                                                     |
| 200             | 0,04                                                      | 0,07                                                        | 0,09                                                      | 0,04                                                     |
| 250             | 0,06                                                      | 0,15                                                        | 0,18                                                      | 0,04                                                     |
| 315             | 0,10                                                      | 0,29                                                        | 0,50                                                      | 0,04                                                     |
| 400             | 0,13                                                      | 0,58                                                        | 0,86                                                      | 0,04                                                     |
| 500             | 0,26                                                      | 0,82                                                        | 0,76                                                      | 0,05                                                     |
| 630             | 0,43                                                      | 0,56                                                        | 0,52                                                      | 0,06                                                     |
| 800             | 0,46                                                      | 0,27                                                        | 0,26                                                      | 0,07                                                     |
| 1000            | 0,30                                                      | 0,17                                                        | 0,15                                                      | 0,10                                                     |
| 1250            | 0,19                                                      | 0,13                                                        | 0,12                                                      | 0,14                                                     |
| 1600            | 0,17                                                      | 0,14                                                        | 0,13                                                      | 0,15                                                     |

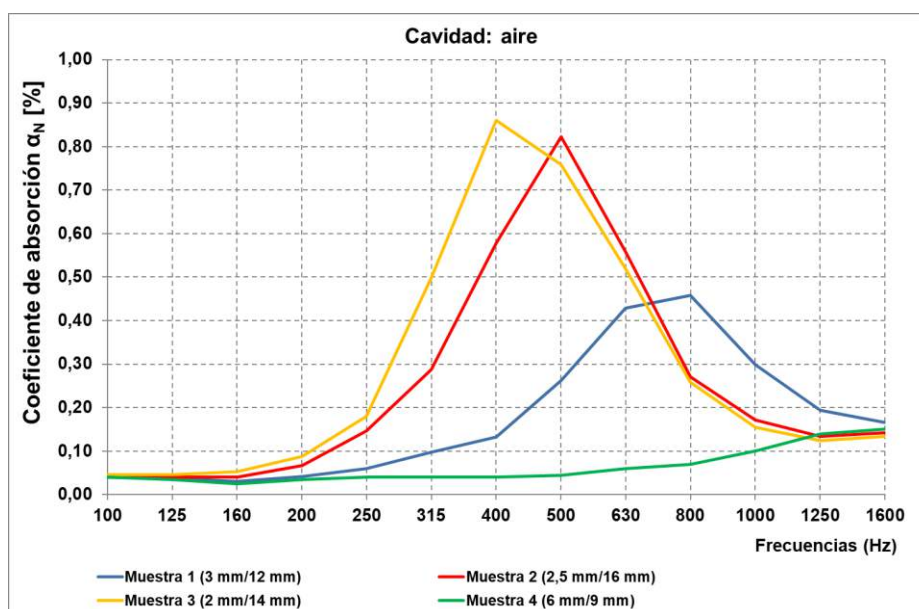


Figura 4: Coeficiente  $\alpha_N$  - Cavity de aire: 50 mm (VACÍA)

Tabla 4: Coeficiente  $\alpha_N$  - Cavity: 15 mm de aire + 35 mm de lana rústica de oveja (CON LANA)

| Frecuencia [Hz] | Muestra 1<br>$\phi = 3 \text{ mm}$<br>$d = 12 \text{ mm}$ | Muestra 2<br>$\phi = 2,5 \text{ mm}$<br>$d = 16 \text{ mm}$ | Muestra 3<br>$\phi = 2 \text{ mm}$<br>$d = 14 \text{ mm}$ | Muestra 4<br>$\phi = 6 \text{ mm}$<br>$d = 9 \text{ mm}$ |
|-----------------|-----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| 100             | 0,07                                                      | 0,07                                                        | 0,08                                                      | 0,07                                                     |
| 125             | 0,07                                                      | 0,08                                                        | 0,09                                                      | 0,07                                                     |
| 160             | 0,08                                                      | 0,10                                                        | 0,13                                                      | 0,07                                                     |
| 200             | 0,10                                                      | 0,16                                                        | 0,21                                                      | 0,09                                                     |
| 250             | 0,14                                                      | 0,26                                                        | 0,38                                                      | 0,11                                                     |
| 315             | 0,21                                                      | 0,40                                                        | 0,78                                                      | 0,13                                                     |
| 400             | 0,33                                                      | 0,78                                                        | 0,93                                                      | 0,15                                                     |
| 500             | 0,47                                                      | 0,92                                                        | 0,79                                                      | 0,18                                                     |
| 630             | 0,72                                                      | 0,62                                                        | 0,42                                                      | 0,22                                                     |
| 800             | 0,61                                                      | 0,35                                                        | 0,33                                                      | 0,28                                                     |
| 1000            | 0,37                                                      | 0,22                                                        | 0,17                                                      | 0,37                                                     |
| 1250            | 0,23                                                      | 0,16                                                        | 0,14                                                      | 0,42                                                     |
| 1600            | 0,19                                                      | 0,16                                                        | 0,14                                                      | 0,40                                                     |

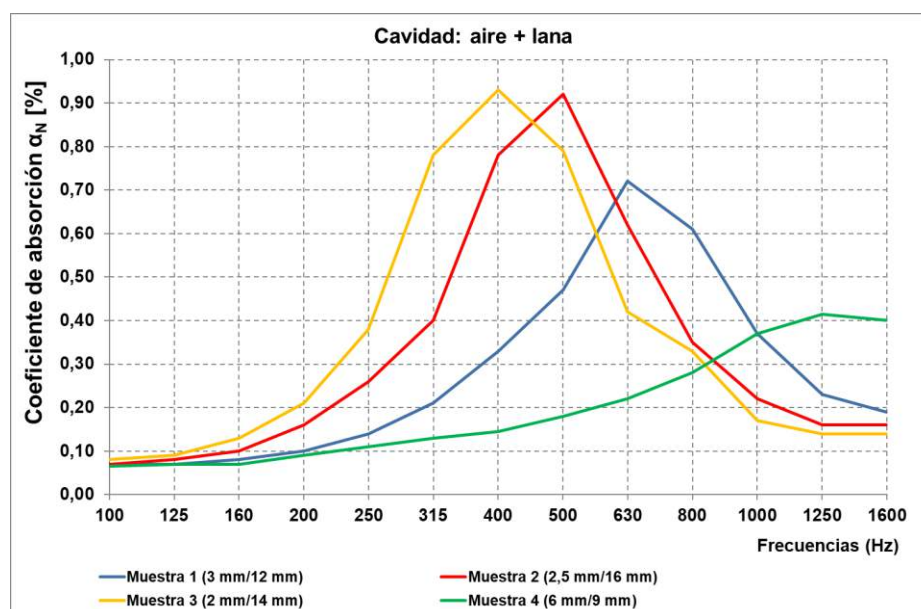
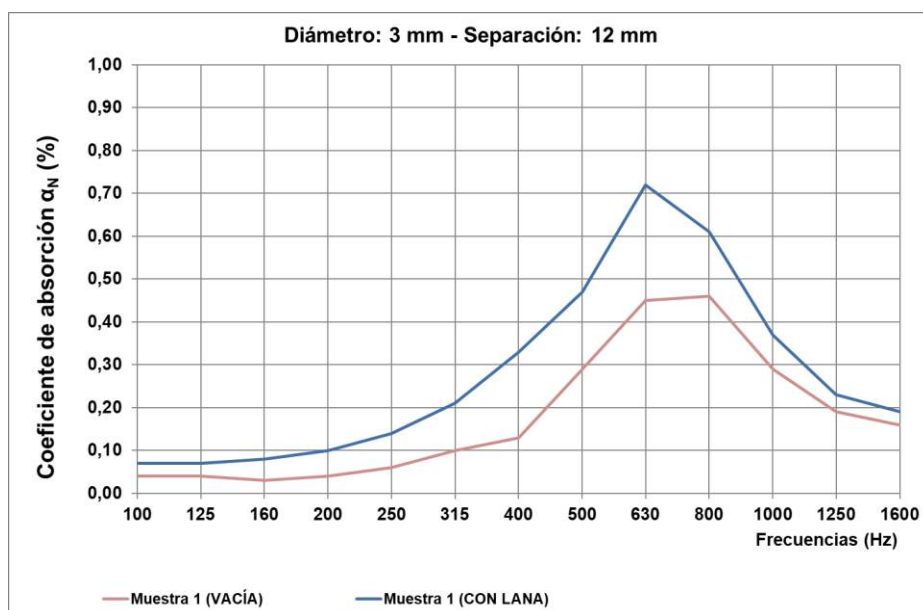


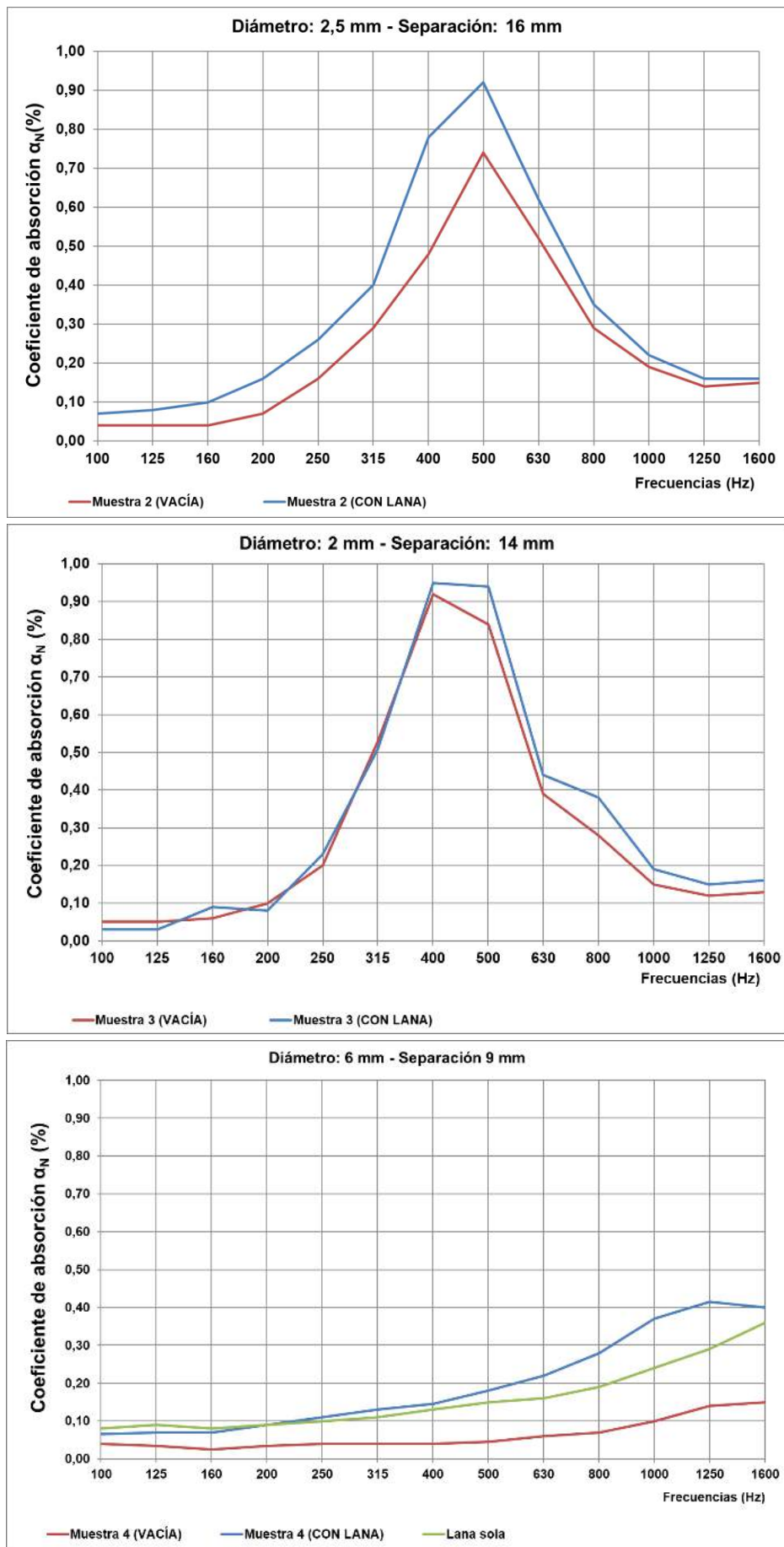
Figura 5: Coeficiente  $\alpha_N$  - Cavity: 15 mm de aire + 35 mm de lana rústica de oveja (CON LANA)

Tabla 5: Coeficiente  $\alpha_N$  - Comparación cavidad “vacía” vs. cavidad con “aire + lana”

| Frecuencia [Hz] | Muestra 1<br>$\phi$ : 3 mm<br>d: 12 mm |          | Muestra 2<br>$\phi$ : 2,5 mm<br>d: 16 mm |          | Muestra 3<br>$\phi$ : 2 mm<br>d: 14 mm |          | Muestra 4<br>$\phi$ : 6 mm<br>d: 9 mm |          |
|-----------------|----------------------------------------|----------|------------------------------------------|----------|----------------------------------------|----------|---------------------------------------|----------|
|                 | VACÍA                                  | CON LANA | VACÍA                                    | CON LANA | VACÍA                                  | CON LANA | VACÍA                                 | CON LANA |
| 100             | 0,04                                   | 0,07     | 0,04                                     | 0,07     | 0,05                                   | 0,08     | 0,04                                  | 0,07     |
| 125             | 0,04                                   | 0,07     | 0,04                                     | 0,08     | 0,05                                   | 0,09     | 0,04                                  | 0,07     |
| 160             | 0,03                                   | 0,08     | 0,04                                     | 0,10     | 0,06                                   | 0,13     | 0,03                                  | 0,07     |
| 200             | 0,04                                   | 0,10     | 0,07                                     | 0,16     | 0,10                                   | 0,21     | 0,04                                  | 0,09     |
| 250             | 0,06                                   | 0,14     | 0,16                                     | 0,26     | 0,20                                   | 0,38     | 0,04                                  | 0,11     |
| 315             | 0,10                                   | 0,21     | 0,29                                     | 0,40     | 0,53                                   | 0,78     | 0,04                                  | 0,13     |
| 400             | 0,13                                   | 0,33     | 0,48                                     | 0,78     | 0,92                                   | 0,93     | 0,04                                  | 0,15     |
| 500             | 0,29                                   | 0,47     | 0,74                                     | 0,92     | 0,84                                   | 0,79     | 0,05                                  | 0,18     |
| 630             | 0,45                                   | 0,72     | 0,52                                     | 0,62     | 0,39                                   | 0,42     | 0,06                                  | 0,22     |
| 800             | 0,46                                   | 0,61     | 0,29                                     | 0,35     | 0,28                                   | 0,33     | 0,07                                  | 0,28     |
| 1000            | 0,29                                   | 0,37     | 0,19                                     | 0,22     | 0,15                                   | 0,17     | 0,10                                  | 0,37     |
| 1250            | 0,19                                   | 0,23     | 0,14                                     | 0,16     | 0,12                                   | 0,14     | 0,14                                  | 0,42     |
| 1600            | 0,16                                   | 0,19     | 0,15                                     | 0,16     | 0,13                                   | 0,14     | 0,15                                  | 0,40     |







Figuras 6 a 9: Comparación “cámara vacía” vs. “cámara con lana” para las muestras 1 a 4

## CONCLUSIONES

Se diseñaron fonoabsorbentes a partir de paneles con alto contenido biobasado, utilizando como materia prima el residuo sólido de la producción de cerveza (bagazo).

Las propiedades a la flexión y su alta resistencia al agua los hace adecuados para aplicaciones en ambiente exterior con mojado ocasional.

Los ensayos normalizados que se llevaron a cabo en condiciones de laboratorio han permitido caracterizar las diferentes muestras, montadas con cámara posterior, tanto vacía como con material fibroso y determinar que se comportan como fonoabsorbentes microperforados. En las Muestras 1 a 3 se pudo observar la frecuencia absorción sonora máxima y el ancho de banda en el que son efectivos. El agregado de material fibroso en la cavidad posterior aumentó el coeficiente de absorción y generó un aumento del ancho de banda. La Muestra 4 funciona como una cubierta acústicamente "transparente", y prácticamente copia el comportamiento del material fibroso.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) (PIP 11220200100926CO), a la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT) (PICT 2020-1003) y a la Universidad Nacional de Mar del Plata (PDTS 2024 UNMdP), por el financiamiento recibido.

## REFERENCIAS

- Almusaed, A.; Yitmen, I.; Myhren, J.A.; Almssad, A. Assessing the Impact of Recycled Building Materials on Environmental Sustainability and Energy Efficiency: A Comprehensive Framework for Reducing Greenhouse Gas Emissions. *Buildings* 2024, 14, 1566. <https://doi.org/10.3390/buildings14061566>
- ASTM D1037: Standard Test Method for Evaluating Properties of Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials
- ASTM E 1050 “Standard test method for impedance and absorption of acoustical materials using a tube, two microphones and a digital frequency analysis system”
- ASTM C384-04 (Reapproved 2016): Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials by Impedance Tube Method.
- Ayrilmis, N.; Kwon, J.H.; Han, T.H. Effect of Resin Type and Content on Properties of Composite Particleboard Made of a Mixture of Wood and Rice Husk. *Int. J. Adhes. Adhes.* 2012, 38, 79–83.
- Barbu MC; Montecuccoli Z; Förg J; Barbeck U; Klímek P; Petutschnigg A; Tudor EM (2021) Potential of Brewer’s Spent Grain as a Potential Replacement of Wood in pMDI, UF or MUF Bonded Particleboard. *Polymers* 13, 319.
- Bulman Hartkopf, C., Winck, R. A., Aquino, D. R., Fassola, H. E., & Stefani, P. M. (2024). Densidad y proporción de albura y duramen en nuevos clones de *Eucalyptus* spp. *Maderas-Cienc Tecnol*, 26, 1–14
- M. Chalapud, M. Herdt, E. Nicolao, E. Ciannamea, R. Ruseckaite, P.M. Stefani, Biobased particleboards based on rice husk and soy proteins: Effect of the impregnation with tung oil on the physical and mechanical behavior, *Construction and Building Materials*, 230 (2020) 116996
- E.M. Ciannamea; D. Marin Quintero; R.A. Ruseckaite; P.M. Stefani. Particleboard Based on Rice Husk: Effect of Binder Content and Processing Conditions. *Journal of renewable materials*. 5 (2017) 356-362
- Fatima, S.; Mohanty, A.R. Acoustical and fire-retardant properties of jute composite materials. *Appl. Acoust.* 2011, 72, 108–114.
- Ferrandez-Villena, M.; Ferrandez-Garcia, A.; Garcia-Ortuño, T.; Ferrandez-Garcia, M.T. Acoustic and Thermal Properties of Particleboards Made from Mulberry Wood (*Morus alba* L.) Pruning Residues. *Agronomy* 2022, 12, 1803. <https://doi.org/10.3390/agronomy12081803>
- Hunt, C.G.; Frihart, C.R.; Dunky, M.; Rohumaa, A. Understanding Wood Bonds-Going beyond What Meets the Eye: A Critical Review. *Rev. Adhes. Adhes.* 2018, 6, 369–463.
- ISO 10534-1:1996 - Acoustics - Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes. Part 1: Method using standing wave ratio (Last review: 2022)

- ISO 10534-2 “Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes, Part 2: Transfer-function method”
- Karlinasari, L.; Hermawan, D.; Maddu, A.; Bagus, M.; Lucky, I.K.; Nugroho, N.; Hadi, Y.S. Acoustical properties of particleboards made from betung bamboo (*Dendrocalamus asper*) as building construction material. *Bioresources* 2012, 7, 5700–5709.
- Pascualt, J. P., & Williams, R. J. J. (2013). Thermosetting polymers. *Handbook of Polymer Synthesis, Characterization, and Processing*. Handbook of polymer synthesis, characterization, and processing, 519-533. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118480793.ch28>
- Robertson J. A., I’Anson K. J. A., Treimo J., Faulds C. B., Brocklehurst T. F., Eijssink V. G., and Waldron K. W. (2010). Profiling brewers’ spent grain for composition and microbial ecology at the site of production, *LWT Food Sci. Technol.* 43, 890–896.
- Rossi L., Wechsler L., Peltzer M. A., Ciannamea E. M., Ruseckaite R. A., Stefani P. M., (2023). Sustainable Particleboards Based on Brewer’s Spent Grains. *Polymers* 2024, 16, 59.
- Väntsi, Olli y Timo, Kärki. Environmental assessment of recycled mineral wool and polypropylene utilized in wood polymer composites. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 104. 0921-3449, 2015. Laapppeenranta.
- Vechiatti, N., Iasi, F., Tomeo, D., Núñez Berté, A. (2023). Propiedades acústicas de mantos de lana de oveja de descarte, *CAA-AdAA2023-037*.
- Yang, H.S.; Kim, D.J.; Kim, H.J. Rice straw—Wood particle composite for sound absorbing wooden construction materials. *Bioresour. Technol.* 2003, 86, 117–121.
- Zulkifli, R.; Nor, M.M.; Ismail, A.R.; Nuawi, M.Z.; Tahir, M.M. Effect of perforated size and air gap thickness on acoustic properties of coir fibre sound absorption panels. *Eur. J. Sci. Res.* 2009, 28, 242–252

## **ACOUSTIC CHARACTERISTICS OF PANELS DESIGNED FROM BREWER’S SPENT GRAIN-BASED PARTICLEBOARDS**

**ABSTRACT** This article evaluates the acoustic properties of tuned absorbers made from sustainable boards produced from the solid waste from beer production (brewer’s spent grain). The topic is framed within the current global demand for circular economy strategies that promote the valorization of agri-food waste by reintroducing it as raw materials in new production processes. In particular, it addresses the utilization of brewer’s spent grain, through its transformation into particleboards suitable for acoustic applications. These boards, used as a basis in the design of tuned absorbers, offer a functional and environmentally friendly alternative to conventional commercial panels. Some possible models and the results of the sound absorption coefficient measured in an impedance tube based on the transfer function are presented. The results obtained show that these materials, with 88% biobased content, exhibit high potential for acoustic control applications.

**Keywords:** sound absorption, biobased, circular economy.

## PROPUESTA DE REHABILITACIÓN ENERGÉTICA DE UN EDIFICIO DE SALUD EN CATAMARCA MEDIANTE MONITOREO Y SIMULACIÓN HIGROTÉRMICOS

**Ana M. Martinena<sup>1</sup>, Alicia Macias<sup>1</sup>, Celina Filippin<sup>2</sup>, Víctor O. García<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Carrera de Arquitectura - Facultad de Tecnología y Ciencias Aplicadas – Universidad Nacional de Catamarca – Maximio Victoria 55 CP 4700 - <http://tecno.unca.edu.ar/> - Catamarca

<sup>2</sup>CONICET, Santa Rosa, La Pampa

<sup>3</sup>Grupo de Energías Renovables Catamarca, Facultad de Ciencias Agrarias UNCA. Catamarca  
Tel. 383 467 1907 - e-mail: [anamartinena31@gmail.com](mailto:anamartinena31@gmail.com)

**RESUMEN:** La construcción de edificios públicos en Argentina busca cubrir necesidades sociales, culturales y sanitarias, pero con frecuencia descuida aspectos energéticos y de confort. Este trabajo tiene como objetivo generar argumentos técnicos para la rehabilitación energética del área Salud del Centro Integrador Comunitario Sur (CIC), en San Fernando del Valle de Catamarca, a partir de un diagnóstico basado en monitoreo higrotérmico, simulación térmica con el software SIMEDIF y análisis de estrategias bioclimáticas. El monitoreo mostró que los locales permanecen fuera de confort más del 80 % del tiempo, con temperaturas entre 24 °C y 34 °C. La simulación validada por calibración confirmó estos resultados y permitió proyectar escenarios de mejora. La incorporación de aislamiento térmico en muros y techos, dispositivos de control solar, ventilación nocturna y forestación estratégica redujo en las simulaciones entre 3 °C y 4,5 °C las temperaturas estivales máximas y aumentó hasta 2 °C las mínimas invernales, acercando los ambientes al rango de confort. Se concluye que, más que por el ahorro energético —moderado en este edificio—, la relevancia de la rehabilitación radica en garantizar condiciones higrotérmicas adecuadas para usuarios y personal, contribuyendo al bienestar y a la sostenibilidad de los edificios públicos.

**Palabras clave:** rehabilitación energética, confort higrotérmico, diseño bioclimático

### INTRODUCCIÓN

Los espacios públicos desempeñan un papel fundamental en los asentamientos humanos al promover el desarrollo comunitario, la cohesión social, la equidad y el bienestar en las ciudades. Estos espacios, tanto abiertos como cerrados, deben diseñarse y gestionarse para ser accesibles, inclusivos, multifuncionales y seguros para la salud y el bienestar humanos (ONU Habitat 2022). En particular, los edificios públicos cumplen funciones simbólicas y operativas que impactan en el entorno urbano debido a su singularidad y a la dinámica que generan y en la calidad de vida de sus usuarios, quienes requieren ambientes confortables para desarrollar sus actividades. Según Molina (2012), "Una persona se encuentra confortable cuando puede observar y sentir un fenómeno sin preocupación o incomodidad. Así, es posible hablar de confort térmico, acústico y lumínico, como variables del confort ambiental. Si alguno de los factores que afectan el confort del usuario se eleva por sobre ciertos límites, a largo plazo se produce un estrés negativo en el cuerpo que puede desencadenar en diversas enfermedades físicas y psicológicas asociadas". En materia de edificación, las normas IRAM regulan la habitabilidad mediante requisitos de eficiencia energética y parámetros de calidad ambiental, estableciendo parámetros de transmitancia térmica (IRAM 11605, 1996), criterios de calidad energética (IRAM 11604, 1990 y 11659-2, 2007) y estrategias bioambientales orientadas a optimizar el ambiente interior y reducir el consumo de energía (IRAM 11900, 2017).

En relación con los antecedentes, diversas investigaciones han puesto en evidencia las deficiencias térmico-energéticas de los edificios públicos y el potencial de mejora a partir de estrategias pasivas y bioclimáticas. El proyecto EUROCLIMA “Edificios municipales energéticamente eficientes y sustentables” (FAU, UNLP / CIC / CONICET, 2023), analizó el comportamiento higrotérmico y energético de 47 edificios en varias regiones bioclimáticas de Argentina. El estudio realizado en el CIC “El Nido” de Neuquén, edificio de construcción tradicional y de baja eficiencia energética en su envolvente, concluyó que la incorporación de aislamiento en vidrios, techos y muros, así como el reemplazo de aberturas y la incorporación de protección solar, permite reducir el consumo energético para calefacción y refrigeración en un 51 %, destacando que la sustitución de carpinterías existentes por otras de PVC con DVH junto con persianas exteriores metálicas exteriores, resulto ser la medida más costosa. Por su parte, la investigación en el CIC “Los Pioneros” de Chacabuco (Buenos Aires) evidencia una baja calidad constructiva y eficiencia energética, logrando confort en invierno gracias al sistema de climatización, pero presentando sobrecalentamiento en verano. La modelización realizada mediante una aplicación desarrollada ad-hoc en Excel que sigue las Normas IRAM 11601, 11605, 11604, 11659 y 11900 como base, estima una demanda de 86.377,10 kWh/año, reducible en un 63.41 % mediante rehabilitación pasiva. Las medidas incluyen aislamiento en muros con EIFS/SATE, DVH en ventanas, protección solar, y lana de vidrio o PUR en techos; la instalación de una bomba geotérmica frío/calor asociada a energía fotovoltaica es la alternativa renovable más factible. Otros trabajos confirman la eficacia de combinar estrategias activas y pasivas. Esteche et al. (2024) mostraron en un jardín maternal de Neuquén que la integración de aislamientos, recambio de aberturas y medidas bioclimáticas (ganancia solar directa, inercia térmica, ventilación nocturna y enfriamiento evaporativo) puede reducir hasta un 90 % la demanda anual de climatización, mejorando sustancialmente el confort higrotérmico. En la misma línea, Fernández y Garzón (2025) evaluaron muros en Centros de Atención Primaria de Salud (CAPS) en Tucumán mediante un análisis multicriterio de desempeño, coste y ciclo de vida. Determinaron que el aislamiento interior con lana de vidrio reduce en promedio un 21,3 % la demanda de calefacción y un 15,4 % la de refrigeración, con alta viabilidad y replicabilidad en contextos locales. Este estudio subraya la necesidad de intervenciones sistemáticas y masivas para optimizar el comportamiento térmico-energético de edificios públicos de salud.

En Argentina existe además un marco normativo que impulsa la eficiencia energética en edificios públicos, estableciendo obligaciones y recomendaciones como el Decreto 140/2007 y programas derivados como el Programa de Uso Racional y Eficiente de la Energía en Edificios públicos (PROUREE), que obligan a implementar medidas de eficiencia, regulan ciertos aspectos concretos (como temperatura de climatización y apagado de luces ornamentales), y prevén la futura definición de índices máximos de consumo. Así mismo resalta la necesidad y conveniencia de que el sector público asuma una función ejemplificadora ante el resto de la sociedad, implementando medidas orientadas a optimizar el desempeño energético en sus instalaciones.

En este marco, el objetivo del trabajo es generar argumentos sólidos para la propuesta de rehabilitación energética del área Salud del Centro Integrador Comunitario Sur (CIC), en San Fernando del Valle de Catamarca, a partir de resultados empíricos obtenidos mediante monitoreo higrotérmico, simulación térmica y aplicación de estrategias bioclimáticas. A diferencia de otros casos, este edificio presenta un consumo eléctrico relativamente bajo, pero severos problemas de confort térmico que afectan a usuarios y personal. El estudio se presenta como una herramienta para respaldar la toma de decisiones en materia de rehabilitación energética en edificios públicos. La hipótesis plantea que la implementación de medidas pasivas —como aislamiento térmico, control solar y ventilación natural— permitirá reducir las temperaturas máximas interiores en verano y aumentar las mínimas en invierno, acercando los locales al rango de confort definido y disminuyendo la dependencia de climatización artificial.

## **CASO DE ESTUDIO**

Los Centros de Integración Comunitarios (CIC) comenzaron a construirse en Argentina a partir del año 2004 como espacios de referencia para políticas de salud y desarrollo social en sectores vulnerables (López, 2004). Su construcción se extendió en todo el país bajo prototipos generales que admiten ajustes locales, sin un diseño adaptado a las distintas zonas bioambientales.

El CIC Sur fue construido en el año 2007 en el barrio Sud, ciudad de San Fernando del Valle de Catamarca (28° 28' latitud sur, 65° 47' longitud oeste y 531 msnm) provincia de Catamarca, en un entorno de viviendas desarrollado por el Instituto Provincial de la Vivienda (I.P.V.) y asentamientos precarios de una sola planta (B° 20 de marzo, Santa Marta, I.P.V./04) (Figura 1a y 1b). El clima de SFVC es cálido-seco con altas temperaturas entre octubre y marzo y periodos de escasas precipitaciones en invierno. En cuanto a las características del aire y la heliofanía del sitio, se aprecia una notable presencia de cielos diáfanos y despejados durante la mayor parte del año, lo que se traduce en una elevada incidencia de radiación solar directa. Estas condiciones, junto con la frecuencia de aire cálido acompañado de partículas de polvo en suspensión, definen un entorno climático caracterizado por altas tasas de insolación y una atmósfera predominantemente seca. De acuerdo a norma IRAM 11603 (1996), el verano es la estación crítica en esta localidad.



Figura 1: Ubicación CIC Sur, (a)Plano Ciudad de SFVC, (b) Vista aérea CIC Sur y entorno

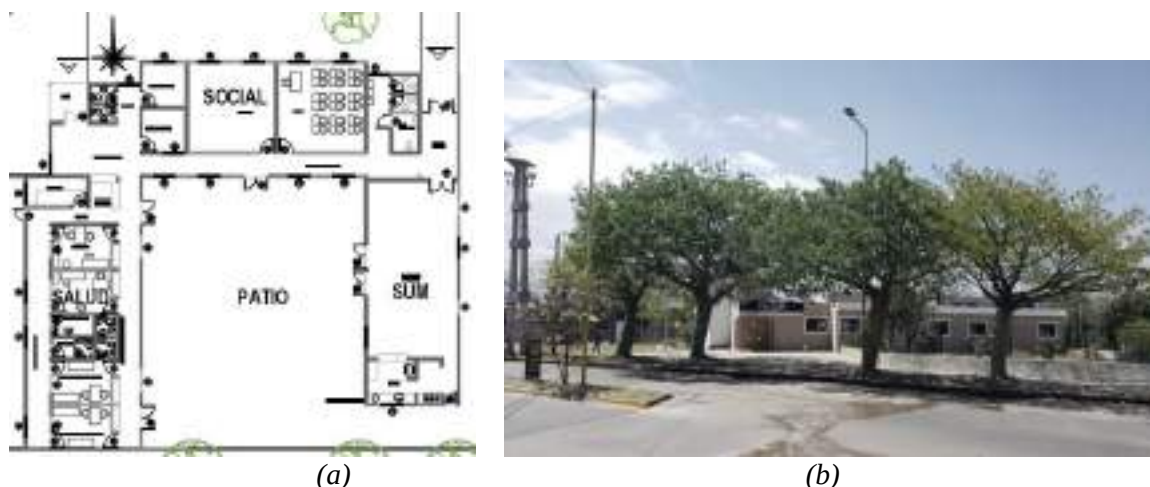


Figura 2: CIC Sur, (a)Planta General, (b) Vista oeste, ingreso y sector Salud

El edificio responde a la tipología CIC Básico, con tres módulos funcionales (Salud, Social y SUM) organizados en torno a un patio cívico central de 460 m<sup>2</sup> (Figura 2a y 2b). El área Salud ocupa 160 m<sup>2</sup> en el ala oeste del edificio, desarrollándose en un eje longitudinal norte-sur, lo que determina que sus fachadas principales se orienten hacia el este y el oeste. El acceso a este sector se realiza a través de un área común que integra un porche, un hall de ingreso y baños públicos. La disposición funcional organiza los cuatro consultorios y la zona de apoyo al personal en el núcleo central, mientras que las circulaciones este y oeste articulan la circulación interna. El pasillo Este está destinado como sala de espera para personas usuarias, en tanto que el pasillo Oeste facilita el tránsito del personal de salud, permitiendo el acceso directo a los consultorios y a los sectores de apoyo. La farmacia completa la estructura funcional del sector (Figura 3). Los pasillos presentan dimensiones reducidas y cuentan con amplias superficies vidriadas, lo que favorece la iluminación y ventilación natural de estos sectores. En contraste, los consultorios, al estar rodeados por las circulaciones, disponen únicamente de ventilucos



ubicados en la parte superior de la pared oeste, lo que resulta insuficiente para garantizar niveles adecuados de iluminación y ventilación en dichos espacios.



Figura 3: Planta Funcional área Salud

La materialidad del edificio se resuelve mediante muros de mampostería de ladrillos cerámicos huecos de 18 cm de espesor, revocados en ambas caras y terminados con pintura látex en tonos celeste y blanco en interiores, y beige en exteriores; carecen de aislación térmica específica. Los techos de consultorios, farmacia y área de apoyo con una pendiente del 5 %, están conformados por estructura metálica, cubierta de chapa galvanizada N° 20, membrana de espuma termoplástica y cielorraso de placas de Durlock pintadas al látex blanco. Los espacios de circulación, porche y hall de ingreso se distinguen por la utilización de losa maciza de 10 cm de espesor, membrana de aluminio de 4 mm sobre hormigón de pendiente con agregados pétreos, carpeta de asiento y bovedillas cerámicas, con cielorraso interior aplicado a la cal. La carpintería está compuesta por ventanas metálicas con marcos y hojas de chapa doble y vidrios simples de 4 mm de espesor, sin burletes, cortinas ni celosías, y las puertas exteriores presentan características similares (Tabla 1).

Tabla 1: Características constructivas área Salud

| Elemento constructivo                                         | Materiales y terminaciones                                                                   | Espesor / características          | Función / ubicación                                          | Aislamiento térmico/ hídrico     |
|---------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| Muros exteriores                                              | Ladrillo cerámico hueco 18 cm revocado. Pintura látex beige                                  | 20 cm                              | Envoltorio del área salud                                    | No posee aislamiento             |
| Techos metálicos                                              | Estructura metálica, chapa galvanizada N° 20, espuma termoplástica, cielorraso de Durlock    | Pendiente 5 %                      | Cubierta principal de consultorios y farmacia y sector apoyo | Membrana de espuma termoplástica |
| Techos losa                                                   | Losa maciza 10 cm, membrana de aluminio, hormigón, bovedillas cerámicas, cielorraso interior | 20 cm                              | Cubierta principal porche, hall de ingreso y pasillos        | Membrana de aluminio 4 mm        |
| Carpintería exterior<br>Puertas ventana, ventanas, ventilucos | Metálicas de chapa doble, vidrio simple de 4 mm                                              | Sin burletes, cortinas ni celosías | Iluminación y ventilación insuficiente en consultorios       | -                                |

El área Salud funciona en turnos de 8 a 12 h y de 14 a 19 h. En consultorios y farmacia se emplean ventiladores de techo, y únicamente tres consultorios disponen de equipos individuales de aire acondicionado para refrigeración. No cuenta con sistemas para calefaccionar los ambientes.



## METODOLOGIA

El diseño metodológico de este trabajo se apoyó en un análisis preliminar de antecedentes técnicos y normativos, que permitió definir los criterios de evaluación del caso de estudio. En particular, se consideraron las normas IRAM 11603 (1996) y 11605 (1996) sobre condiciones de confort térmico. Este marco de referencia, complementado con el análisis de ejemplos de rehabilitación energética en edificios públicos en Argentina, sirvió de base para estructurar la metodología en tres etapas principales:

**Etapla 1. Diagnostico edilicio y energético del CIC Sur:** incluyó la caracterización morfológica (Factor Forma, Índice de Compacidad, orientación y exposición solar) mediante modelado digital con SKETCHUP. Se determinaron las transmitancias térmicas (K) de muros, techos y carpinterías según norma IRAM 11605 (1996) y se evaluaron los riesgos de condensación conforme a norma IRAM 11625 (2000). Simultáneamente, se calcularon las cargas térmicas de calefacción y refrigeración aplicando balances térmicos (norma IRAM 11604, 1990). Sobre esta base, se propuso la rehabilitación de la envolvente edilicia, considerando costos, y se recalcularon cargas y energía auxiliar. En paralelo, se realizó una auditoría energética, analizando consumos eléctricos entre 2012 y 2021 a partir de facturación, y relevando la potencia instalada de equipos y sistemas de iluminación. Este diagnóstico permitió identificar que, si bien el consumo eléctrico total es moderado (10.000–17.000 kWh anuales), el área Salud concentra la mayor carga instalada ( $\approx 19.890$  W, un 72 % del total en acondicionamiento térmico), lo que lo convierte en el sector más crítico desde el punto de vista del confort higrotérmico.

**Etapla 2. Diagnostico térmico área Salud:** constituye el núcleo del presente trabajo. Se partió del monitoreo higrotérmico realizado en condiciones reales de uso y se extendió durante nueve días corridos desde el martes 07 de diciembre de 2021 al jueves 16 de diciembre de 2021. Abarcó siete días laborales con actividad matutina y vespertina (de 8.00 a 12.00 h y de 14.00 a 19.00 h) y dos días de fin de semana donde el sector Salud permaneció cerrado. Los data-loggers, tipo HOBO U-12 se cubrieron con protecciones de poliestireno expandido perforados en toda su superficie y abiertos en su cara inferior a fin de evitar la incidencia y acumulación de calor radiante proveniente de lámparas, paredes o techo. Cada unidad registró datos de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) y humedad (%) a intervalos de quince minutos, lo que permitió construir curvas de comportamiento térmico real y comparar los resultados con los umbrales calculados para el caso de estudio. Los sensores se colocaron en cinco locales simultáneamente: dos consultorios, pasillos y hall de ingreso (Figura 4 y Tabla 2), siendo seleccionados por sus diferentes usos, sistemas constructivos y ubicación dentro del edificio, lo cual permitió plantear un análisis comparativo. Se adoptaron como umbrales de la Zona de Confort (ZC) durante todo el año el rango que va de los  $22^{\circ}\text{C}$  a  $27^{\circ}\text{C}$  y 20 % a 50 % HR, datos obtenidos a partir de la realización de diferentes estudios comparativos. (Bioclimograma de Givoni, Bioclimograma de Olgyay - CEEMA, 2003)

*Tabla 2: Ubicación y tipo de sensores en locales área Salud*

| Local    | Ubicación                           | Sensor             |
|----------|-------------------------------------|--------------------|
| Local 1  | Consultorio - Oculista              | HOBO 1 - 2448449   |
| Local 9  | Consultorio - Enfermería            | HOBO 2 - 2551899   |
| Local 12 | Pasillo Este - Espera               | HOBO 4 - 9658045   |
| Local 13 | Pasillo Oeste – Circulación Técnica | HOBO 11 - 1111984  |
| Local 14 | Hall Ingreso Oeste - Espera         | HOBO 3 - 2448454   |
|          | Patio Cívico - Exterior             | HOBO U12 - 1111989 |

En esta misma etapa se llevó a cabo la simulación del comportamiento térmico del sector durante ocho días para el período cálido desde el 8 al 16 de diciembre, coincidiendo con el periodo de monitoreo, y durante nueve días para el período frío — del 1 al 10 de julio —, utilizando el software SIMEDIF 2.0 para Windows desarrollado en el INENCO, Instituto de Investigación en Energía No Convencional (Flores Larsen y Lesino, 2000). La simulación se realizó en régimen periódico permanente para las estaciones de verano e invierno, y en régimen transitorio para el verano, ingresando al programa los datos de temperatura exterior obtenidos durante el monitoreo. De acuerdo con la norma IRAM 11659 (2007), se adoptó una temperatura de confort de  $26^{\circ}\text{C}$  y 50 % HR para verano (Nivel B), y entre  $18$ – $20^{\circ}\text{C}$  para invierno. Como referencia complementaria, la ASHRAE 55 establece un rango de humedad relativa entre 30–60 %, recomendando 50 % como valor óptimo de diseño. Se definieron 20 zonas

isotermas o locales que se corresponden con los consultorios, circulaciones, sectores sanitarios y de servicio del sector Salud. Los datos geométricos se determinaron en base a los planos del pliego de licitación, mientras que para las propiedades físicas de los materiales se utilizaron valores obtenidos a partir de tablas (Incropera y DeWitt, 1996). En la simulación se tomaron como base las renovaciones por hora, de acuerdo al destino del local, recomendadas por la Norma DIN 1946-4. (DIN, 2014), coeficientes de transferencia internos y externos de  $5.8 \text{ W/m}^2\text{K}$  y  $28.9 \text{ W/m}^2\text{K}$  respectivamente y coeficientes de transmisión térmica de ventanas de  $5.8 \text{ W/m}^2\text{K}$  ya que no tienen persianas exteriores ni cortinas interiores para oscurecer. Finalmente, se llevó a cabo la calibración del modelo numérico a partir de la comparación entre los datos de temperatura y humedad relativa registrados por los sensores y los valores obtenidos en la simulación base. Para ello se consideraron los cinco locales monitoreados (1, 9, 12, 13 y 14).



*Figura 4: Planta ubicación sensores en locales área Salud*

Etapa 3. Propuesta de rehabilitación energética: se definieron estrategias de rehabilitación fundamentadas en criterios de diseño pasivo y bioclimático. Su impacto se evaluó mediante simulaciones con SIMEDIF 2.0, comparando el comportamiento térmico del edificio en su estado actual con escenarios de rehabilitación.

## RESULTADOS

### **Monitoreo higrotérmico**

El periodo monitoreado se caracterizó por una fluctuación en la temperatura y humedad ambiente, comenzando con días cálidos y secos seguidos por días frescos y lluviosos, luego cálidos y húmedos, culminando con cálidos y ventosos. Las temperaturas máximas se registraron entre las 15 y 17 h. y las mínimas entre las 05 y 07 h. Durante los 7 días hábiles monitoreados — momento en el que se realizaban las actividades en el sector Salud, con afluencia de público y presencia permanente de médicos, enfermeros y ayudantes — en cinco de esos días se registraron temperaturas máximas superiores a los  $32^\circ\text{C}$  y un promedio de 50 % HR. Los días sábado 11 y domingo 12 de diciembre, marcaron las temperaturas más cálidas ( $35^\circ\text{C}$  y  $38^\circ\text{C}$ ) del periodo monitoreado.

El monitoreo higrotérmico identificó a los locales 1 (consultorio oculista) y 9 (enfermería) como los ambientes que más rápidamente acumulaban calor, alcanzando temperaturas interiores entre  $24^\circ\text{C}$  y  $34^\circ\text{C}$  y amplitudes térmicas de  $10\text{--}11^\circ\text{C}$ . Ambos presentaron vulnerabilidad ante condiciones externas, con elevada inercia térmica: la disipación nocturna fue insuficiente y la temperatura interna se mantuvo en  $26^\circ\text{C}$  aun cuando el exterior descendió a  $20^\circ\text{C}$ . Las máximas interiores se registraron una hora después del pico exterior, persistiendo durante la noche. Los periodos breves de confort ( $26^\circ\text{C}$  y 50 % HR) se lograron exclusivamente por el uso puntual de refrigeración. El local 13 (pasillo oeste) fue el más cálido ( $29.4^\circ\text{C}$  promedio), con una gran área expuesta y ventanas al oeste sin protección, alcanzando interiores de  $25\text{--}34^\circ\text{C}$  y amplitud térmica de  $10^\circ\text{C}$ . Los locales 12 (pasillo este) y 14 (hall de ingreso) se destacan por presentar el mejor comportamiento térmico. Sin embargo, existen diferencias entre ambos: el local 12, expuesto en la mañana, mantuvo temperaturas entre  $22$  y  $32^\circ\text{C}$ , con promedios diarios de  $28^\circ\text{C}$  y sin descenso nocturno debido a la falta de ventilación, ofreciendo mayor confort en días frescos. Por su parte, el local 14, compacto y bien ventilado, alcanzó máximas de  $29\text{--}32^\circ\text{C}$  y humedad relativa de 42-50 %, mostrando el mayor confort durante las mañanas frescas. A pesar de las

diferencias en los sistemas constructivos, el grado de exposición solar y las condiciones de ventilación natural, los cinco locales presentaron un comportamiento térmico muy similar. Todos se mantuvieron fuera de la zona de confort más del 80 % del tiempo, registrando oscilaciones térmicas entre 24 °C y 34 °C, con una humedad relativa en torno al 50 %. Incluso cuando la temperatura exterior descendía, la temperatura interior permanecía elevada y prácticamente constante a lo largo de los días monitoreados (Figura 5).

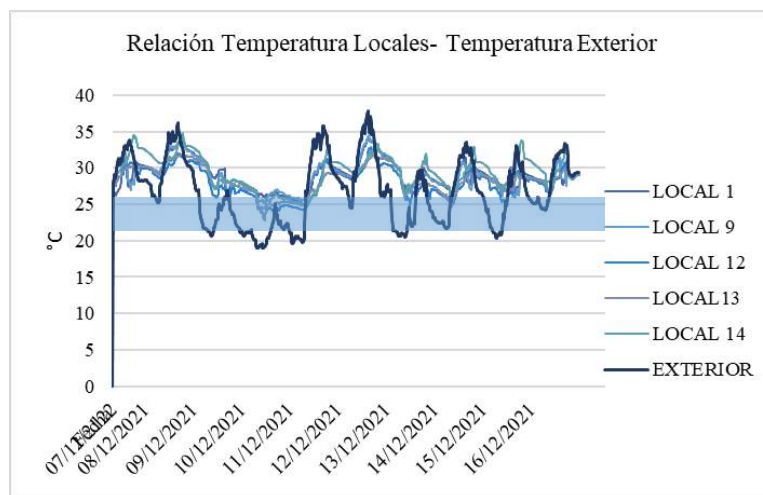


Figura 5: Relación temperatura interior locales monitoreados y zona de confort

En la Figura 6 se grafica la influencia de agentes climáticos y su impacto en el comportamiento térmico de los locales.



Figura 6: Planta comportamiento térmico área Salud - Monitoreo

La Tabla 3 muestra los valores máximos y mínimos alcanzados en los diferentes locales monitoreados del área Salud. Se destacan las diferencias entre locales con ventilación directa y natural respecto de los ubicados en el centro del edificio donde la ventilación es insuficiente.

Tabla 3: Valores máximos y mínimos de temperatura en locales para los días 07 al 16 dic. 2021

| Local    | Ubicación                           | Ventilación  | Temperatura °C |       | Humedad % |     |
|----------|-------------------------------------|--------------|----------------|-------|-----------|-----|
|          |                                     |              | Min            | Max   | Min       | Max |
| Local 1  | Consultorio - Oculista              | insuficiente | 24,99          | 34,36 | 40        | 63  |
| Local 9  | Consultorio - Enfermería            | insuficiente | 23,80          | 34,44 | 34        | 67  |
| Local 12 | Pasillo Este - Espera               | directa      | 22,85          | 31,79 | 41        | 68  |
| Local 13 | Pasillo Oeste – Circulación Técnica | directa      | 24,84          | 34,84 | 37        | 64  |
| Local 14 | Hall Ingreso Oeste - Espera         | directa      | 23,64          | 32,79 | 37        | 68  |
|          | Patio Cívico - Exterior             |              | 18,93          | 37,81 | 29        | 88  |

### ***Simulación del comportamiento térmico***

La simulación térmica del área Salud reprodujo las condiciones del periodo estival e invernal, incorporando los datos del monitoreo y calibrando el modelo en base a los locales evaluados.

Verano. Durante los días cálidos, todos los locales analizados superaron las temperaturas exteriores en las horas de máxima exigencia (13 a 17 h), alcanzando promedios de 33,5 °C. Los ambientes más cálidos fueron los locales 19 y 9 (consultorio enfermería) con promedios de 36 °C entre las 14 y 20 h. Los locales 8, 10 y 2 registraron valores cercanos a 32 °C, y el local 1 (consultorio oculista) alcanzó los 30 °C. Las circulaciones y hall de espera alcanzaron un promedio de 33 °C, destacándose el local 14 (hall de ingreso) como el más cálido de este segmento con 35 °C. Al simular el empleo de aire acondicionado en los locales 1, 8 y 9 (equipos de 2.900 W, termostato a 26 °C entre las 13 y 20 h), se logró mantener condiciones de confort durante el funcionamiento del sistema. Sin embargo, fuera de ese horario, la temperatura ascendió nuevamente, con promedios de 30 °C. Se observó una diferencia térmica de hasta 11 °C entre ambientes acondicionados y no acondicionados, registrándose en estos últimos máximas de hasta 37,7 °C (locales 10 y 2). Sectores de apoyo, sin ventilación ni iluminación natural, registraron hasta 38 °C en el local 7 (office), (Figura 7).

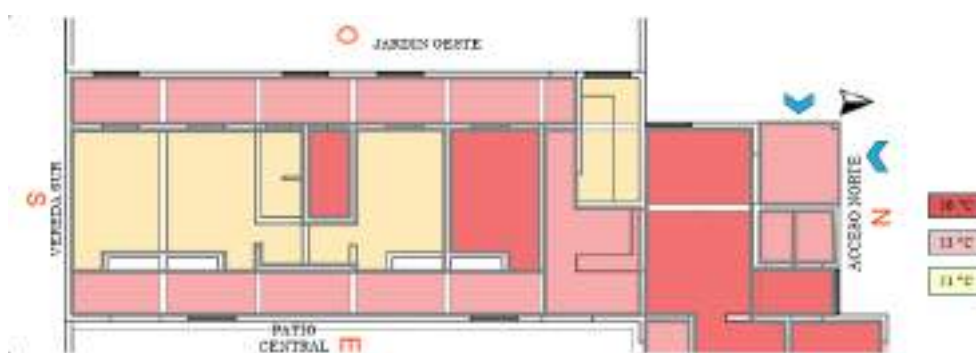


*Figura 7: Planta comportamiento térmico área Salud – Simulación verano*

Invierno. En el periodo frío, los locales permanecieron por encima de la temperatura exterior (promedio 11,5 °C), resultando más favorable que en verano. Los locales 10 y 19 presentaron valores mínimos (13,7 °C), mientras que el local 1 (consultorio oculista) registró 14,5 °C en promedio; consultorios y enfermería mantuvieron temperaturas de 17 °C. El local 9 (consultorio enfermería) alcanzó confort térmico entre 14 y 20 h. Las áreas de circulación y espera se mantuvieron fuera del rango de confort, con valores entre 12 °C y 14 °C. Sectores sanitarios y de office alcanzaron de 12 °C a 15 °C, siendo el local 7 (office) el más cálido con 23 °C. La simulación invernal con aire acondicionado en los locales 1, 8 y 9 (funcionando de 8 a 13 h) permitió mantener el confort térmico hasta la medianoche, registrando incrementos de hasta 4 °C respecto a la situación sin acondicionamiento. Los locales calefaccionados lograron condiciones óptimas, mientras que los no acondicionados oscilaron entre 10 °C y 19 °C. Se ratifica así que la ubicación interna y la ventilación influyen fuertemente en la distribución térmica, con el centro del edificio más cálido y el perímetro más frío (Figura 8).



*Figura 8: Planta comportamiento térmico área Salud – Simulación invierno*

Calibración. La comparación entre los datos de simulación y los registros del monitoreo en los cinco locales instrumentados (1, 9, 12, 13 y 14) evidenció una buena correspondencia, con errores menores a 1,5 °C en temperatura y 5 % en humedad relativa. Esto valida al modelo numérico (SIMEDIF) como una herramienta confiable para evaluar escenarios de rehabilitación. Las Figuras 9 y 10 ilustran la comparación entre los valores de temperatura interior obtenidos en el monitoreo y los resultados de la simulación en los locales 1 y 12, en relación con la temperatura exterior y la zona de confort definida. Se observa que las curvas presentan un comportamiento similar, destacándose las mayores diferencias en los momentos de máximas temperaturas exteriores.

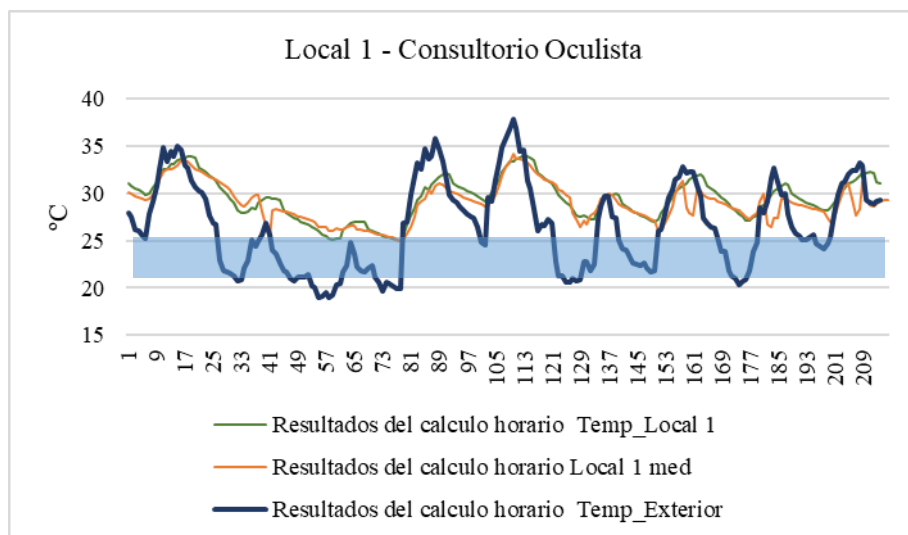


Figura 9: Calibración Datos Local 1 (Consultorio Oculista)

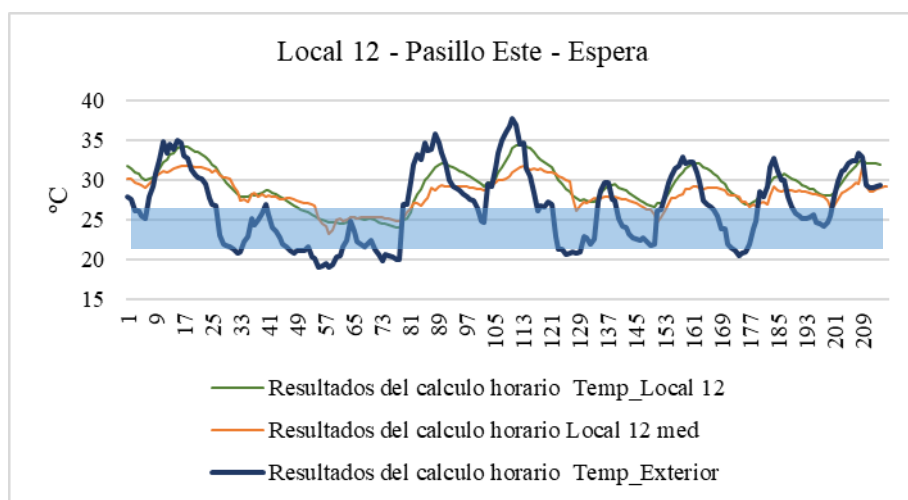


Figura 10: Calibración Datos Local 12 (Pasillo Este – Espera)

### **Propuesta de rehabilitación energética**

La propuesta de intervención para el área Salud se orientó a optimizar el desempeño térmico mediante estrategias pasivas aplicadas a la envolvente, el control solar y la ventilación selectiva. En cuanto a la envolvente, se planteó el incremento de la resistencia térmica en muros y techos con la incorporación de placas de poliestireno expandido y membranas reflectivas en techos, junto con la mejora en las carpinterías por medio de burletes y celosías exteriores. Estas medidas buscan mitigar el sobrecalentamiento y las pérdidas térmicas invernales, favoreciendo la estabilidad de las temperaturas interiores (Figura 11).



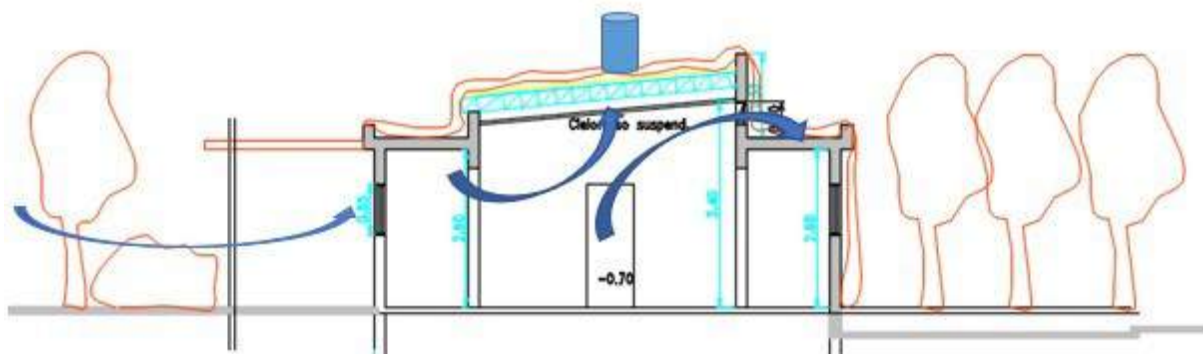


Figura 11: Esquema propuesta integral sector Salud

Para el control solar, se propuso la incorporación de una galería con pérgola en el frente este y forestación estratégica de patios y jardines con especies adaptadas al clima local. Ambas acciones atenúan la radiación solar directa y disminuyen la carga térmica sobre los locales más expuestos (Figura 12a y 12b, 13a y 13b).



(a)



(b)

Figura 12: Sector Salud Fachada este mejorada (a) Árboles y arbustos, (b) Pérgola zona Espera



(a)



(b)

Figura 13: Sector Salud Fachada oeste mejorada (a) Celosías madera, (b) Árboles caducos

Finalmente, se planteó la optimización de la ventilación nocturna a través de rejillas en puertas y extractores eólicos regulables en cubiertas de chapa, definiendo horarios específicos de apertura para maximizar la renovación de aire y favorecer el enfriamiento pasivo en consultorios, pasillos y áreas de espera. Dado que los colores exteriores ya son claros, no se consideraron modificaciones en este aspecto

### **Simulación de la propuesta de rehabilitación**

Como resultado de la aplicación de las estrategias de mejora propuestas, las simulaciones evidenciaron reducciones significativas en las temperaturas interiores durante los periodos críticos. En verano, la rehabilitación de la envolvente, junto con dispositivos de sombreado y ventilación nocturna, permitió disminuir entre 3 °C y 4,5 °C las temperaturas máximas en los locales más cálidos, alcanzando valores de 29–31 °C durante las horas de mayor exigencia. En invierno, la mejora del aislamiento elevó las

temperaturas mínimas entre 1,5 °C y 2 °C respecto a la situación base, extendiendo los periodos de confort, especialmente en consultorios y áreas de espera.

Estas mejoras se tradujeron en una menor dependencia de sistemas de climatización artificial y una mayor estabilidad térmica a lo largo del día, logrando que la mayoría de los locales intervenidos alcanzaran o se aproximaran a los rangos de confort definidos. De este modo, la integración de estrategias pasivas se confirma como una herramienta clave para optimizar el comportamiento térmico del edificio y mejorar el bienestar de sus usuarios.

## CONCLUSIONES

El presente trabajo abordó el problema del desconfort térmico en el área Salud del CIC Sur de San Fernando del Valle de Catamarca, un edificio público construido sin adecuación a las condiciones bioclimáticas locales.

El diagnóstico, basado en monitoreo higrotérmico y simulación dinámica calibrada, evidenció que los locales permanecen fuera de confort más del 80 % del tiempo. En verano, las temperaturas interiores alcanzan máximos de 33–36 °C y persisten elevadas durante la noche debido a la insuficiente disipación térmica, mientras que en invierno se mantienen por debajo del rango de confort en la mayoría de los ambientes. Estas condiciones generan una marcada dependencia de la climatización artificial para alcanzar niveles aceptables de confort.

La simulación de estrategias pasivas de rehabilitación demostró una mejora significativa: reducción de 3–4,5 °C en las temperaturas máximas estivales y aumento de 1,5–2 °C en las mínimas invernales, acercando a los consultorios y áreas de espera a los rangos de confort establecidos. Además, se logró disminuir la dependencia de sistemas artificiales y se mejoró la estabilidad térmica a lo largo del día.

En síntesis, los resultados confirman que la integración de monitoreo y simulación constituye una metodología sólida y confiable para diagnosticar y fundamentar propuestas de rehabilitación energética. Las medidas pasivas evaluadas representan una estrategia replicable para optimizar el confort y la eficiencia de edificios públicos existentes en climas cálidos-secos, contribuyendo a los objetivos de sostenibilidad y bienestar de los usuarios.

## REFERENCIAS

- Centro de Estudios Energía y Medio Ambiente. (CEEMA) (2003). Programa para la Determinación del Diagrama de Givoni. Instituto de Acondicionamiento Ambiental de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la UNT. Tucumán.
- Centro de Estudios Energía y Medio Ambiente. (CEEMA) (2003) Programa para la Determinación del Diagrama de Olgay. Instituto de Acondicionamiento Ambiental de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la UNT. Tucumán.
- Czajkowski, J., Gómez, A., Birche, B., Berardi, R., Basualdo, D., Czajkowski, M. y Basualdo Rapetti, J. (2023). Edificios municipales energéticamente eficientes y sustentables Caso: CIC – Centro Integrador Comunitario “El Nido” Neuquén, Neuquén. Proyecto EUROCLIMA. Laboratorio de Arquitectura y Hábitat Sustentable. FAU/ UNLP. La Plata. Argentina.
- Czajkowski, J., Gómez, A., Birche, B., Berardi, R., Basualdo, D., Czajkowski, M. y Basualdo Rapetti, J. (2023). Edificios municipales energéticamente eficientes y sustentables Caso: CIC – Centro Integrador Comunitario “Los Pioneros” Chacabuco, Provincia de Buenos Aires. Proyecto EUROCLIMA. Laboratorio de Arquitectura y Hábitat Sustentable. FAU/ UNLP. La Plata. Argentina.
- Decreto 140 de 2007. Poder Ejecutivo Nacional (P.E.N.) Argentina. Por medio del cual se declaran de interés y prioridad nacional el uso racional y eficiente de la energía. Apruebanse los lineamientos del citado programa. 21 de diciembre de 2007.
- Esteche, M., Diulio, M. Paz, Gómez, A. (2024) Rehabilitación energética y diseño bioclimático en un jardín maternal en Neuquen, Argentina. Laboratorio de Experimentación Proyectual y Estudios Urbano-Territoriales Universidad Nacional de Río Negro, Laboratorio de Arquitectura y Hábitat Sustentable. Facultad de Arquitectura y Urbanismo Universidad Nacional de La Plata.
- Fernandez, A., & Garzón, B. (2025). Estrategias de rehabilitación de aplicación generalizada en muros de CAPS en Tucumán, Argentina. Hábitat Sustentable, 15(1), 44–53. <https://doi.org/10.22320/07190700.2025.15.01.04>



- Flores Larsen, S., Lesino, G. (2000) Simedif 2000: Nueva versión del programa de diseño y cálculo de edificios. INENCO, UNSa – CONICET. Salta. Argentina.
- López, S. (2008). Implementación del Proyecto Centros Integradores Comunitarios en el Municipio de Berisso. V Jornadas de Sociología de la Universidad Nacional de La Plata. FAHCE - UNLP. La Plata. Argentina.
- Norma IRAM 11601 (1996) Acondicionamiento térmico de edificios. Propiedades térmicas de los componentes y elementos de construcción en régimen estacionario. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales, Buenos Aires, Argentina.
- Norma IRAM 11603 (1996). Acondicionamiento térmico de edificios. Clasificación Bioambiental de la República Argentina. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales. Buenos Aires, Argentina.
- Norma IRAM 11604 (1990). Aislamiento térmico de edificios. Verificación de sus condiciones higrotérmicas. Ahorro de energía en calefacción. Coeficiente volumétrico G de pérdidas de calor. Cálculo y valores límites. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales, Buenos Aires, Argentina.
- Norma IRAM 11605 (1996) Acondicionamiento térmico de edificios. Condiciones de habitabilidad en edificios. Valores máximos de transmitancia térmica en cerramientos opacos. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales, Buenos Aires, Argentina.
- Norma IRAM 11659 (2004) Aislamiento térmico de edificios. Verificación de sus condiciones higrotérmicas. Ahorro de energía en refrigeración. Parte 1: Vocabulario, definiciones, tablas y datos para determinar la carga térmica de refrigeración. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales, Buenos Aires, Argentina.
- Norma IRAM 11659-2 (2007) Acondicionamiento térmico de edificios. Verificación de sus condiciones higrotérmicas. Ahorro de energía en refrigeración. Parte 2: Edificios para viviendas y edificios de vivienda. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales, Buenos Aires, Argentina.
- Norma IRAM 11900 (2017) Prestaciones energéticas en viviendas. Método de cálculo y etiquetado de eficiencia energética. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales, Buenos Aires, Argentina.
- ONU – HABITAT (2022). Guía de Diseño Participativo para una Red de Espacios Públicos en Cancún. México
- Molina, C, & Veas, L. (2012). Evaluación del confort térmico en recintos de 10 edificios públicos de Chile en invierno. Revista de la construcción, 11(2), 27-38. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-915X2012000200004>

## **PROPOSAL FOR THE ENERGY RETROFIT OF A HEALTHCARE BUILDING IN CATAMARCA THROUGH HYGROTHERMAL MONITORING AND SIMULATION**

**ABSTRACT:** The construction of public buildings in Argentina seeks to meet social, cultural, and health needs, but often neglects energy and comfort aspects. This study aims to generate technical arguments for the energy rehabilitation of the Health area of the South Community Integration Center (CIC) in San Fernando del Valle de Catamarca, based on a diagnosis using hygrothermal monitoring, thermal simulation with SIMEDIF software, and analysis of bioclimatic strategies. Monitoring showed that the premises remain outside the comfort zone more than 80% of the time, with temperatures between 24°C and 34°C. The simulation, validated by calibration, confirmed these results and allowed improvement scenarios to be projected. The incorporation of thermal insulation in walls and ceilings, solar control devices, night ventilation, and strategic afforestation reduced maximum summer temperatures by between 3°C and 4.5°C in the simulations and increased minimum winter temperatures by up to 2°C, bringing the environments closer to the comfort range. It is concluded that, rather than energy savings—which are moderate in this building—the relevance of the renovation lies in ensuring adequate hygrothermal conditions for users and staff, contributing to the well-being and sustainability of public buildings.

**Keywords:** energy rehabilitation, hygrothermal comfort, bioclimatic design

## **CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO LUMÍNICO DE CORTINAS TEXTILES DUALES. IMPACTO EN LA DISPONIBILIDAD Y UNIFORMIDAD DE LA LUZ NATURAL**

**Ayelén Villalba, Julieta Yamín, Andrea Pattini**

Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía, CCT-Mendoza, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

Tel. 261-5244310 - e-mail: avillalba@mendoza-conicet.gov.ar

**RESUMEN:** El objetivo general de este estudio es generar conocimiento sobre el comportamiento lumínico de componentes de la envolvente edilicia, con el propósito de contribuir al diseño y la aplicación de soluciones tecnológicas exitosas que antepongan las necesidades humanas y promuevan importantes ahorros de energía. Específicamente, este trabajo se enfoca en determinar el impacto de cortinas textiles duales en el factor de iluminación en espacios interiores, focalizando en la disponibilidad y uniformidad de iluminación natural. Como caso de estudio se seleccionó una cortina dual de color negro abierta. La metodología incluyó el registro de valores de iluminancia horizontal, la caracterización óptica del recinto de medición, el monitoreo de las condiciones de cielo exterior y el procesamiento de los datos de iluminancia horizontal en  $R^+$ . Los resultados principales nos permiten observar que la cortina dual reduce el ingreso de radiación solar visible respecto al mismo escenario sin sistema de sombreado. Sin embargo, este estudio demuestra que las cortinas duales, cuando se disponen en posición abierta, no controlan de manera efectiva el ingreso de la radiación solar en el rango visible. Esto expone a los usuarios a situaciones de deslumbramiento y elevados contrastes repentinos, difíciles de procesar por el sistema visual.

**Palabras clave:** iluminación natural, sistemas de sombreado, cortina dual.

### **INTRODUCCIÓN**

A nivel mundial, en 2022, el sector edilicio representó el 30% del consumo mundial de energía final y el 26% de las emisiones totales del sector energético (IEAa, 2023). En este contexto las fachadas de los edificios tienen un rol fundamental ya que determinan su interacción con la radiación solar (Al-Masrani et al., 2019), lo cual impacta en los consumos de energía para calefacción y enfriamiento y en la condiciones de confort visual interior (Alva et al., 2020; IEAb, 2023; Brembilla et al., 2019; Ward et al., 2021). La Agencia Internacional de Energía en su informe sobre perspectivas energéticas, respecto a fachadas energéticamente eficientes, posiciona a los elementos de sombreado como una de las cinco estrategias fundamentales para disminuir los consumos de energía y alcanzar espacios interiores con confort térmico y lumínico.

Para regular la intensidad y la distribución de la radiación solar se emplean diversos dispositivos de sombreado, sistemas de iluminación natural y materiales que modifican el ingreso de la luz solar – cortinas venecianas, cortinas roller, films, tratamientos de vidriado, parasoles, chapas perforadas, louvers-. Este conjunto de dispositivos y sistemas se agrupan bajo la denominación de sistemas de aventanamiento complejo (del inglés: complex fenestration systems (CFS)). Este concepto abarca todos los componentes de los sistemas de aventanamiento que no presentan transmitancia especular, incluido las capas que proveen sombra, como las cortinas de tela, los sistemas de estantes de luz y de mallas metálicas, y capas que mejoran la iluminación natural interior, como los sistemas de louvers espejados o las películas reflectivas prismáticas (Klems, 1994; McNeil et al., 2013; Ward et al., 2021; Mashaly et al., 2021). Estos sistemas pueden cumplir la función de sombreado, redirección, reducción de



deslumbramiento y mejora de las condiciones de bienestar visual interior (Konstantoglou y Tsangrassoulis, 2016; Wang et al., 2022).

La creciente importancia que han adquirido los sistemas de sombreado y redirección de radiación solar en el desempeño energético de los edificios ha conducido al desarrollo de diversos componentes innovadores. Los novedosos sistemas de control solar y sombreado deben aumentar los niveles de iluminación natural y mejorar la uniformidad de la luz en los espacios interiores mientras que controlan la luz solar directa y reducen el deslumbramiento y el malestar visual de los ocupantes (Ruck et al., 2000; Athienitis y Tzempelikos, 2002). Sin embargo, muchos de estos sistemas se han insertado en el mercado sin una adecuada caracterización lumínica-energética que permita su correcta aplicación en relación al clima regional. En Argentina la mayor parte de los sistemas de sombreado o control solar que se utilizan no han sido caracterizados en su comportamiento óptico.

La incorrecta implementación de sistemas de aventamientos complejos puede resultar en perjuicios en relación al confort visual como en incrementos de los consumos de energía. Avanzar en estudios que evalúen el impacto de la aplicación de las tecnologías de protección solar -sistemas de sombreado y control solar- desarrolladas localmente en las condiciones de confort termo-lumínico interiores, poniendo el foco en la caracterización del comportamiento de estos sistemas en base a distintos parámetros de análisis –tipos de cielo, épocas de año, orientaciones, reflectancia de superficies interiores- es fundamental para poder generar recomendaciones certeras respecto a su aplicación, que garanticen la efectiva implementación de estos sistemas en términos de confort visual y eficiencia energética. Uno de los sistemas de sombreado que mayor crecimiento de mercado ha presentado en los últimos años son las cortinas dual -banded shades o dual shade en inglés-. La cortina dual funciona bajo el mismo principio de funcionamiento que los sistemas roller. La principal diferencia es que está confeccionada con una doble capa de tela que presenta franjas alternas transparentes y traslúcidas desplazables (Figura 1 a y b). Si bien existen diversos estudios que analizan el desempeño de las cortinas roller tradicionales (Villalba et al., 2024; Villalba et al., 2017; Karmann et al., 2025), no hay investigaciones al momento que analicen el comportamiento lumínico de las cortinas dual.



Figura 1: (a) Detalle de una cortina dual. (b) Fachada donde se observa el uso de cortinas duales.

En este contexto el objetivo general de este estudio es producir conocimiento en torno al comportamiento lumínico de materiales y componentes de la envolvente edilicia, con el propósito de contribuir al diseño y la aplicación de soluciones tecnológicas exitosas que antepongan las necesidades humanas y promuevan importantes ahorros de energía. De manera específica, este trabajo busca determinar el impacto de las cortinas textiles duales en el factor de iluminación en espacios interiores, focalizando en la disponibilidad y uniformidad de iluminación natural; dos de los parámetros fundamentales que determinan el ambiente luminoso en relación a la iluminación natural (IRAM/AADL, 2021). Esto resulta particularmente importante debido a que la presencia de este tipo de sistemas de protección solar en los espacios construidos se ha incrementado significativamente en los últimos años y, sin embargo, no hay estudios que analicen su desempeño lumínico.

## CASO DE ESTUDIO

Para este trabajo se seleccionó una cortina dual de color negro, con una franja traslúcida y una transparente (Figura 2). El tejido es 100% poliéster, sus propiedades ópticas se detallan en la Tabla 1. En este caso analizaremos la posición más crítica del sistema que es cuando se encuentra en posición abierta, es decir cuando se superponen las dos bandas transparentes y las dos traslúcidas y el sistema admite la mayor cantidad de luz solar.

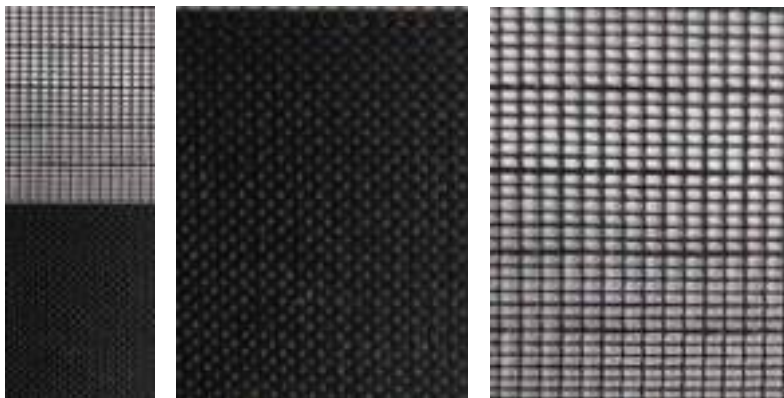


Figura 2: Muestra del tejido que conforma la cortina dual seleccionada para el estudio.

Tabla 1: Propiedades ópticas del tejido que conforma la cortina dual seleccionada para el estudio. Factor de apertura del tejido (FA). Transmitancia visible del tejido ( $\tau_v$ ). Reflectancia visible del tejido ( $\rho_v$ ).

| color | Coordenadas de color |      |      | $\rho_v$ | Franja traslúcida |          | Franja transparente |          |
|-------|----------------------|------|------|----------|-------------------|----------|---------------------|----------|
|       | L                    | a    | b    |          | FA                | $\tau_v$ | FA                  | $\tau_v$ |
| Negro | 18,81                | 0,30 | 0,33 | 5,79%    | 0                 | 0        | 48                  | 48       |

A continuación se describe brevemente el comportamiento óptico de los tejidos de este tipo de cortina, debido a que es importante comprenderlo para interpretar los resultados del trabajo. La transmitancia visible ( $\tau_v$ ) describe el porcentaje de luz visible que se transmite a través de la tela, y la reflectancia visible ( $\rho_v$ ) es la fracción de la luz incidente que es reflejada por la tela (Chan et al., 2014). En las cortinas textiles, la radiación del haz incidente se divide en dos partes: la porción sin perturbar que se transmite a través de las aberturas, y la porción interceptada (transmitida o reflejada) (Kotey et al., 2009). La transmitancia visible normal/hemisférica,  $\tau_{v,n-h}$ , es la suma de la transmitancia visible normal/normal,  $\tau_{v,n-n}$  (la porción transmitida sin perturbar, equivalente al factor de apertura del tejido (FA)), y la transmitancia visible normal/difusa,  $\tau_{v,n-dif}$  (la radiación interceptada) (Figura 3). Es importante considerar que  $\tau_{v,n-n}$  depende en gran medida del ángulo de incidencia de la fuente y que  $\tau_{v,n-dif}$  está principalmente determinada por el color de la tela (Chan et al., 2014; Deneyer et al., 2013; Deroisy et al., 2013). Kotey et al. (2009) afirman que la radiación interceptada (transmitancia visible normal/difusa) es dispersada por múltiples reflexiones entre los hilos de la tela y su posible transmisión a través de ellos. Estudios previos muestran que las cortinas de tela generalmente tienen un componente de reflectancia especular insignificante (Deroisy et al., 2013). La reflectancia de la tela se comporta casi como un material completamente lambertiano (Jonsson et al., 2008; Deneyer et al., 2013). Por lo tanto, la reflectancia normal-normal  $\rho_{v,n-n}$  es igual a cero, y la reflectancia visible normal/hemisférica  $\rho_{v,n-h}$  es igual a la reflectancia visible normal/difusa  $\rho_{v,n-dif}$  (Jonsson et al., 2008) (Figura 3).

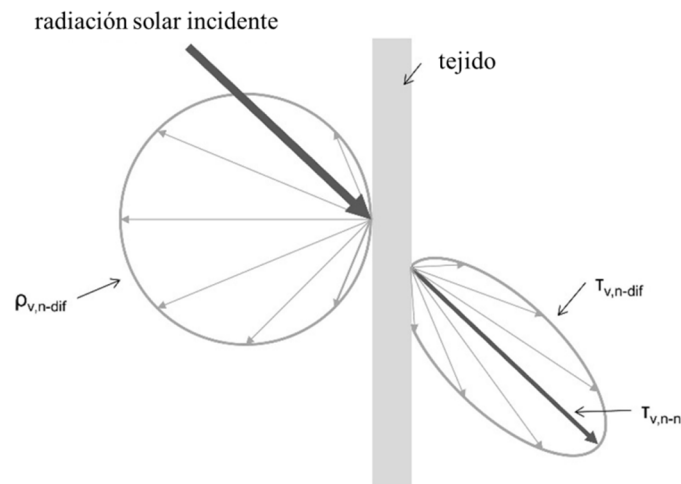


Figura 3: Geometría de la radiación que incide en las cortinas de tela.

Resulta importante aclarar que si bien una de las franjas del textil seleccionado para este estudio se denomina traslúcida, porque comercialmente se le denomina así a los tejidos con FA igual a 0, que sólo presentan  $\tau_{v,n-dif}$ . Para el caso seleccionado en este estudio, tejido negro, su  $\tau_v$  también es de 0%, ya que como se detalla anteriormente la  $\tau_{v,n-dif}$  depende exclusivamente de color de la tela y en el caso de tejidos negros es siempre muy reducida.

## METODOLOGÍA

### Registro de valores de iluminancia horizontal ( $E_h$ )

Las mediciones de  $E_h$  (lx) se efectuaron en el box experimental del INAHE-CCT Mendoza en condiciones de luz diurna (Figura 4 y 5). El espacio dispone de dos salas de ensayo con las mismas dimensiones (Figura 6). A efectos de este estudio sólo se utilizó la sala 1. Ambas salas tienen una abertura de 2,77 m x 1,40 m, donde se colocó la cortina (Figura 7). La abertura estaba orientada al norte. Los experimentos se llevaron a cabo durante días soleados próximos al solsticio de invierno de 9:30 a 15:30 horas. La iluminancia horizontal dentro de la sala se monitoreó con 6 sensores fotométricos situados a 0,7 m, 1,4 m y 2,1 m de la ventana en dos columnas distanciadas 1,2 m. Los sensores estaban posicionados a 0,8 m de altura del suelo. El equipo utilizado fue un radiómetro IL, compuesto por un multiplexor (modelo: A415) y seis sensores fotométricos (modelo: SCD 110 / rango: 0 a 120000 lx). El intervalo de tiempo usado para la obtención de los datos fue de 1 minuto.



Figura 4: ubicación geográfica del box experimental.



Figura 5: vista exterior del box experimental.



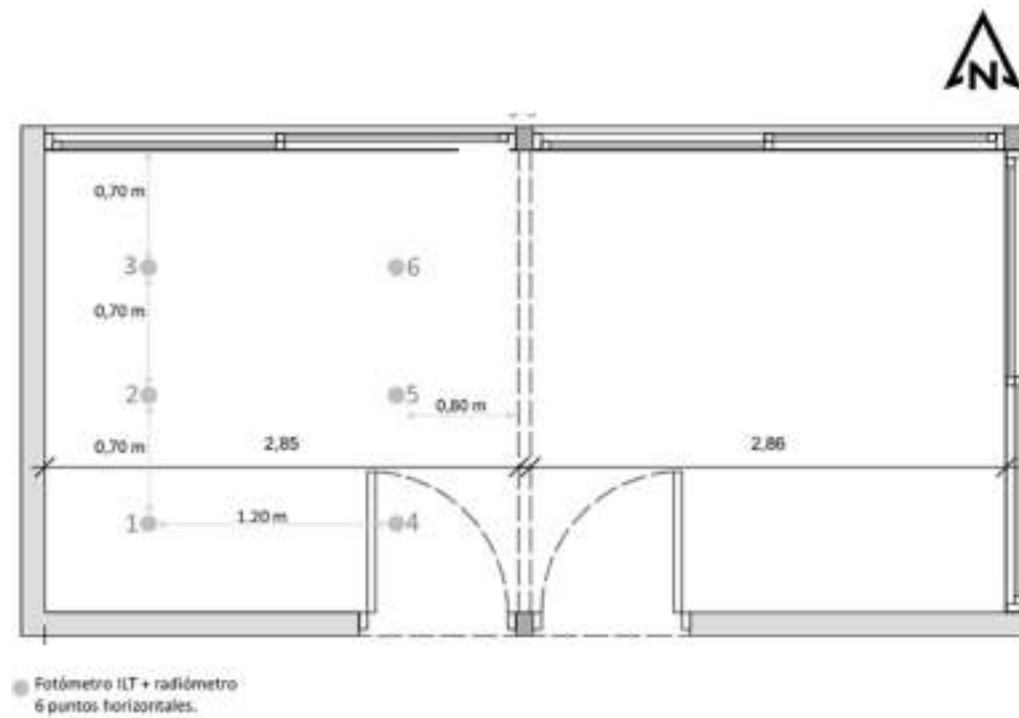


Figura 6: vista superior del ajuste de medición.



(a)



(b)

Figuras 7: vista interior del box experimental: sala 1.

### Caracterización óptica del recinto de medición

Se caracterizó la reflectancia visible de las principales superficies interiores del recinto donde se efectuaron los registros de las condiciones de iluminación natural interior. La reflectancia en este estudio se determina mediante la metodología propuesta por Fontoynt (1999). Este método permite cuantificar la reflectancia de materiales bajo condiciones de luz difusa. El instrumental empleado para la caracterización es un luminancímetro (Minolta LS100).

Las coordenadas de color CIE Lab se determinaron con un colorímetro de precisión NR20XE 3nh que cumple con CIE (2004) (Tabla 2).

Tabla 2: valores de  $\rho_v$  y coordenadas de color CIE Lab de techo y pared del recinto de medición.

| material | $\rho_v$ | L     | a     | b    |
|----------|----------|-------|-------|------|
| pared    | 77,86    | 93,88 | -0,17 | 1,35 |
| techo    | 83,16    | 91,93 | 0,73  | 2,35 |



El valor de transmitancia y reflectancia visible del vidrio del DVH (6+11+6) que presenta el recinto de medición se obtuvo del software OPTICS, este software dispone de la IGDB (International Glazing Data Base)<sup>1</sup>. El valor de  $\tau_v$  del vidrio es de 0.801 y el de  $\rho_v$  0.147.

### Monitoreo de las condiciones de cielo exterior

Para asegurar que los registros se efectuaron en un día típico, con cielo claro característico de la región, se efectuaron registros de iluminancia horizontal global (Fotómetro Licor 210 SA) y difusa (Licor 210 SA + banda de sombra) con la estación IDMP clase general a intervalo minuto-minuto ubicada en el mismo predio donde se efectúan el resto de las mediciones (CCT-CONICET, Mendoza) (Monteoliva y Pattini, 2014) (Figura 8).

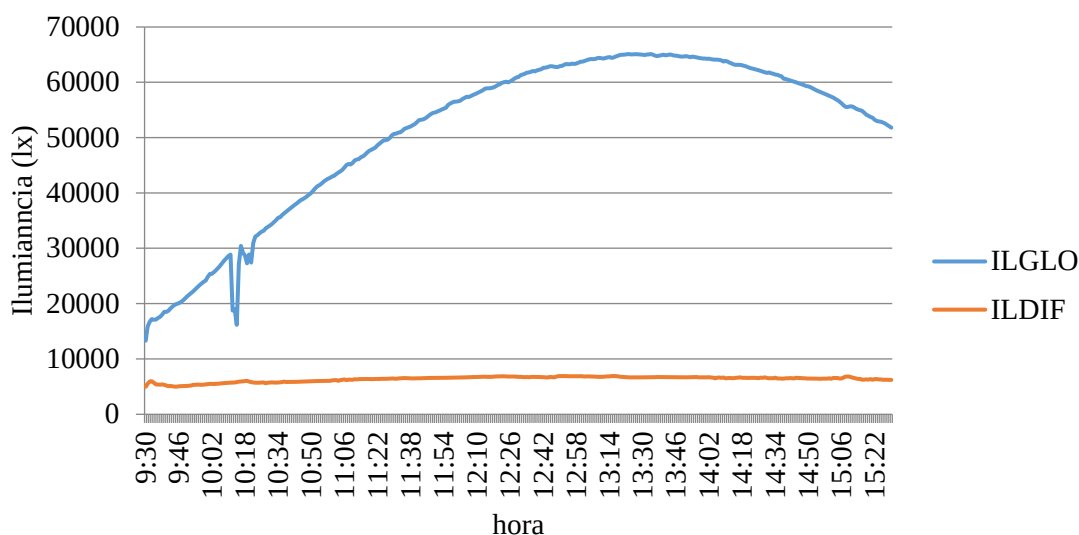


Figura 8: Curvas iluminancia global y difusa hora a hora para la fecha en que se realizaron las mediciones.

### Procesamiento de los datos de $E_h$

El archivo .txt con los registros de  $E_h$  fue procesado en R+. Esto permitió limpiar los datos y darles el formato (número, hora) correspondiente. Además, se estableció la selección de los datos para la fecha en que se ejecutó la medición del sistema de sombreado en posición abierto (28/06/2024). Posteriormente, se aplicó el factor de calibración a cada uno de los sensores de  $E_h$ .

Para poder visualizar el desempeño de la protección solar se realizaron dos tipos de visualizaciones diferentes:

- 1- Gráfica de línea, donde se puede analizar el comportamiento de los sensores a lo largo del periodo considerado.
- 2- Scatterplot, donde se aprecia la distribución de la luz en distintos puntos del espacio analizado mediante una vista superior.

Asimismo, se calculó la uniformidad ( $U_o$ ) del espacio. La uniformidad es un parámetro adimensional, se calcula mediante la relación entre la iluminancia mínima ( $E_{\min}$ ) (lx) y la iluminancia media ( $E_m$ ) (lx).

$$U_o = E_{\min} * E_m \quad (1)$$

## RESULTADOS

Los niveles de  $E_h$  indicados por norma IRAM/AADL J 2006:2021 para tareas de oficina en plano de trabajo son de entre 300 y 750 lx, dependiendo el tipo de actividad. Observamos que todos los puntos de medición superan los 300 lx durante casi toda la jornada de medición (> 98% del tiempo) (Figura 9

<sup>1</sup>( <https://windows.lbl.gov/optics-downloads>)

y Tabla 3). Sin embargo, detectamos que todos los sensores registran valores superiores a los 3000 lx en algún momento del periodo analizado, esto implica la posibilidad de estar ante situaciones de potencial deslumbramiento (Nabil y Mardaljevic, 2005; Yamín et al., 2021). Esta situación se observa de manera particularmente acentuada en los puntos más próximos a la ventana (sensores 3 y 6) y en el sensor 5 que se ubica en un punto intermedio, donde el periodo que excede los 3000 lx es superior a al 75% del tiempo para el sensor 3 y superior al 35% del periodo analizado para los sensores 5 y 6. También, resulta pertinente destacar la acentuada variabilidad ( $> 10000$  lx) en periodos de tiempos reducidos (1 o 2 minutos) que se detecta en diversos momentos del día.

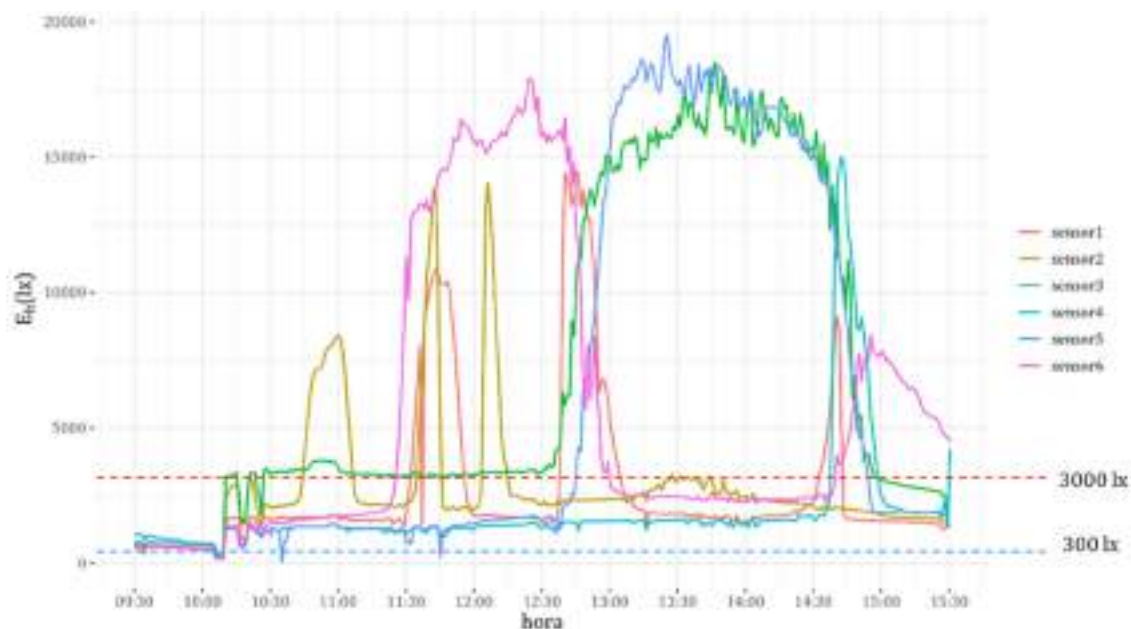


Figura 9:  $E_h$  registrada en cada uno de los seis puntos analizados entre las 9:30 y las 15:30.

Tabla 3: porcentaje de tiempo de medición que cada sensor presenta valores superiores a 300 lx; superiores a 3000 lx y entre 300 y 3000 lx.

|                                 | sensor 1 | sensor 2 | sensor 3 | sensor 4 | sensor 5 | sensor 6 |
|---------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| % de tiempo $> 300$ lx          | 99       | 99       | 99       | 99       | 98       | 98       |
| % de tiempo $> 3000$ lx         | 16       | 17       | 78       | 8        | 36       | 42       |
| % de tiempo entre 300 y 3000 lx | 82       | 82       | 22       | 91       | 62       | 57       |

En la Figura 10 se exponen las gráficas de distribución de  $E_h$  promedio para cada una de las horas analizadas y en la Tabla 4 los valores de uniformidad hora a hora. En términos generales observamos que en las horas de la mañana (9:00, 10:00 y 11:00) y en la correspondiente a la tarde (15:00) las distribuciones de  $E_h$  presentan mayor uniformidad. Mientras que en las horas próximas al mediodía solar (12:00, 13:00 y 14:00) el espacio resulta poco uniforme. Esto se debe a que en este horario la incidencia de radiación solar visible directa sobre la fachada norte del espacio -vidriada- es mayor que en las horas de la mañana y la tarde, donde por el posicionamiento del sol (altura y azimut) el espacio recibe luz con una elevada componente difusa. De acuerdo a la norma IRAM/AADL J 2006:2021 los espacios donde se realizan tareas de oficina deben presentar valores de  $U_o \geq 0.6$  para escritura, tipeo, lectura y procesamiento de datos. Condición que en el espacio analizado sólo se cumple en las primeras horas de la mañana (9:00  $U_o$  0.81 y 10:00  $U_o$  0.62) (Tabla 4).

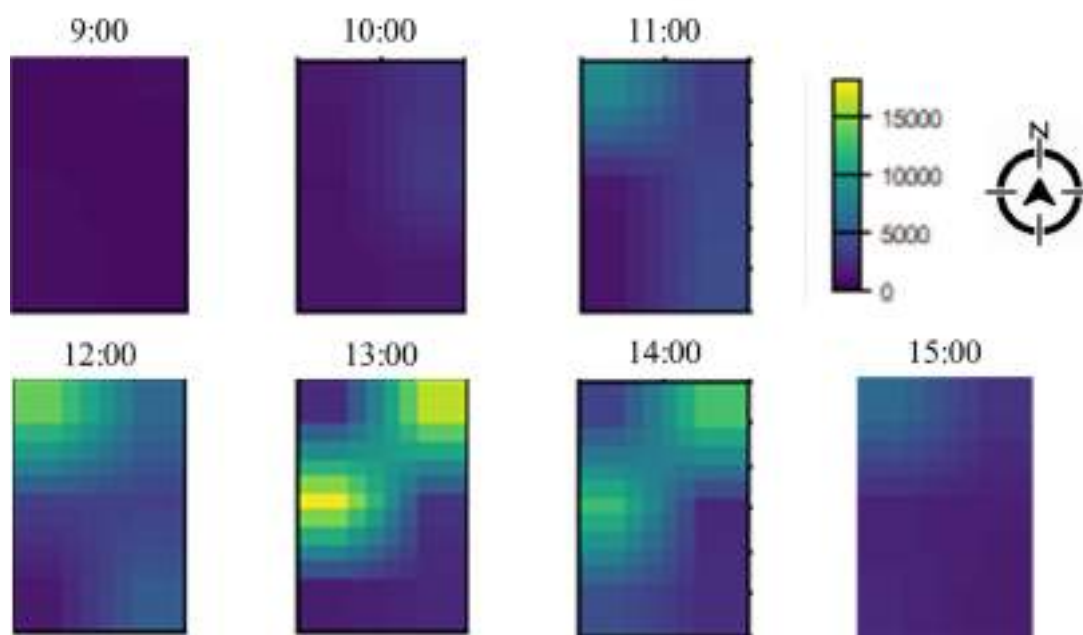


Figura 10: Distribución de  $E_h$  promedio para cada una de las horas del periodo analizado. La escala se encuentra en unidades de  $E_h$  (lx).

Tabla 4: Valores  $U_o$  hora a hora.

| hora        | 9:00 | 10:00 | 11:00 | 12:00 | 13:00 | 14:00 | 15:00 |
|-------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| uniformidad | 0.81 | 0.62  | 0.40  | 0.27  | 0.22  | 0.28  | 0.52  |

## DISCUSIÓN

Con la finalidad de enriquecer el artículo en la Figura 11 se observan las curvas de  $E_h$  en el mismo escenario y condiciones de medición sin sistema de sombreado para los puntos críticos (más próximos a la ventana). Esto nos permite observar que la cortina dual reduce el ingreso de radiación solar visible respecto al mismo escenario sin sistema de sombreado. Esto se verifica si consideramos que para el escenario sin sistema los valores máximos de  $E_h$  se ubican entre los 30000 y los 36000 lx, mientras que en el escenario con cortina dual los valores máximos de  $E_h$  para los mismos puntos se encuentran próximos a los 17500 lx. Sin embargo, este valor de  $E_h$  sigue siendo excesivo en términos de confort visual. Estos valores elevados de  $E_h$  se deben al elevado factor de apertura que presenta el tejido en la franja transparente (48%). Esto se explica con mayor fundamento si consideramos que la bibliografía internacional (Villalba et al. 2024) afirma que los valores recomendados de FA, para cortinas tipo roller, están entre el 2 y el 3%; en posiciones más alejadas de las ventanas, el FA puede llegar hasta el 5%.

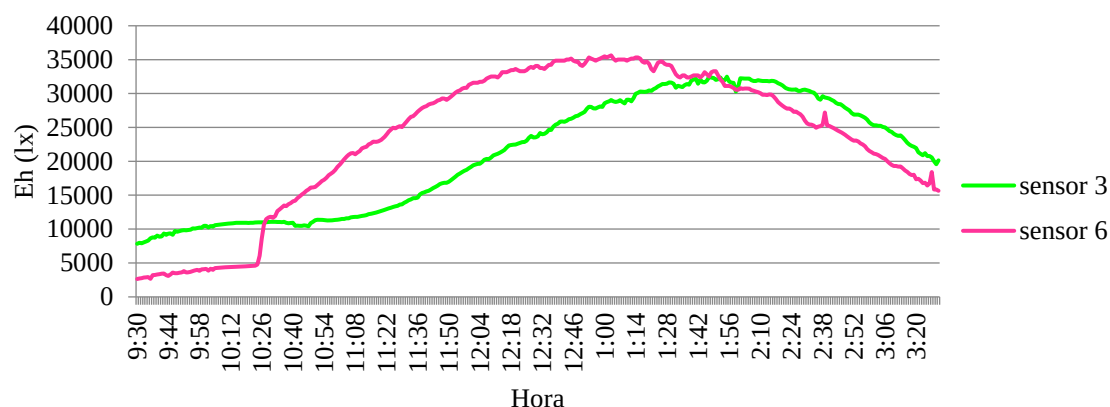


Figura 11:  $E_h$  registrada en los puntos 3 y 6 analizados entre las 9:30 y las 15:30 sin sistema de sombreado.

Otro punto que resulta interesante de considerar es que, las cortinas duales y los estantes de luz comparten una estructura similar, ya que ambos combinan zonas opacas con zonas de elevada transparencia. En las cortinas analizadas en este estudio, las franjas opacas están conformadas de tela translúcida ( $\tau_v 0\%$ ), mientras que las transparentes son de un tejido con un elevado FA (48%). Por otro lado, los estantes de luz utilizan material opaco con un acabado metálico o blanco que intercalan con un espacio libre (zona transparente). Sin embargo, su funcionamiento es distinto. La disposición horizontal de los estantes de luz redirige la radiación solar fuera del plano de trabajo. En contraste, la disposición vertical de las franjas en las cortinas duales no cumple esta función. Esto permite que una cantidad significativa de radiación solar directa incida sobre el plano de trabajo, como se muestra en la Figura 12.

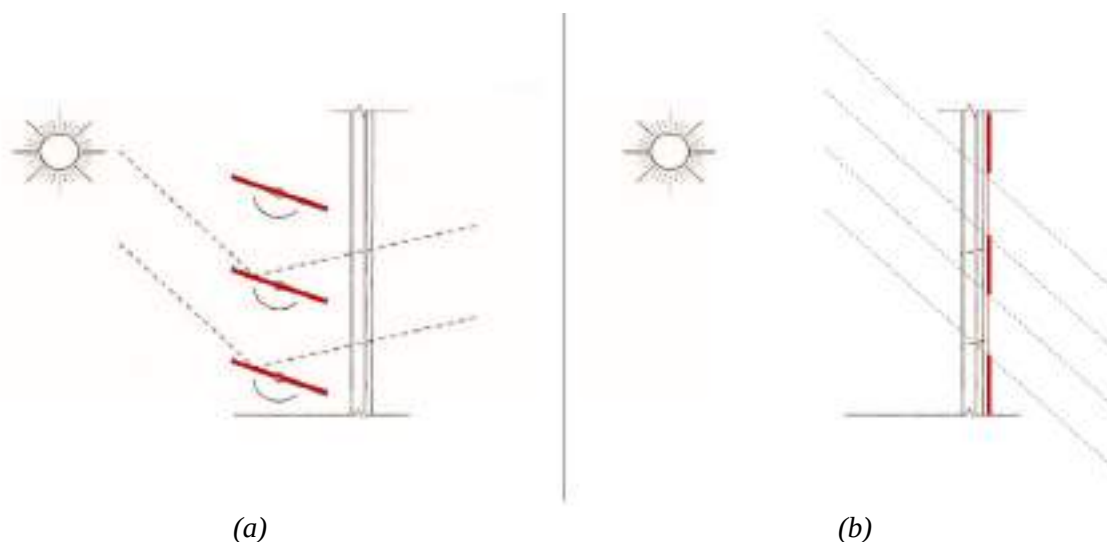


Figura 12: esquema de la interacción de la radiación solar directa con un sistema de estantes de luz (a); esquema de la interacción de la radiación solar directa con una cortina dual (b).

## CONCLUSIÓN

Este estudio analiza el comportamiento lumínico de las cortinas textiles duales y su impacto en la disponibilidad y uniformidad de la luz natural, mediante medición en espacio real. El trabajo muestra que las cortinas duales, cuando se disponen en posición abierta, no controlan el ingreso de la radiación solar en el rango visible, exponiendo a los usuarios a situaciones de deslumbramiento y elevados contrastes repentinos, difíciles de procesar por el sistema visual. Es importante destacar que este tipo de cortinas son promocionadas como una solución que permite apreciar el paisaje exterior y al mismo tiempo ofrece un excelente control de la entrada de luz. Sin embargo, la apreciación del paisaje es solo posible cuando están abiertas, momento en el que el control de la iluminación natural no es eficiente.

Además, es fundamental destacar que considerar estos sistemas como láminas de transmitancia visible homogénea es un error. El FA, equivalente a la transmitancia visible normal/normal de los tejidos, es una de las propiedades ópticas que más impacto tiene en los espacios con cortinas textiles, como el analizado en este trabajo. Este punto es importante al analizar el desempeño de estos sistemas en entornos de simulación, ya que a menudo se los caracteriza como láminas con transmitancia homogénea que generan espacios uniformes, lo cual no es acertado, como se demuestra en este estudio. La caracterización y modelización de su comportamiento óptico para simulaciones de iluminación natural dinámica no son sencillas, pero es primordial realizarla correctamente para obtener resultados comparables con el desempeño de estos sistemas en espacios reales.

Finalmente, es importante destacar el valor de las investigaciones que analizan el impacto de las tecnologías de protección solar locales en el confort lumínico interior. Estos estudios deben caracterizar el comportamiento de dichos sistemas en función de diversos parámetros, como los tipos de cielo, las estaciones del año y las orientaciones. Este enfoque permitirá generar recomendaciones precisas para su aplicación, garantizando una implementación efectiva en términos de confort visual y eficiencia

energética. En el futuro, se planea analizar el desempeño lumínico de las cortinas duales en otras posiciones (cerrada y semi-abierta) durante distintas épocas del año.

## AGRADECIMIENTO

Agradecemos a la empresa DINO CONTE por dejar al costo la cortina dual empleada en este estudio y proveer de manera gratuita la instalación de la misma.

## FUENTES DE FINANCIAMIENTO

Fundación Williams: Fondos Complementarios para la Investigación: Diseño sustentable del hábitat construido. Valoración termo-lumínica de tecnologías de la envolvente urbano-edilicia / CONICET: PIBBA 0915 CONICET: Diferencias en la adaptación visual bajo dos climas luminosos diferentes y su influencia en la percepción de deslumbramiento molesto en oficinas. / ANPCYT: PICT 2019-04356 Desarrollo de indicadores y métricas de Iluminación natural integrativa en climas soleados para el diseño de ambientes visuales productivos, confortables y saludables.

## REFERENCIAS

- Agencia Internacional de Energía (IEAa) [en línea] Buildings, Dirección URL: <<https://www.iea.org/energy-system/buildings>> [consulta: 10 de agosto de 2025].
- Agencia Internacional de Energía (IEAb) [en línea] Building Envelopes, Dirección URL: <<https://www.iea.org/energy-system/buildings/building-envelopes>> [consulta: 10 de agosto de 2025].
- Al-Masrani SM. y Al-Obaidi KM. (2019). Dynamic shading systems: A review of design parameters, platforms and evaluation strategies. *Automation in construction* 102, 195–216.
- Alva M., Vlachokostas A. y Madamopoulos N. (2020). Experimental demonstration and performance evaluation of a complex fenestration system for daylighting and thermal harvesting. *Solar Energy* 197, 385–395.
- Athienitis AK. y Tzempelikos A. (2002). A methodology for simulation of daylight room illuminance distribution and light dimming for a room with a controlled shading device. *Solar Energy* 72, 4, 271-281.
- Brembilla E., Chi DA., Hopfe CJ., et al. (2019). Evaluation of climate-based daylighting techniques for complex fenestration and shading systems. *Energy and Buildings* 203, 109454.
- Chan YC., Tzempelikos A. Y Protzman B. (2014). Solar optical properties of roller shades: modeling approaches, measured results and impact on energy use and visual comfort. En: 3rd International High Performance Buildings Conference, West Lafayette, Indiana, USA. 14-17 julio.
- Comisión Internacional de Iluminación (CIE). (2004). CIE 15: Technical Report: Colorimetry, 3ra edición.
- Deneyer A., Deroisy B., Lethé G. y Flamant G. (2013). Bi-directional scattering distribution data of solar shading: Characterization and performances. En: CIE Centenary Conference "Towards a New Century of Light", Paris, Francia. 15-16 abril.
- Deroisy B., Deneyer A., Lethe G. y Flamant G. (2013). Performance analysis of common solar shading devices: experimental assessment and ray-tracing calculations using bi-directional scattering distribution data. En: Lux Europa, Krakow, Polonia. 16-19 septiembre.
- Fontoynt, M. (1999). Daylight performance of buildings, 1ª edición. James and James, London.
- IRAM/AADL. (2021). Iluminación. Iluminación de lugares de trabajo en interiores. Requisitos y niveles de iluminación. Norma IRAM/AADL J 2006:2021.
- Jonsson JC., Lee ES. Y Rubin M. (2008). Light-scattering properties of a woven shade-screen material used for daylighting and solar heat-gain control. En: SPIE 7065, Reflection, Scattering, and Diffraction from Surfaces 2008, Vol. 7065, p. 70650R.
- Karmann, C., Wienold, J., Garreton, J. A. Y., Villalba, A. M., Pattini, A. E., y Andersen, M. (2025). User Evaluations of Fabric Shades with Sun in the Field of View: Glare Model Performance and Implications for EN14501 Classification. *Building and Environment* 282, 113259.

- Klems JH. (1994). A New Method for Predicting the Solar Heat Gain of Complex Fenestration Systems I. Overview and Derivation of the Matrix Layer Calculation. En: ASHRAE Winter Meeting, New Orleans, Los Angeles, EEUU. 22-26 enero.
- Konstantoglou M. y Tsangrassoulis A. (2016). Dynamic operation of daylighting and shading systems: A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 60, 268–283.
- Kotey NA., Wright JL. y Collins MR. (2009). Determining off-normal solar optical properties of roller blind materials. *ASHRAE Transactions* 115, 145–154.
- Mashaly, I. A., Garcia-Hansen, V., Cholette, M. E., y Isoardi, G. (2021). A daylight-oriented multi-objective optimisation of complex fenestration systems. *Building and Environment* 197, 107828.
- McNeil A., Jonsson CJ., Appelfeld D., et al. (2013). A validation of a ray-tracing tool used to generate bi-directional scattering distribution functions for complex fenestration systems. *Solar Energy* 98, 404–414.
- Monteoliva, JM. y Pattini A. (2014). Iluminancia/irradiancia en la estación de medición IDMP-CCT CONICET Mendoza. En: 5° Congreso Internacional Solar Cities “Energía en las ciudades: innovación frente al cambio climático” Centro Metropolitano de Diseño Buenos Aires, Argentina. 17-18 noviembre.
- Nabil A. y Mardaljevic J. (2005). Useful Daylight Illuminance: A New Paradigm to Access Daylight in Buildings. *Lighting Research and Technology* 37, 1, 41–59.
- Ruck N., Aschehoug O., Aydinli S., Christoffersen J., Courret G., Edmonds I., Jakobiak R., Kischkoweit-Lopin M., Klinger M., Lee E., Michel L., Scartezzini J.L. y Selkowitz, S. (2000). Daylight in buildings. A source book on daylighting systems and components. Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory – International Energy Agency, Solar Heating and Cooling Programme, SHC, Energy Conservation in buildings and Community Systems Programme.
- Villalba, A., Monteoliva, J.M. y Pattini, A. (2017) Caracterización de cortinas textiles en la simulación de iluminación natural. *Energías Renovables y Medio Ambiente* 40, 49-58.
- Villalba, A., Yamín Garretón, J. y Pattini, A. (2024). Effect of fabric shades optical properties on indoor daylighting conditions: An overview. *Journal of Building Engineering* 97, 110695.
- Yamín Garretón J., Villalba A.M., Rodríguez R.G. y Pattini, A. (2021). Roller blinds characterization assessing discomfort glare, view outside and useful daylight illuminance with the sun in the field of view. *Solar Energy* 213, 91–101.
- Ward GJ, Wang T, Geisler-Moroder D, et al. (2021). Modeling specular transmission of complex fenestration systems with data-driven BSDFs. *Building and Environment* 196, 107774.
- Wang, Y., Yang, W., & Wang, Q. (2022). Multi-objective parametric optimization of the composite external shading for the classroom based on lighting, energy consumption, and visual comfort. *Energy and Buildings* 275, 112441.

## **CHARACTERIZATION OF THE LUMINOUS BEHAVIOR OF DUAL-LAYER TEXTILE BLINDS: IMPACT ON THE AVAILABILITY AND UNIFORMITY OF DAYLIGHT.**

**ABSTRACT:** The general objective of this study is to generate knowledge about the luminous behaviour of building envelope components. The purpose is to contribute to the design and application of successful technological solutions that prioritize human needs and promote significant energy savings. Specifically, this work focuses on determining the impact of dual-layer textile blinds on the daylight factor in interior spaces, concentrating on the availability and uniformity of natural light. A black dual-layer blind in the open position was selected as the case study. The methodology included recording horizontal illuminance values, characterizing the optical properties of the measurement room, monitoring exterior sky conditions, and processing the horizontal illuminance data in R+. The main results show that the dual-layer blind reduces the entry of visible solar radiation compared to the same scenario without a shading system. However, this study demonstrates that dual shades, when in the open position, do not effectively control the entry of visible solar radiation. This exposes users to glare and high sudden contrasts that are difficult for the visual system to process.

**Keywords:** daylight, shading device, dual shade



## **SOLUCIONES BASADAS EN LA NATURALEZA COMO ESTRATEGIA DE CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA EN VIVIENDAS MÁSICAS. SISTEMAS DE ENVERDECIMIENTO VERTICAL**

**Pablo Suárez<sup>1,2</sup>, Claudia Martínez<sup>1,3</sup>, Érica Correa<sup>1,3</sup>**

<sup>1</sup> Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE) Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) Centro Científico Tecnológico Mendoza. C. P. 5500 – Mendoza.

Teléfono +54 261-5244050 e-mail: [psuarez@mendoza-conicet.gob.ar](mailto:psuarez@mendoza-conicet.gob.ar)

<sup>2</sup> Facultad de Ambiente Arquitectura y Urbanismo, Universidad de Congreso. Mendoza Argentina.

<sup>3</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza Argentina.

**RESUMEN:** La estrategia de conservación de energía más usada en arquitectura es la incorporación de aislantes tradicionales a los paquetes constructivos. Los Sistemas de Enverdecimiento Vertical (SEV) constituyen una alternativa basada en la naturaleza, que contribuyen a recuperar los ecosistemas degradados. Esta investigación evalúa la eficiencia de las Fachadas Verdes Tradicionales (FVT) para reducir consumos energéticos en verano de una vivienda unifamiliar en planta baja y perímetro expuesto en el Área Metropolitana de Mendoza, y comparar su prestación con el de una tecnología de aislación tradicional (Poliestireno Expandido-EPS). Metodológicamente se estructura en tres etapas: caracterización de las propiedades opto-térmicas de las FVT, determinación del ahorro energético asociado a su implementación, mediante simulación térmica con EnergyPlus<sup>TM</sup>, y la contrastación de los resultados alcanzados con los derivados del uso de EPS. Se observa que aislar la totalidad de los muros exteriores de un ambiente con FVT y EPS, genera ahorro energético en días estivales con temperaturas promedio hasta 59.8 % y 92.2 % respectivamente. Se identifica que las posibilidades de ahorro energético que ofrece la FVT dependen de la magnitud de las temperaturas exteriores y que su uso es más efectivo en climas áridos con altos niveles de irradiancia solar y cielos despejados.

**Palabras clave:** sistemas de enverdecimiento vertical, ahorro de energía, arquitectura sustentable, desarrollo sostenible, simulación térmica, fachadas verdes.

### **INTRODUCCIÓN**

Las ciudades de América Latina y el Caribe poseen una población urbana residencial del 81%, esto implica una alta vulnerabilidad a los efectos del calentamiento global y el riesgo frente a eventos climáticos de calor extremo pronosticados por el IPCC (2022). Para restablecer el equilibrio entre entorno natural y hábitat construido, y mitigar las emisiones de carbono, es necesario adoptar tecnologías que promuevan una urbanización sostenible y tiendan a la transición energética hacia energías renovables. En este sentido los sistemas basados en la naturaleza, entre los que se encuentran los Sistemas de Enverdecimiento Vertical (SEV), constituyen una alternativa natural a la estrategia de conservación térmica con aislantes tradicionales. Los SEV han mostrado un crecimiento sostenido en su estudio y utilización en los últimos años (Bustami et al., 2018; Suárez et al., 2024).

En Argentina, existen en el mercado diversas opciones de aislamiento térmico para construcciones, siendo el poliestireno expandido el más comúnmente utilizado por su bajo costo. Se ha demostrado su eficiencia térmica y efectividad de aislación ante diversas condiciones climáticas (Khoukhi, 2019). Sin embargo, el análisis de ciclo de vida de este aislante artificial muestra que son intensivos en emisiones contaminantes a la atmósfera (Y. S. Lim, 2021). Además, su aplicación en climas áridos con altas amplitudes térmicas trae aparejado el problema del sobrecalentamiento durante días cálidos en verano



y estaciones intermedias. Esto se produce porque la baja conductividad de estos materiales evita el refrescamiento nocturno de la masa de la envolvente elevando la temperatura de aire interior promedio diaria de los ambientes habitables.

Dentro de las nuevas tecnologías basadas en la naturaleza, las Fachadas Verdes Tradicionales (FVT) están compuestas por plantas trepadoras que se adosan a la pared del edificio sin espacio de separación entre ésta y el follaje. Los beneficios térmicos de las tipologías de FV son el sombreado y el enfriamiento por evapotranspiración, siendo el primero el que tiene mayor relevancia en el potencial para la mitigación de la isla de calor urbana y el ahorro de energía en edificios (Pérez et. al., 2017). Esto es importante para ciudades en contexto de aridez, por la alta incidencia de radiación solar sobre la envolvente arquitectónica y por presentar elevadas temperaturas de aire en verano. Esto se demuestra en Djedjig et. al. (2015) donde informan magnitudes de ahorro entre 37.3 % y 50.6 % para un edificio educacional de tres pisos con las fachadas Este y Oeste protegidas con FVT para dos tipos de clima: oceánico (Cfb) y semiárido cálido (Bsh). Además, a diferencia de los aislantes tradicionales, el uso de plantas en los edificios tiene una efectividad en la captura de CO<sub>2</sub> de hasta 28.2 Kg/m<sup>2</sup> por año (Jozay, 2024).

El Área Metropolitana de Mendoza (AMM) donde se localiza esta investigación, se emplaza en el centro Oeste de la República Argentina (32.5° Latitud Sur, 68.5° Longitud Oeste). Su clima es árido-desértico -BWk, Köppen-Geiger clasificación climática-. Se caracteriza por veranos calientes e inviernos fríos, con elevados valores de amplitud térmica diaria y estacional. Su microclima presenta altos niveles de irradiancia solar -principalmente en los planos orientados al este y al oeste-, bajas velocidades de viento y escasas precipitaciones. Como consecuencia, la magnitud de su Isla de Calor alcanza los 10 °C, lo que aumenta un 20% la demanda de energía auxiliar para refrigeración (Correa et. al., 2012).

En el AMM se distinguen dos áreas de desarrollo, el casco urbano consolidado donde se concentran las principales actividades económicas, comerciales y de servicios; y la periferia de la ciudad, donde domina el uso residencial. La tipología de vivienda unifamiliar representa el 98% de las edificaciones destinadas a este uso, siendo la vivienda colectiva -bloques o torres- una tipología marginal (Pujol & Bisbal-grandall, 2019). En términos de materialidad, el sistema constructivo es del tipo másico y de producción local, conformado por tabiques de ladrillo cocido y estructura de hormigón armado. Una estrategia ampliamente difundida para mejorar la aislación térmica de esta tecnología constructiva es la aplicación de dos capas exteriores a la mampostería: una capa de aislante de poliestireno expandido -EPS- protegido exteriormente con otra capa de mortero, cuyos espesores oscilan entre 3-5cm y entre 2- 3cm, respectivamente (Esteves et. al., 2009; Mazzocco et. al., 2018).

### ***Objetivo del trabajo***

El objetivo de este trabajo es determinar la magnitud de la incidencia del uso de FVT sobre la demanda de energía de una vivienda másica representativa de la tipología residencial más frecuente en el área metropolitana de Mendoza en la estación estival. Se busca comparar la prestación de la FVT como estrategia de conservación versus la de una estrategia tradicionalmente utilizada como es el uso de aislantes térmicos.

### **METODOLOGÍA**

El estudio se estructura en tres instancias metodológicas. La primera busca establecer el conjunto de propiedades ópticas y térmicas que representan el comportamiento de una FVT a fin de insertar este modelo en el software de simulación EnergyPlus<sup>TM</sup>. Para ello se lleva a cabo una medición, simulación y ajuste de un ensayo experimental en condiciones controladas a fin de integrar la FVT a los modelos de simulación dinámica de comportamiento térmico de edificios. La segunda instancia persigue identificar, monitorear y simular un caso de la tipología residencial representativa del área de estudio -vivienda unifamiliar en contexto de baja densidad- para, posteriormente evaluar los beneficios termo-energético de la implementación de la FVT. Finalmente, la tercera instancia tiene por objetivo identificar el ahorro energético asociado al uso de las FVT en verano, comparando además su desempeño con el de un aislante tradicional utilizado en el medio local, el poliestireno expandido -EPS-.

### ***Desarrollo de un procedimiento para la determinación de las propiedades de la FVT***

Para determinar el conjunto de propiedades ópticas y térmicas que representan el comportamiento de una FVT, a fin de insertar la tecnología en el software de simulación, se midió y ajustó un ensayo experimental en condiciones controladas durante el verano 2022. El mismo se ubica en el área experimental del CCT CONICET, situado a 2 kilómetros al oeste del microcentro de Mendoza, Argentina. Ver Fig. 1 (a). Comprende dos muros de mampostería orientados al Oeste (orientación más desfavorable en verano), aislado en el resto de sus caras para conformar una cámara de aire interior. El primer muro está cubierto con una FVT -Pandorea jazminoides “bignonia blanca”- (MB) que reportó mejor comportamiento entre las especies trepadoras evaluadas (Suárez, 2024). El otro muro se encuentra sin cobertura vegetal y se denomina muro testigo (MT). Ver Fig. 1 (b). La especie trepadora fue seleccionada en función de su adaptación al clima local, el desarrollo de una cobertura foliar próxima al 90% y un valor de espesor vegetal promedio de 0,27 m (Suárez et. al., 2023).



*a- Ubicación del ensayo en el AMM* *b- Ensayo experimental*  
**Figura 1: a- Ubicación del ensayo experimental; b- Ensayo experimental. Fuente: elaboración propia.**

Los muros fueron monitoreados durante febrero de 2022 en 4 días de análisis representativos del clima local (cálidos y con cielo despejado). Los sensores utilizados se colocaron a alturas de 1,30 m de altura en la cámara aire y a 1,60 m de altura en el espacio exterior. Las dimensiones del ensayo están en el rango de medidas observadas en modelos experimentales similares reportados en la bibliografía internacional (Coma et al., 2017; Vox et. al, 2018; Zhang et al., 2022). Los detalles del monitoreo y el ajuste se detallan en Suarez (2024).

Se realiza una modelización térmica mediante el software EnergyPlus™ para ajustar la curva de los valores de temperatura del aire interior resultante de la simulación a los valores monitoreados en los boxes de ensayo. Este procedimiento se divide en dos etapas, la primera consiste en el ajuste del muro de mampostería -MT- en el cual apoyará la vegetación, con el objetivo de caracterizar las propiedades opto-térmicas reales de los muros construidos como soporte de la FVT. Y una segunda etapa donde se cargan las propiedades obtenidas del ajuste del muro testigo y se ajusta la curva de temperatura interior del muro con la FVT -MB- mediante simulación. Las propiedades de la FVT cargadas en el simulador y resultantes del proceso experimental de ajuste son semejantes a una capa exterior aislante al paquete constructivo del muro de mampostería, entre las más relevantes se encuentra: espesor 0.03m, densidad 1000 Kg/m<sup>2</sup>, conductividad 1 W/m°K y calor específico 2000 J/Kg°K y un valor de transmitancia solar de 0.34.

### ***Monitoreo y ajuste de la tipología residencial***

Se establecen dos criterios de selección de caso para asegurar representatividad dentro del ámbito residencial en el AMM. El primero identifica el entorno urbano que tenga un mayor desarrollo en la última década. Esto se refleja en el área de baja densidad constructiva ( $< 2\text{m}^3/\text{m}^2$ ) que se ubica en la periferia de la ciudad. El segundo criterio considera la tipología edilicia con mayor presencia en la trama urbana, que es la de vivienda en un nivel con perímetro expuesto y posibilidades de incorporación de la estrategia de FVT. Por tanto, el caso de estudio seleccionado corresponde a una vivienda unifamiliar de sistema constructivo másico en planta baja, de perímetro expuesto y que ofrece posibilidades viables para la incorporación de la estrategia de FVT.

Para asegurar la validez de los resultados, el modelo de simulación sin la aplicación de estrategias fue ajustado contrastando la curva de temperatura del aire interior medida, con la obtenida mediante simulación. Los valores analizados corresponden a los resultados registrados en un espacio de la tipología -zona térmica-.

Luego de ajustar la vivienda con los datos cargados en el simulador, se evalúa sobre este modelo, y mediante EnergyPlus<sup>TM</sup>, el impacto termo-energético de la aplicación de FVT y EPS en la envolvente. La vivienda se localiza a 18 km del microcentro de la ciudad, hacia la periferia urbana -33°1'48.03"S, 68°54'20.84"O-. Su microclima muestra una elevada amplitud térmica, máximas y mínimas temperaturas más moderadas que en áreas centrales del AMM donde se encuentra la mayor densidad poblacional. Ver Fig. 2 (a). La edificación analizada presenta las caras Norte y Oeste con plena exposición solar y las caras Sur y Este en sombra debido a la incidencia de la vegetación colindante. Ver Fig. 2 (b).

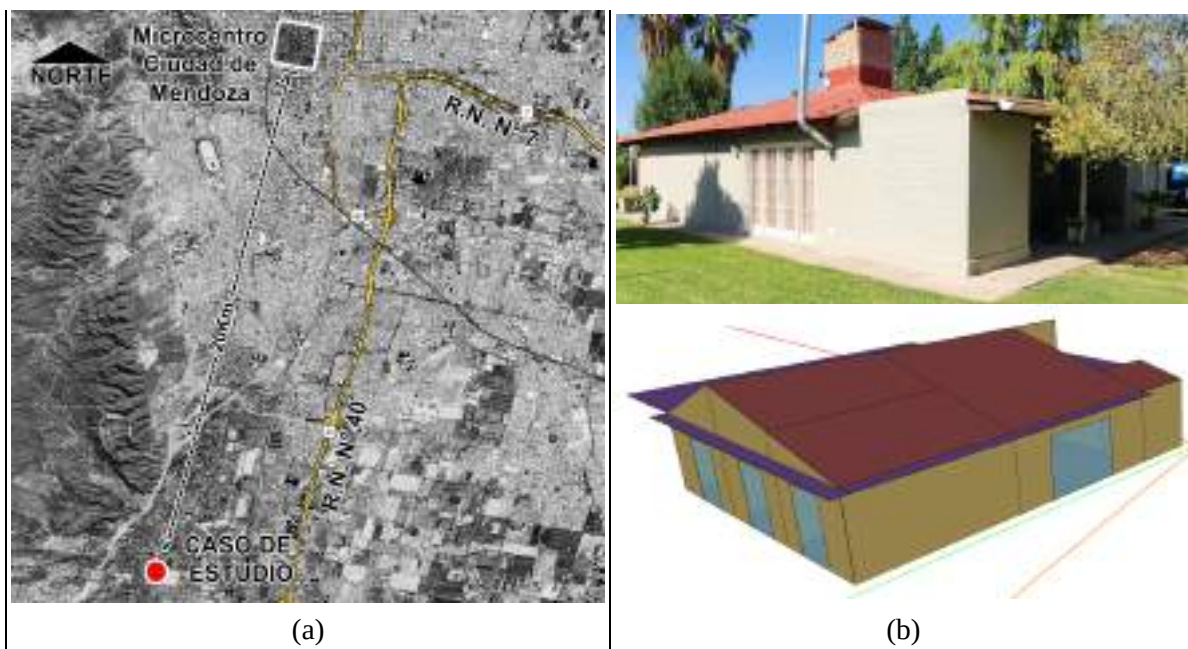


**Figura 2: Ubicación (a) y Tipología de vivienda unifamiliar másica de perímetro expuesto (b).**

La vivienda se monitorea durante 4 días del mes de febrero (verano) -13/02/23 al 16/02/23-. Las variables medidas son temperatura y radiación solar en el espacio exterior; y en el interior del ambiente interior estudiado. Esta zona térmica ajustada, en la cual se realizan las simulaciones, corresponden al DORMITORIO 1. Considerando que en términos de materialidad la casa muestra los mismos paquetes constructivos para pisos, muros y techos, la elección de este ambiente está asociada a su condición térmica más demandante frente al resto de los ambientes. Primeramente, porque es el espacio con mayor proporción de muro orientado al Oeste respecto a su volumen de aire interior y en segundo lugar, por ser el ambiente con mayor superficie de envolvente expuesta al exterior y a la radiación solar -cubierta, muro Norte y muro Oeste-. Dada esta condición, es esperable que la aplicación de estrategias

conservativas en la cara externa de la envolvente del espacio propuesto muestre las mayores magnitudes de ahorro energético. Ver Fig. 3 (a).

Los datos se registran cada 15 minutos. Los sensores utilizados son del tipo termistor -HOBO Onset, MX2201- (colocado a 1,60 m de altura en el interior de la vivienda) y estación meteorológica del tipo U30 USB Weather Station (ubicada en un espacio de plena exposición solar en el patio de la misma). Ver Fig. 3 (b).

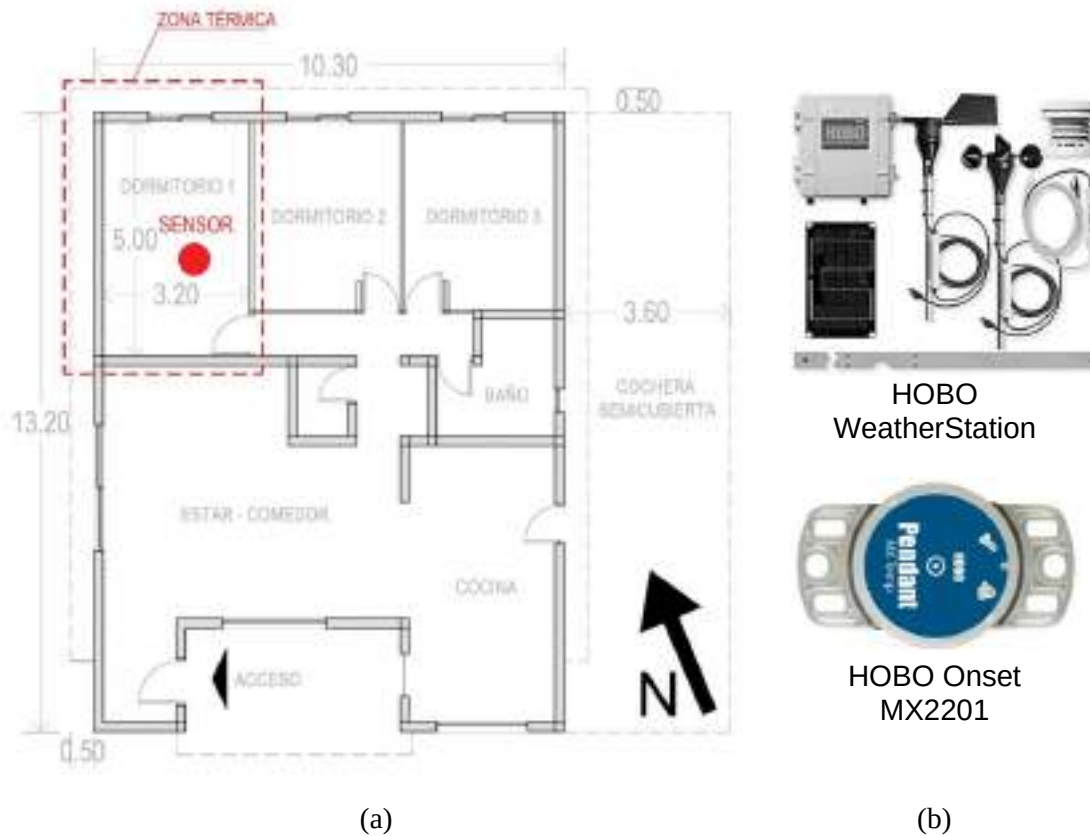


Figura 3: Zona térmica evaluada (a) y equipamiento utilizado (b).

Como puede observarse a continuación, los días seleccionados y medidos en el entorno microclimático, son representativos de días cálidos y con cielo claro en verano para el AMM. Ver Fig. 4.



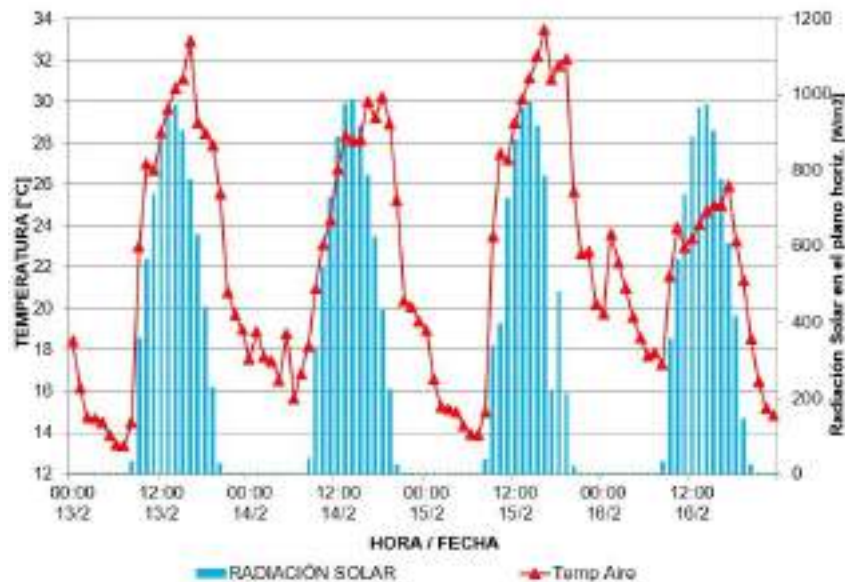


Figura 4: Curvas correspondiente temperatura y radiación solar en el período monitoreado.

### **Determinación del impacto energético asociado al uso de las FVT en verano**

Se programa la temperatura de termostato del simulador en 24°C, temperatura de confort sugerida para determinar los consumos de energía en refrigeración para el verano. Posteriormente, se corren simulaciones tanto con FVT como con EPS aplicados en toda la envolvente edilicia, con el objeto de identificar magnitudes de reducción de consumo energético en distintos escenarios de temperatura ambiente exterior.

Se plantean tres escenarios distintos correspondientes a días diferentes dentro del archivo climático -epw-: a) un día que registra altas temperaturas de verano correspondiente al TMY 2003-2017, 11 de enero; b) un día que reporta temperaturas medias correspondientes a la estación de verano del TMY 2003-2017, 16 de enero; c) un día de verano configurado a partir de los datos microclimáticos monitoreados en los alrededores de la vivienda, 14 de febrero. El primero representa las temperaturas máximas registradas en el AMM; el segundo las temperaturas promedio históricas; y el tercero variables medidas en el microclima local. Al incorporar los dos primeros se obtienen resultados representativos de dos días de verano característicos de la última década, uno con mayor demanda energética (más cálido) y el otro, de mayor ocurrencia. Y el último, permite obtener resultados que reflejan la respuesta de las estrategias en condiciones del entorno microclimático actual. Ver Fig. 5.

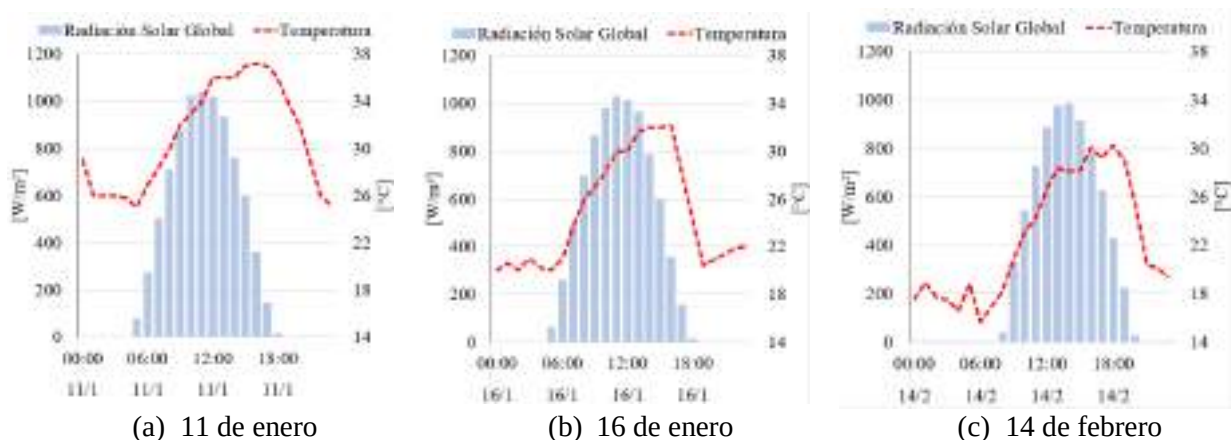


Figura 5: Temperatura y la radiación solar global durante los días de análisis. (a) 11 de enero; (b) 16 de enero, (c) 14 de febrero.



Los valores de temperatura máximos y mínimos de los días analizados se muestran en la Tabla 1, en comparación con datos de temperaturas máximas y promedio históricas registrados por el SMN para el área de estudio (Estadísticas climatológicas 1991-2020).

Tabla 1: característica de los días de análisis y datos del SMN

|                               | Temp.<br>máx. | Temp.<br>mín. | Temp.<br>máxima<br>media<br>(SMN) | Temp.<br>mínima<br>media<br>(SMN) | Temp.<br>máxima<br>extrema<br>(SMN) |
|-------------------------------|---------------|---------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| Altas temperaturas: 11/01     | 37.2          | 25.0          |                                   |                                   |                                     |
| Temperaturas promedio: 16/01  | 32.1          | 20.0          | 30.7                              | 18.3                              | 40.2                                |
| Temperatura microclima: 14/02 | 30.2          | 15.7          |                                   |                                   |                                     |

### RESULTADOS

Los resultados del ajuste y simulación de los muros de ensayo en condiciones controladas, y la medición, ajuste y simulación de la tipología edilicia residencial elegida, se organiza en tres etapas:

- Determinación de las propiedades ópticas y térmicas representativas del comportamiento de la FVT en el modelo experimental, simuladas en el software EnergyPlusTM.
- Ajuste y validación del modelo térmico de vivienda másica en planta baja de perímetro expuesto.
- Análisis del ahorro energético estival derivado del uso de dos tecnologías en la envolvente; FVT y EPS.

#### Determinación de las propiedades opto-térmicas que caracterizan la FVT

Se construye en el software EnergyPlus<sup>TM</sup> un modelo representativo de las características ópticas y térmicas de la FVT con la especie trepadora que reportó mejor desempeño térmico y vegetativo (espesor y cobertura) durante el verano 2022 (Pandorea jasminoides “bigonia blanca”) -MB- en el ensayo en condiciones controladas. Posteriormente, el modelo ajustado indicado en forma previa se utiliza para caracterizar el funcionamiento de la FVT -MB- durante el verano y para los cuatro días analizados. Ver Fig. 6. En el ajuste final del muro con cobertura de FVT, los resultados de la temperatura ambiente interior en la cámara de aire simulada contrastada con la medida muestra un Coeficiente R2 de 0.98.

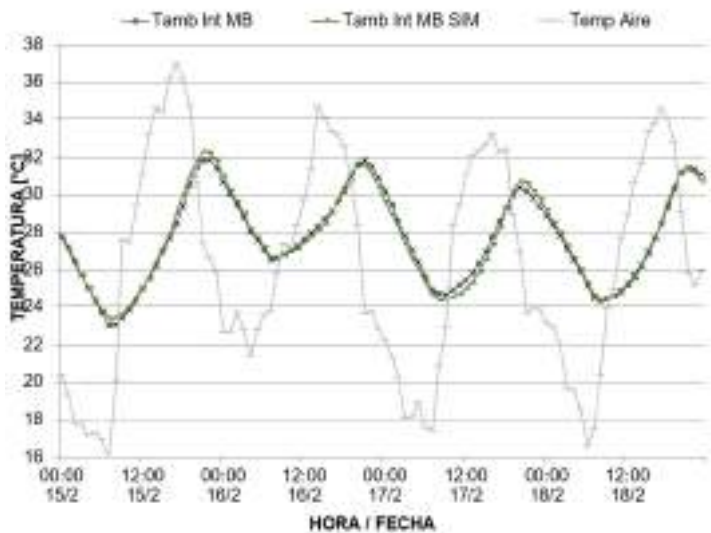


Figura 6: Temperatura medida (Tamb MB) y Temperatura simulada (Tamb MB SIM) en la cámara de aire.

A continuación, las propiedades opto-térmicas de la FVT ajustadas mediante simulación se extrapolan a la tipología de vivienda en estudio.

### **Caso de estudio: Ajuste y validación del modelo térmico**

Este modelo se valida mediante mediciones higro-térmicas in situ en el interior de la vivienda y su posterior ajuste, específicamente en un dormitorio inhabitado con orientación Norte y Oeste. Los resultados muestran un R2 de 0.97. Ver Fig. 7.

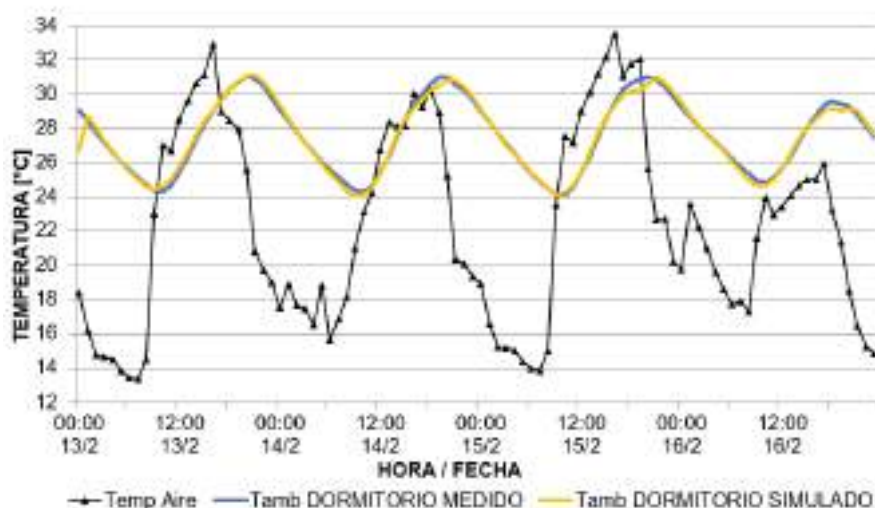


*Figura 7: temperatura ambiente interior simulada contrastada con la medida*

El paquete constructivo de la envolvente vertical de la vivienda es del tipo másico con muros de ladrillo, que es la tecnología constructiva de mayor difusión en el país. Esta tecnología es adecuada al clima de localización de la vivienda dado que ofrece la ventaja de la masa térmica cuya inercia permite amortiguar las oscilaciones de temperatura día/noche características de la región. Esto contribuye a disminuir la amplitud térmica interior de la vivienda y mejora las condiciones de confort interior aprovechando los beneficios de la acumulación térmica como mecanismo de acondicionamiento bioclimático de la misma. Sumado, esta tecnología ofrece posibilidades de mejorar su desempeño térmico mediante aislación exterior, ya sea mediante la aplicación de los aislantes tradicionales o las nuevas tecnologías de enverdecimiento vertical, oportunidad que no ofrecen las tecnologías livianas de construcción de viviendas. Por todo lo expuesto se considera que el caso es representativo y su elección es oportuna para verificar los beneficios que ofrecen las FVT. Se especifican las propiedades másicas de los materiales de construcción empleados en el modelo de simulación en la Tabla 2.

*Tabla 2: características másicas de los materiales empleados en EnergyPlus<sup>TM</sup>*

| Capa          | Rugosidad | Espesor [m] | Conductividad [W/m°K] | Densidad [kg/m3] | Calor específico [J/Kg°K] | Absortancia solar |
|---------------|-----------|-------------|-----------------------|------------------|---------------------------|-------------------|
| MURO -EXT-    |           |             |                       |                  |                           |                   |
| Revoque ext.  | Liso      | 0.02        | 1.16                  | 1900             | 1000                      | 0.8               |
| Ladrillón     | Liso      | 0.18        | 1.5                   | 1800             | 800                       | 0.85              |
| Revoque int.  | Liso      | 0.02        | 1.16                  | 1900             | 1000                      | 0.8               |
| MURO -INT-    |           |             |                       |                  |                           |                   |
| Revoque       | Liso      | 0.02        | 1.16                  | 1900             | 1000                      | 0.8               |
| Ladrillón     | Liso      | 0.18        | 1.5                   | 1800             | 800                       | 0.85              |
| Revoque       | Liso      | 0.02        | 1.16                  | 1900             | 1000                      | 0.8               |
| TECHO         |           |             |                       |                  |                           |                   |
| Teja cerámica | Rugoso    | 0.02        | 0.7                   | 1650             | 920                       | 0.8               |
| Lana vidrio   | Liso      | 0.01        | 0.041                 | 100              | 750                       | 0.7               |

|            |        |       |      |      |      |     |
|------------|--------|-------|------|------|------|-----|
| Machimbre  | Liso   | 0.025 | 0.13 | 600  | 1380 | 0.7 |
| PISO       |        |       |      |      |      |     |
| Contrapiso | Rugoso | 0.12  | 1.63 | 2400 | 1050 | 0.6 |

***Máximo ahorro energético asociado a la aplicación de FVT versus un aislante tradicional -EPS-.***

Los datos obtenidos de las simulaciones muestran que, para el día correspondiente a las temperaturas máximas de verano, la aplicación de la FVT de 27 cm de espesor en toda la envolvente permite alcanzar reducciones del consumo energético del orden de 18.0 % mientras que la aplicación de EPS de 5 cm de espesor posibilita un ahorro del 53.7 %. Ver Tabla 3.

Para el día correspondiente a las temperaturas promedio de verano; la aplicación de la FVT de 27 cm de espesor en toda la envolvente permite alcanzar reducciones del consumo energético del orden de 28.5 % mientras que la aplicación de EPS de 5 cm de espesor posibilita un ahorro del 58.6 %. Ver Tabla 3.

*Tabla 3: Caso Vivienda Individual - Aplicación FVT y EPS en todas las fachadas.*

|                                      | Período de alta temperatura<br>-11 de enero- |                                  | Período de temperatura media<br>-16 de enero- |                                  |
|--------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------|
|                                      | Consumo enfriam.<br>[kW/día]                 | Reducción respecto caso base [%] | Consumo enfriam.<br>[kW/día]                  | Reducción respecto caso base [%] |
| Caso base                            | 17.6                                         | ---                              | 8.7                                           | ---                              |
| Caso con FVT<br>-toda la envolvente- | 14.4                                         | <b>18.2</b>                      | 6.2                                           | <b>28.7</b>                      |
| Caso con EPS<br>-toda la envolvente- | 8.2                                          | <b>53.4</b>                      | 3.6                                           | <b>58.6</b>                      |

Las diferencias observadas muestran que la aislación con EPS ofrece mejor desempeño que la aplicación de FVT. Sin embargo, la tipología de vivienda analizada presenta características que benefician las prestaciones del aislante por sobre las del FVT. Entre ellas, se identifican: presencia de grandes aberturas acristaladas de vidrio simple y baja estanqueidad. Esto favorece el enfriamiento nocturno del espacio, lo que beneficia la prestación del aislante en el análisis global. Se conoce que durante el enfriamiento la aplicación del aislante retarda el enfriamiento del espacio. Esto no puede apreciarse en el caso analizado dado sus características constructivas.

Por otro lado, la presencia de aleros sombrea los muros limitando la intercepción de la radiación solar de la FVT. De esta forma las ganancias por calor conductivo a través de los muros toman mayor relevancia en el balance energético que las ganancias por calor radiante, beneficiando a la estrategia de aplicación de EPS.

En términos de calidad energética, la construcción presenta aislación térmica insuficiente en toda la envolvente, con su consecuente impacto en el confort interior. Puntualmente, la aislación térmica en la envolvente horizontal -lana de vidrio- muestra un deterioro avanzado, producto de la reiterada infiltración de agua de lluvia. Esto impacta negativamente en el potencial de mejora en el ahorro de energía que puedan generar aquellas estrategias que se aplican sobre las envolventes verticales, como son las FVT.

Es por ello que se decide mejorarla para los próximos análisis con 5 cm de EPS. De esta forma, la aplicación de FVT o EPS en la totalidad de los muros verticales expuestos eleva los valores de ahorro, los cuales ascienden a 26.4 % para la implementación de la FVT, mientras que se registra un valor de 81.8 % para el caso de EPS durante el día de temperaturas elevadas. Mientras que los valores registrados durante el día de temperaturas promedio son de 49.3 % para la FVT y de 93.8 % para el caso de EPS . Ver Tabla 4.

Tabla 4: Caso Vivienda Individual - Aplicación FVT y EPS en todas las fachadas.

|                                      | Período de alta temperatura<br>-11 de enero- |                                     | Período de temperatura media<br>-16 de enero- |                                     |
|--------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------|
|                                      | Consumo<br>enfriam.<br>[kW/día]              | Reducción respecto<br>caso base [%] | Consumo<br>enfriam.<br>[kW/día]               | Reducción respecto<br>caso base [%] |
| Caso base con envolvente mejorada    | 11.9                                         | ---                                 | 4.5                                           | ---                                 |
| Caso con FVT<br>-toda la envolvente- | 8.7                                          | <b>26.4</b>                         | 2.2                                           | <b>49.3</b>                         |
| Caso con EPS<br>-toda la envolvente- | 2.2                                          | <b>81.8</b>                         | 0.3                                           | <b>93.8</b>                         |

Finalmente, se evalúa el ahorro energético bajo un escenario climático construido a partir de los datos microclimáticos monitoreados en febrero de 2023, y sobre el caso de la vivienda con envolvente horizontal optimizada. Dentro de este período, se elige un día con temperaturas promedio representativas del área de estudio: 14 de febrero. Cuando se contrastan estos resultados de simulación a los obtenidos en un día de temperaturas promedio con el EPW correspondiente al TMY Aeropuerto (2003-2017), se observa que la eficiencia de la implementación de la FVT aumenta alrededor de un 20 % para la condición microclimática real del sitio de implantación. Ver Tabla 5. Esto evidencia la importancia de considerar el impacto del microclima local.

Tabla 5: Caso Vivienda Individual - Aplicación FVT y EPS en todas las fachadas medido en un día típico del microclima local.

|                                   | Período de temperatura media<br>(EPW local) -14 de febrero- |                                     |
|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
|                                   | Consumo<br>enfriam.<br>[kW/día]                             | Reducción respecto caso<br>base [%] |
| Caso base con envolvente mejorada | 6.7                                                         | ---                                 |
| Caso con FVT -toda la envolvente- | 2.7                                                         | <b>59.8</b>                         |
| Caso con EPS -toda la envolvente- | 0.6                                                         | <b>92.2</b>                         |

A modo de resumen, en la Tabla 6 se presentan los resultados máximos de ahorro por estrategia y para cada condición climática evaluada. Se observa claramente como trabajar con datos del microclima del entorno mejora las posibilidades de ahorro energético asociadas al uso de la estrategia de enverdecimiento.

Tabla 5: Tabla resumen de magnitudes máximas halladas por estrategia.

|                        | Reducción de consumo |         |
|------------------------|----------------------|---------|
|                        | FVT [%]              | EPS [%] |
| Día extremo (EPW)      | 26.4                 | 81.8    |
| Día promedio (EPW)     | 49.3                 | 93.8    |
| Día microclima (14/02) | 59.8                 | 92.2    |

Los resultados obtenidos son representativos de la aplicación de FVT, con una especie trepadora determinada, en viviendas de construcción másica en climas cálidos-secos, por lo que futuras

investigaciones podrían explorar el desempeño de la estrategia en otras tipologías, contextos climáticos y con la evaluación de diversas especies vegetales.

## CONCLUSIONES

Esta investigación persigue determinar el impacto del uso de FVT sobre la demanda estival de energía para climatización de una tipología de vivienda másica representativa del área de estudio, y compara sus prestaciones con el uso de un aislante tradicional (EPS). Para ello se elabora un modelo simplificado en EnergyPlus<sup>TM</sup> que representa las características ópticas y térmicas de una FVT con *Pandorea jazminoides*. Posteriormente, estas propiedades opto-térmicas se incorporaron a la simulación del caso de estudio.

Cuando se contrastan los resultados de simulación obtenidos con el EPW correspondiente al TMY Aeropuerto (2003-2017) versus el EPW construido con los datos microclimáticos monitoreados en el entorno de la vivienda evaluada, se observa que la eficiencia de la implementación de la FVT aumenta hasta 20 %. Esto pone de manifiesto la importancia de trabajar considerando el impacto del microclima local.

El ahorro energético del uso de FVT representa el 35% del que ofrece usar EPS en verano y con altas temperaturas; y representa el 50% para el caso de temperaturas promedio. Si los datos climáticos utilizados en el simulador provienen de mediciones in-situ, este porcentaje asciende al 65%. Sin embargo, cabe señalar que el enverdecimiento genera beneficios ecosistémicos y disminuye la huella de carbono a diferencia de los aislantes artificiales tradicionales.

Se verifica que la prestación de la tecnología respecto del ahorro energético para verano es mayor en días cálidos de temperatura promedio y desciende para los días cálidos con temperaturas extremas. Sin embargo, importa aclarar que los días cálidos de temperatura media son más representativos de la condición de verano, es decir, aquella para la que el desempeño de la FVT muestra su mejor performance. Se demuestra la importancia de implementar FVT en viviendas cuya envolvente horizontal esté correctamente aislada. Bajo esta condición, la estrategia mejora sus beneficios hasta 69% para el día de altas temperaturas y hasta 58% para el día de temperatura promedio en verano.

Por todo lo enunciado, la FVT se presenta como una alternativa viable y ambientalmente ventajosa frente a estrategias de aislación convencionales, especialmente en contextos urbanos donde el microclima juega un rol clave para tender a la eficiencia energética de la edificación.

## FUENTES DE FINANCIAMIENTO

Esta investigación ha sido posible por el apoyo financiero del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y la Agencia Nacional de Promoción de la Ciencia y la Tecnología (ANPCyT) mediante los fondos recibidos a través de los proyectos de investigación PICT-2020-02444 y PIP 2021-0900.

## REFERENCIAS

- Bustami, R. A., Belusko, M., Ward, J., & Beecham, S. (2018). Vertical greenery systems: A systematic review of research trends. *Building and Environment*, 146(August), 226-237. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.09.045>
- Castellanos, E. J., Lemos, M. F., Astigarraga, L., Chacón, N., Cuvi, N., Huggel, C., ... Valladares, M. (2022). IPCC WGII Sixth Assessment Report. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability - Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 1-181. Retrieved from [https://report.ipcc.ch/ar6wg2/pdf/IPCC\\_AR6\\_WGII\\_FinalDraft\\_Chapter12.pdf](https://report.ipcc.ch/ar6wg2/pdf/IPCC_AR6_WGII_FinalDraft_Chapter12.pdf)
- Coma, J., Pérez, G., de Gracia, A., Burés, S., Urrestarazu, M., & Cabeza, L. F. (2017). Vertical greenery systems for energy savings in buildings: A comparative study between green walls and green facades. *Building and Environment*, 111, 228-237. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.11.014>

- Correa, E., Ruiz, M. A., Canton, A., & Lesino, G. (2012). Thermal comfort in forested urban canyons of low building density. An assessment for the city of Mendoza, Argentina. *Building and Environment*, 58, 219–230. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.06.007>
- Djedjig, R., Bozonnet, E., & Belarbi, R. (2015). Analysis of thermal effects of vegetated envelopes: Integration of a validated model in a building energy simulation program. *Energy and Buildings*, 86, 93–103. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.057>
- EnergyPlus, Copyright (c) 1996-2021, The Board of Trustees of the University of Illinois, The Regents of the University of California, through Lawrence Berkeley National Laboratory (subject to receipt of any required approvals from the U.S. Dept. of Energy), Oak Ridge National Laboratory, managed by UT-Battelle, Alliance for Sustainable Energy, LLC, and other contributors.
- Esteves Miramont, A., Gelardi, D., & Balter, J. (2009). Vivienda unifamiliar solar pasiva en el centro-oeste de Argentina. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 13. <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/98570>
- Jozay, M.; Zarei, H.; Khorasaninejad, S.; Miri, T. (2024) Maximising CO2 Sequestration in the City: The Role of Green Walls in Sustainable Urban Development. *Pollutants* 2024, 4, 91–116. <https://doi.org/10.3390/pollutants4010007>
- Maatouk Khoukhi (2019). The combined effect of heat and moisture transfer dependent thermal conductivity of polystyrene insulation material: Impact on building energy performance, *Energy and Buildings*, Volume 169, 2018, Pages 228-235, ISSN 0378-7788. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.055>.
- Pérez, G., Coma, J., Sol, S., & Cabeza, L. F. (2017). Green facade for energy savings in buildings: The influence of leaf area index and facade orientation on the shadow effect. *Applied Energy*, 187, 424–437. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.11.055>
- Pujol, M. O., & Bisbal-grandal, I. (2019). DIVERSIDAD EN LA DISPERSIÓN: MORFOLOGÍA DE LAS ÁREAS RESIDENCIALES EN EL PERIURBANO DEL GRAN MENDOZA. *Revista Urbano*, 20, 46–63. <https://doi.org/https://doi.org/10.22320/07183607.2019.22.40.03>
- Suárez, P., Cantón, M. A., & Correa, É. (2023). Comportamiento térmico estacional de fachadas verdes conformadas por especies trepadoras perennes en muros máscos orientados al oeste. Estudio de casos en zonas áridas. *Cuaderno Urbano*, 35(35), 83–105. <https://doi.org/10.30972/crn.35356773>
- Suárez-Gómez, P. A., Cantón-Ivanissevich, M. A., & Correa-Cantaloube, Érica N. . (2024). Evaluación de estrategias de enverdecimiento vertical en clima árido: el caso de las fachadas verdes. *Revista de Arquitectura (Bogotá)*, 26(2), 75-90. <https://doi.org/10.14718/RevArq.2024.26.5014>
- Suárez-Gómez, P. A. (2024). Tecnologías verdes de aplicación en envolventes verticales en zonas áridas. evaluación energética y ambiental. Tesis de doctorado en ingeniería – mención civil ambiental, Univerisdad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Mendoza (Argentina). <https://bicyt.conicet.gov.ar/fichas/produccion/en/11836705#section-first>
- Vox, G., Blanco, I., & Schettini, E. (2018). Green façades to control wall surface temperature in buildings. *Building and Environment*, 129(September 2017), 154–166. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.12.002>
- Lim, Y & Tengku Izhar, Tengku Nuraiti & Zakarya, Irnis Azura & YUSUF, SARA & Zaaba, Siti & Mohamad, M. (2021). Life cycle assessment of expanded polystyrene. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 920. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/920/1/012030>.
- Zhang, Y., Yang, Y., Zhang, L., Zhao, C., Yan, J., Liu, M., & Zhao, L. (2022). Seasonal variation in leaf area index and its impact on the shading effects of vertical green facades in subtropical areas. *Building and Environment*, 225(May), 109629. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109629>
- Zhang, Y., Zhang, L., & Meng, Q. (2022). Dynamic heat transfer model of vertical green façades and its co-simulation with a building energy modelling program in hot-summer/warm-winter zones. *Journal of Building Engineering*, 58(March), 105008. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.105008>

## NATURE-BASED SOLUTIONS AS AN ENERGY CONSERVATION STRATEGY IN MASS HOUSING. VERTICAL GREENERY SYSTEMS.

**ABSTRACT:** The most widely used energy conservation strategy in architecture is the incorporation of traditional insulators into construction packages. Vertical Greenery Systems (VGS) are a nature-based alternative, which contributes to the recovery of degraded ecosystems. This research evaluates the efficiency of Traditional Green Facades (TGF) to reduce energy consumption in summer of a single-



family house on the ground floor and exposed perimeter in the Metropolitan Area of Mendoza, and to compare its performance with that of a traditional insulation technology (Expanded Polystyrene-EPS). Methodologically, it is structured in three stages: characterization of the opto-thermal properties of the PVT, determination of the energy savings associated with its implementation, through thermal simulation with EnergyPlus, and the comparison of the results achieved with those derived from the use of EPS. It is observed that isolating all the walls exposed to the outside of an environment with FVT and EPS, generates energy savings on summer days with average temperatures up to 59.8 % and 92.2 % respectively. It is identified that the energy saving possibilities offered by the FVT depend on the magnitude of the outdoor temperatures and that its use is more effective in arid climates with high levels of solar irradiance and mostly clear skies.

**Keywords:** vertical greening systems, energy saving, sustainable architecture, sustainable development.

## VIVIENDAS SOCIALES SOSTENIBLES: EVALUACIÓN DE ESTRATEGIAS PASIVAS DE DISEÑO EN CLIMAS SEMIÁRIDOS

María P. Mateo<sup>1</sup>, Gustavo J. Barea Paci<sup>1</sup>, Carolina Ganem Karlen<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Ambiente Hábitat y Energía (INAHE) Centro Científico Tecnológico CONICET, Mendoza, Argentina.

<sup>2</sup>Facultad de Artes y Diseño. Universidad Nacional de Cuyo. FAD-UNCUYO, Mendoza, Argentina.  
[mpmateo@mendoza-conicet.gob.ar](mailto:mpmateo@mendoza-conicet.gob.ar); [gbarea@mendoza-conicet.gob.ar](mailto:gbarea@mendoza-conicet.gob.ar); [cganem@mendoza-conicet.gob.ar](mailto:cganem@mendoza-conicet.gob.ar)

**RESUMEN:** Este estudio revisa 42 investigaciones recientes (2017–2024) sobre Estrategias Pasivas de Diseño (EPD) aplicadas a viviendas sociales en climas secos semiáridos fríos (BSk, según la clasificación de Köppen-Geiger), integrando tres dimensiones clave: viabilidad económica, eficiencia energética y adaptabilidad climática. El análisis muestra que la ventilación natural y nocturna es la estrategia más estudiada (71%), seguida del sombreado (55%), aislamiento térmico (31%) y masa térmica (26%), con reducciones de demanda energética de hasta 62,5% en calefacción y 20,5 % en refrigeración. Sin embargo, solo el 17% de los estudios aborda de forma explícita el análisis económico, evidenciando una brecha crítica en la literatura. Se identifican ahorros energéticos de entre 35% y 50% en casos que combinan EPD con energías renovables, así como mejoras de confort térmico superiores al 39% en tipologías adaptadas. La principal aportación de esta revisión radica en la sistematización comparativa de estrategias aplicables a contextos de alta vulnerabilidad, considerando simultáneamente desempeño térmico, costes y resiliencia ante proyecciones de aumento térmico. Además, identifica tendencias en la literatura que sugieren la necesidad de políticas públicas integrales y financiamiento accesible para viabilizar la adopción de EPD en viviendas sociales. Estas estrategias podrían contribuir a mejorar la calidad habitacional y a enfrentar la pobreza energética.

**Palabras clave:** vivienda social, viabilidad económica, eficiencia energética, adaptabilidad climática.

### INTRODUCCIÓN

En los últimos años ha crecido el interés por aplicar Estrategias Pasivas de Diseño (EPD) que permitan un uso más eficiente de los recursos naturales en el ámbito de la vivienda. Estas estrategias, entendidas como soluciones arquitectónicas bioclimáticas, constituyen una alternativa relevante para disminuir el consumo energético y mejorar el confort térmico sin recurrir de manera prioritaria a sistemas mecánicos (Givoni, 1998). Al basarse en el aprovechamiento de las condiciones climáticas locales, optimizan la respuesta del edificio al entorno y contribuyen a la eficiencia energética, a la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y a la resiliencia climática. Sin embargo, diversos organismos internacionales advierten que los avances para reducir las emisiones de GEI y limitar los impactos ambientales aún resultan insuficientes (IPCC, 2023a). La temperatura media global ya ha aumentado 1,09 °C respecto de la era preindustrial, y alcanzar un incremento de 1,5 °C intensificaría la frecuencia y severidad de los eventos climáticos extremos. Estos fenómenos afectan de forma desproporcionada a poblaciones vulnerables, especialmente en países en desarrollo, donde el acceso a energía moderna sigue siendo limitado (IEA, 2024). Además, el aumento proyectado de la demanda de climatización activa, como el aire acondicionado, podría generar un incremento significativo de las emisiones globales (Chalmers, 2015).

Numerosos estudios han demostrado que las EPD pueden mejorar el desempeño térmico de los edificios, reduciendo la dependencia de sistemas activos y mitigando los efectos de climas extremos (Arcas-Abella



et al., 2011; Cantón et al., 2014; Guo et al., 2024; Hampo et al., 2024; Piña Hernández, 2018; Shen y Lior, 2016; Tajuddeen y Sajjadian, 2024). También podrían contribuir a enfrentar la pobreza energética, definida por Boardman (1991) como la imposibilidad de cubrir necesidades energéticas básicas, y que persiste en múltiples regiones (Viñuela et al., 2021). En este sentido, la arquitectura bioclimática, que se fundamenta en la implementación de EPD, propone una vía para mejorar la calidad de vida y reducir el consumo energético (Jayalath et al., 2024; Okushima, 2016). A pesar de ello, la incorporación de EPD en viviendas sociales enfrenta barreras considerables. Entre ellas, la necesidad de conocimientos técnicos específicos, la escasa disponibilidad de materiales y tecnologías apropiadas, así como la debilidad de las políticas públicas y los mercados de financiamiento (Mejica et al., 2008; IPCC, 2023b). Estas limitaciones reducen la viabilidad de implementar soluciones que, aunque eficaces, resultan poco accesibles para sectores de bajos ingresos. Además, existe una subrepresentación de investigaciones centradas en climas semiáridos fríos, lo que limita la transferibilidad de soluciones a este contexto. Pocas revisiones consideran simultáneamente escenarios climáticos futuros, condiciones socioeconómicas locales y estrategias replicables de bajo costo, particularmente en entornos de alta vulnerabilidad. Esta ausencia de un enfoque multidimensional dificulta avanzar hacia la identificación de políticas y soluciones técnicas que podrían contribuir a reducir la pobreza energética y mejorar la calidad habitacional.

Este artículo revisa investigaciones recientes sobre EPD aplicadas a viviendas sociales en climas semiáridos fríos, con el fin de identificar las estrategias más efectivas y las barreras que limitan su adopción. El análisis se organiza en tres ejes: i) viabilidad económica, examinando costos, beneficios y apoyos institucionales necesarios; ii) eficiencia energética, estimando la reducción del uso de climatización activa; y iii) adaptabilidad climática, evaluando la resiliencia térmica de las soluciones. El clima BSk, según la clasificación de Köppen-Geiger (Kottek et al., 2006), donde B indica clima seco, S semiárido de estepa y k temperaturas frías, constituye el foco de este estudio. Este clima se caracteriza por una alta heliofanía, temperaturas medias anuales inferiores a 18 °C, baja humedad relativa, precipitaciones escasas y una gran amplitud térmica diaria y estacional. Esta variabilidad implica demandas combinadas de calefacción y enfriamiento, a veces en una misma jornada. En viviendas sociales con envolventes simples, tales condiciones incrementan el consumo energético, reforzando la necesidad de estrategias pasivas versátiles y accesibles.

## METODOLOGÍA

Este estudio adopta un enfoque cualitativo y exploratorio, no exhaustivo, para examinar la aplicación de Estrategias Pasivas de Diseño (EPD) en viviendas sociales en climas semiáridos fríos. La búsqueda principal se llevó a cabo en agosto de 2024 en la base de datos *ScienceDirect*, empleando operadores booleanos con la cadena: "*passive solar systems*" OR "*passive strategies*" AND "*social housing*" AND ((("*temperate climate*" OR BSk) OR BSh) OR BWk) OR BWk). Se aplicaron filtros por tipo de documento (research y review) y periodo de publicación (2017–2024), lo que arrojó 168 registros iniciales. Se consideró que los estudios abordaran al menos uno de los tres ejes analíticos definidos: i) viabilidad económica, incluyendo un análisis detallado de costos, beneficios y políticas de apoyo; ii) eficiencia energética, con un enfoque en la reducción del uso de sistemas de climatización activa; y iii) adaptabilidad climática, evaluando la resiliencia térmica frente a condiciones climáticas extremas.

Se priorizaron investigaciones centradas en climas comparables con el tipo BSk, verificados mediante referencias explícitas o ubicación geográfica. También, se incorporaron algunos trabajos en climas áridos cálidos o desérticos, ya que analizan estrategias pasivas transferibles y adaptables al clima BSk, especialmente en lo referido a ventilación nocturna, control solar y masa térmica, lo que justifica su inclusión. Quedaron excluidos estudios sin evidencia empírica, realizados en climas ecuatoriales, enfocados exclusivamente en tecnologías activas o con estrategias económicamente inviables para el contexto de vivienda social.

Como ilustra la Figura 1, el proceso de selección siguió un protocolo PRISMA simplificado (Page et al., 2021). La lectura inicial de títulos permitió identificar 90 trabajos pertinentes. Posteriormente, tras examinar resúmenes y palabras clave, se descartaron 52 documentos. De los 28 artículos restantes, se sumaron 14 adicionales identificados a partir de las referencias citadas: cinco correspondían a 2017 y

2018, incluidos por su relevancia temática, y nueve fueron localizados en *Google Scholar* (Figuras 2a, 2b). La muestra final quedó conformada por 42 artículos.

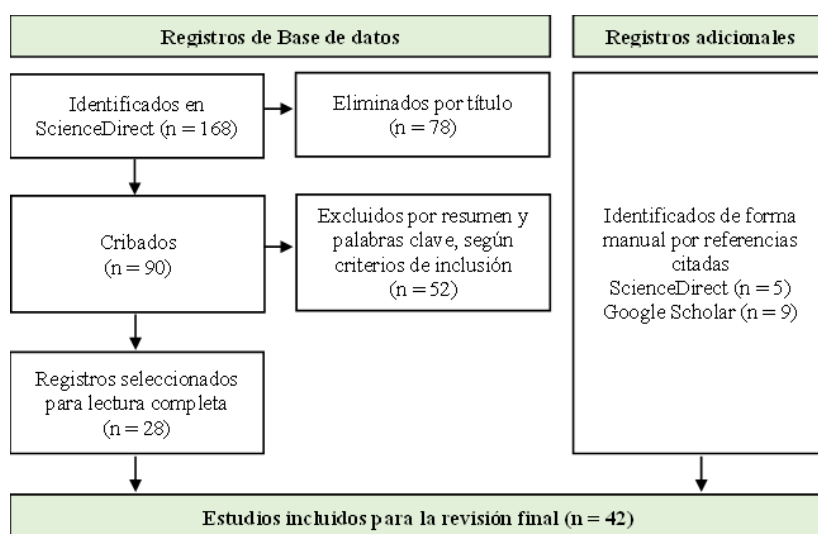


Figura 1 Esquema de flujo PRISMA. Fuente: Elaboración Autores basada en Page et al. (2021).

El análisis se desarrolló en tres etapas principales (Figura 3). Primero, la organización de la literatura: se clasificaron los estudios seleccionados en un gestor bibliográfico y se incorporaron reportes del IPCC y la IEA, debido a su relevancia en materia de políticas energéticas y climáticas. Segundo, la clasificación temática: los documentos se agruparon según los tres ejes analíticos mencionados, identificando palabras clave asociadas (Figura 2c) y elaborando tablas que incluyeron autores, año de publicación, tipo de literatura y hallazgos principales. Tercero, la discusión: se seleccionaron estrategias con potencial de ser transferidas a la vivienda social en climas semiáridos, evaluando sus barreras y proponiendo líneas de investigación futura. Esta metodología combina la amplitud de una revisión sistemática con la profundidad de un análisis cualitativo, permitiendo organizar y sintetizar la evidencia disponible desde una perspectiva económica, energética y climática.

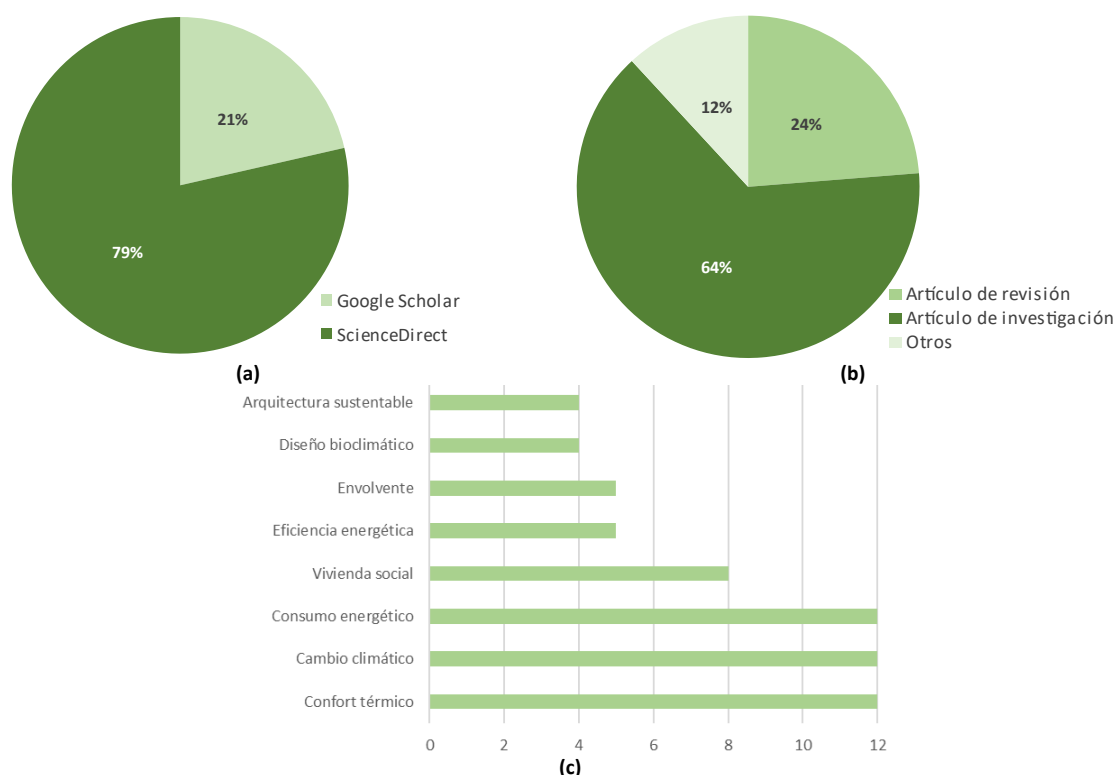


Figura 2. (a) Frecuencia de repetencia de palabras clave en los artículos. (b) Porcentaje de artículos según fuente consultada. (c) Tipo de literatura incluida. Fuente: Elaboración Autores.

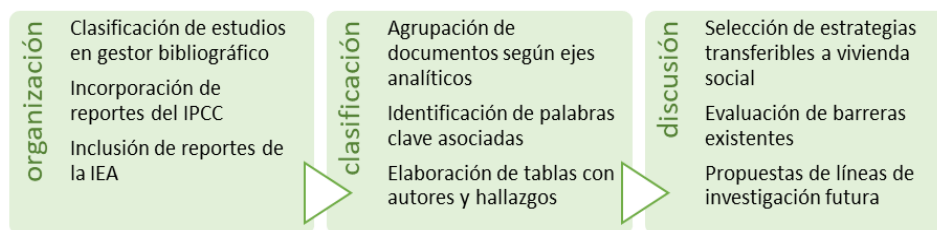


Figura 3. - Esquema metodológico del análisis: marco para evaluar la implementación de estrategias pasivas de diseño. Fuente: Elaboración autores.

Entre las limitaciones, se identificó una restricción temporal: la exclusión de investigaciones anteriores a 2017 pudo dejar fuera estudios con información aún vigente y aplicable. También se reconoció una limitación en el alcance de la búsqueda bibliográfica, por lo que se recomienda incorporar otras bases de datos (p. ej., *Scopus*, *Web of Science*) y utilizar sinónimos o términos alternativos. No obstante, los trabajos incluidos ofrecen un panorama representativo de la producción más reciente, que permite identificar estrategias pasivas con potencial de adaptación al clima BSk, caracterizado por su marcada amplitud térmica diaria y estacional, y por las demandas combinadas de calefacción y enfriamiento. Además, se observó una concentración de investigaciones en regiones con sistemas de financiamiento consolidados (23 estudios en América del Norte y Europa) y una menor representación de contextos con recursos limitados, incluyendo 8 trabajos realizados en Argentina. Este sesgo geográfico podría limitar la aplicabilidad de los resultados en áreas con menores capacidades institucionales y técnicas.

## RESULTADOS

La revisión permitió organizar el material en tres ejes principales: viabilidad económica, eficiencia energética y adaptabilidad climática. Esta clasificación facilita la comparación transversal entre estudios y permite identificar estrategias recurrentes que muestran coherencia con las condiciones climáticas y socioeconómicas de cada contexto, más allá de su frecuencia de aparición. Los datos cuantitativos se emplean como apoyo descriptivo para interpretar tendencias, sin que ello implique una generalización sobre la efectividad de cada estrategia.

Según la codificación temática, el eje de viabilidad económica fue el foco principal en 2 estudios (5 %), aunque en otros se abordó de manera parcial (Figura 4a). La eficiencia energética fue tratada en 17 estudios (40 %), mientras que la adaptabilidad climática ocupó el primer lugar, con 23 investigaciones (55 %). Dado que muchos artículos trataron más de un eje simultáneamente, se calcularon porcentajes relativos para reflejar estas interacciones: la eficiencia energética estuvo presente en el 95 % del total, la adaptabilidad en el 67 %, y la viabilidad económica en el 17 % (Figura 4b). El análisis de coincidencias mostró que el 59 % examinó dos ejes a la vez, mientras que solo el 10 % integró los tres. La combinación más frecuente fue “Eficiencia energética y Adaptabilidad climática” (52 %), mientras que la dimensión económica resultó la menos explorada en la literatura revisada, aun cuando su análisis podría favorecer la incorporación real de EPD en viviendas sociales.

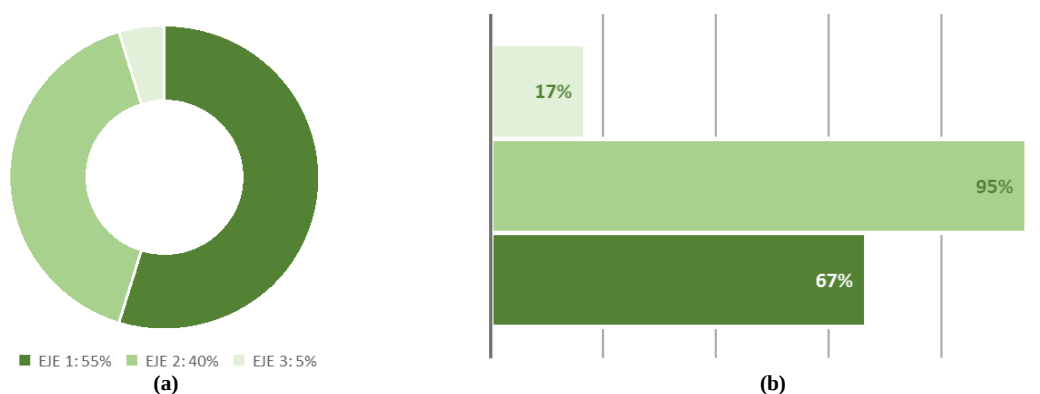


Figura 4. (a) Porcentajes por ejes temáticos. (b) Porcentajes relativos de interacciones temáticas. Fuente: Elaboración Autores.

## ***Viabilidad económica en vivienda social (costos y beneficios)***

La implementación de EPD en viviendas sociales implica desafíos económicos relevantes. Aunque estas estrategias mejoran el confort térmico y reducen el consumo energético, los altos costos iniciales y las limitaciones presupuestarias de las comunidades vulnerables siguen siendo barreras significativas (Bhamare et al., 2019; Wei et al., 2024). A pesar de su efectividad, existe una vacancia en la literatura sobre su factibilidad económica y la relación costo-beneficio.

Gran parte de las investigaciones abordan esta problemática de manera general, sin un enfoque específico en el análisis económico. Si bien las soluciones pasivas son eficaces, su integración debe adaptarse a las condiciones locales para optimizar costos y eficiencia (Tajuddeen y Sajjadian, 2024). Hampo et al. (2024) destacan los elevados costos de enfriamiento en sectores vulnerables y la necesidad de diseños más eficientes, aunque no profundizan en los aspectos económicos. Además, subrayan la relación entre sobrecalentamiento, salud pública e impactos socioeconómicos. En esta línea, Zhai y Helman (2019) señalan la importancia de considerar las condiciones climáticas futuras al evaluar mejoras destinadas a reducir costos de enfriamiento.

Entre las medidas con incidencia económica se destacan aquellas para reducir las fluctuaciones térmicas y mejorar el confort, como la optimización de la inercia térmica mediante madera maciza, hormigón liviano y soluciones constructivas adaptadas al clima, como el aumento de altura de muros con aislamiento térmico (Avendaño-Vera et al., 2020; Fernández y Pesantez, 2019). Aunque estas estrategias pueden implicar una inversión inicial más elevada, sus beneficios en eficiencia energética y calidad de vida justifican plenamente su adopción.

En estudios de casos, Fernández y Pesantez (2019) muestran que el aislamiento térmico constituye el único costo adicional significativo en viviendas multifamiliares, inversión con 25 años de vida útil que mejora la calidad de vida en familias de bajos recursos. Por su parte, Jayalath et al. (2024) proponen incorporar modelización energética, optimización de costes y análisis de ciclo de vida como herramientas para abordar la pobreza energética en viviendas asequibles. En Argentina Durán y Condorí (2019) abordan la pobreza energética, donde las tarifas excluyen a hogares vulnerables y que, aunque las energías renovables ofrecen menores costos operativos, la falta de diseño bioclimático limita su alcance. Asimismo, Ascione et al. (2024) analizan la rentabilidad de las estrategias pasivas a largo plazo y la necesidad de códigos de edificación adaptativos que prioricen soluciones sostenibles y accesibles. Las autoconstrucciones muestran potencial, pero requieren apoyo técnico e institucional para garantizar su eficacia (Caldas et al., 2019; Jayalath et al., 2024).

Finalmente, algunas estrategias combinan eficacia y bajo desembolso, con un peso económico reducido respecto del costo total de la obra. Rempel et al. (2022) subrayan que la combinación de ventilación y sombreado efectivo proporciona entre 130 y 150 horas de alivio térmico durante olas de calor, mientras que Jayalath et al. (2024) advierten que soluciones de bajo costo como techos aislados y fachadas reflectantes resultan altamente eficaces. La viabilidad económica de las EPD mejora con soluciones asequibles y análisis costo-beneficio integral que contemplen ahorros a largo plazo, retornos favorables y beneficios sociales y ambientales, mientras que herramientas como el costo del ciclo de vida y metodologías con análisis de sensibilidad e incertidumbre permiten orientar decisiones sostenibles en vivienda social (Alba Gómez et al., 2021; Sharbaf y Schneider-Marin, 2025).

## ***Desempeño energético de las EPD***

La eficiencia energética de las EPD ha sido ampliamente estudiada, evidenciando su capacidad para reducir el consumo energético mediante estrategias pasivas adaptadas a distintos climas y contextos constructivos. Basados en principios bioclimáticos y diseño sostenible, estos sistemas son particularmente eficaces en regiones cálidas áridas, así como semiáridas. Numerosos estudios informan reducciones en la demanda de energía para calefacción y refrigeración. Zhai y Helman (2019) destacan que, ante escenarios futuros, estrategias como el aislamiento térmico y la ventilación eficiente mitigan los aumentos en la demanda de refrigeración, compensando parcialmente la menor necesidad de calefacción. Filippín et al. (2017) indican que incorporar aislamiento en techos y paredes reduce la



demanda de calefacción hasta un 62,5 % en climas templados-fríos de Argentina, mientras que la ventilación nocturna y el sombreado disminuyen significativamente el sobrecalentamiento estival.

Las estrategias de enfriamiento pasivo pueden clasificarse en tres categorías principales: protección contra la ganancia térmica, almacenamiento térmico mediante materiales de cambio de fase (PCM, por sus siglas en inglés) y disipación de calor como la ventilación nocturna (Bhamare et al., 2019). En particular, Liu et al. (2022) identifican que los PCM, integrados en techos y paredes, aumentan la inercia térmica y estabilizan las temperaturas interiores. Asimismo, Seo et al. (2023) destacan el diseño optimizado de estructuras de refrigeración radiativa, señalando la importancia de ajustar el grosor de la película de PDMS según el clima local.

De forma complementaria, los patios tradicionales emergen como dispositivos arquitectónicos clave, ya que actúan como reguladores microclimáticos y reducen la dependencia de sistemas activos. Diversos estudios evidencian mejoras significativas: por un lado, se reportan incrementos de hasta un 39,3 % en el confort térmico; por otro, se destaca que la geometría del patio influye directamente en su desempeño térmico, permitiendo reducir hasta un 20,5 % la demanda energética para refrigeración, al funcionar como amortiguadores térmicos que favorecen la ventilación natural (Diz-Mellado et al., 2023; Soflaei et al., 2017, 2020).

Por su parte, Soutullo et al. (2017) comparan edificios bioclimáticos y convencionales en Madrid, observando una reducción del 35% en consumo de energía primaria en los primeros, además de mayor confort térmico en verano. La ventilación mecánica con recuperación de calor y fachadas ventiladas fueron claves. D'Amanzo et al. (2020) afirman que la integración de estrategias pasivas y energías renovables en edificios de energía casi nula puede reducir el consumo energético hasta un 50%. A su vez, Adua et al. (2024) destacan tecnologías ambientales como ventanas de bajas pérdidas, almacenamiento térmico en cubiertas y enfriamiento radiativo, que mejoran la resiliencia ante eventos extremos y promueven edificios sostenibles.

La mejora del confort térmico es otro beneficio clave. Por ejemplo, Chen et al. (2023) desarrollaron un modelo predictivo que incrementa un 56,3 % las horas de ventilación natural en edificios pasivos, sin necesidad de sistemas mecánicos. Park et al. (2023) exploran algoritmos de aprendizaje automático para sombreado y ventilación natural, logrando ahorros de energía de hasta el 90 % y destacando su potencial para descarbonizar viviendas.

La eficiencia energética en la vivienda social requiere una planificación que articule diseño, materiales y tecnología. La incorporación de EPD adecuadas puede reducir el consumo energético en contextos de bajos recursos, mientras que el uso de modelos de simulación permite optimizar el desempeño y orientar soluciones habitacionales accesibles.

### ***Resiliencia térmica y adaptación de las EPD***

Las transformaciones ambientales globales plantean desafíos significativos al diseño de las EPD. La investigación sobre su adaptabilidad se ha centrado en estrategias para mitigar el sobrecalentamiento en diversos contextos climáticos, aplicadas de forma individual o combinada, y ha arrojado resultados que destacan la efectividad de tecnologías específicas y enfoques regionales (Duan et al., 2024; Flores-Larsen et al., 2023; Gupta y Deb, 2023; Hampo et al., 2024; Tajuddeen y Sajjadian, 2024).

La literatura coincide en que la ventilación natural y nocturna, combinada con masa térmica, es clave para mitigar el sobrecalentamiento en contextos áridos y semiáridos (Flores-Larsen et al., 2023; Roshan et al., 2019). Su efectividad varía según el entorno: en Phoenix, Arizona y Texas mejora el confort térmico cuando se combina con otras soluciones pasivas o incluso en muros de tierra (Hampo et al., 2024; Ben-Alon y Rempel, 2023; Wei et al., 2024), mientras que en Canadá depende del sombreado y de una adecuada proporción entre ventana–pared (Cavka y Ek, 2018). Tajuddeen y Sajjadian (2024) subrayan la relevancia de los techos ventilados como recurso para disminuir el consumo energético en climas cálidos.

El sombreado se consolida como una solución esencial, especialmente cuando se combina con ventilación y aislamiento térmico. En Mendoza, Barea et al. (2017) destacan su uso estacional en ventanas multiacimutales, mientras que Flores-Larsen et al. (2019) evidencian mejoras al integrarlo con ventilación cruzada. Gupta y Deb (2023), en Dubái, reportan reducciones del 50 % en cargas de enfriamiento mediante fachadas ventiladas y diseño eficiente de la envolvente. Harkouss et al. (2018) confirman su efectividad en Esfahan y Abu Dhabi al combinarlo con vidrios de baja emisividad. En Europa, Sánchez et al. (2020) proyecta su utilidad ante escenarios de calentamiento. En contextos urbanos, Ganem y Barea (2021) proponen hibridar lógicas naturales y técnicas en arquitectura sostenible, y Caldas et al. (2019) destacan su aplicación en Piura para mitigar islas de calor.

La masa térmica desempeña un papel fundamental en la estabilidad térmica interior, especialmente cuando se combina con ventilación natural o nocturna. Su efectividad ha sido validada en climas templados y áridos por Piña Hernández (2018) y Roshan et al. (2019), mientras que Sánchez et al. (2020) y Ascione et al. (2024) destacan su capacidad para amortiguar las fluctuaciones térmicas diarias en condiciones ambientales variables. En esta línea, Pajek et al. (2022) subrayan la creciente relevancia del diseño compacto con alta inercia térmica ante proyecciones de aumento térmico. Por otro lado, el aislamiento térmico se consolida como una estrategia indispensable en escenarios de incremento de temperaturas. Su eficacia se potencia al combinarlo con ventilación natural y al ajustar los valores de transmitancia térmica (U-valores) de las envolventes, adaptándolos a distintos contextos proyectados (Rodrigues et al., 2023; Shen et al., 2019).

Superficies reflectantes y vidrios de baja emisividad son eficaces en climas con alta radiación (Gupta y Deb, 2023; Harkouss et al., 2018). Tajuddeen y Sajjadian (2024) muestran reducciones del 42 % en cargas térmicas mediante techos reflectantes, mientras que Azimi Fereidani et al. (2021) destacan reducciones del 12 % con superficies claras y 3 % con sistemas verdes en Doha para escenarios futuros. A su vez, el enfriamiento radiativo se presenta como una alternativa eficiente para evacuar el calor acumulado (Carlosena et al., 2023). Finalmente, la refrigeración evaporativa se perfila como otra alternativa para climas áridos. Barea et al. (2023) destacan su potencial en Mendoza, mientras que Roshan et al. (2019) la validan en Irán al combinarla con masa térmica y ventilación nocturna.

La revisión demuestra que las EPD favorecen la resiliencia térmica y resultan especialmente pertinentes para la vivienda social, ya que permiten responder a condiciones ambientales cambiantes. Su adecuada integración en el diseño arquitectónico podría mejorar el confort interior, reducir la vulnerabilidad energética y contribuir a soluciones habitacionales sostenibles en contextos diversos.

## DISCUSIÓN

A diferencia de análisis previos centrados únicamente en el desempeño térmico o energético (Liu et al., 2022; Seo et al., 2023; Soflaei et al., 2017, 2020), esta revisión propone un enfoque integral orientado a la vivienda social, que articula tres dimensiones clave: viabilidad económica, eficiencia energética y adaptabilidad climática. Esta perspectiva multidimensional puede validar vacíos temáticos poco abordados, como la ausencia de evaluaciones de costo-beneficio a largo plazo frente a escenarios proyectados de aumento térmico, y la limitada consideración de criterios de accesibilidad económica en contextos de alta vulnerabilidad (Hampo et al., 2024; Jayalath et al., 2024).

La literatura destaca el papel central de estrategias pasivas de enfriamiento, como el sombreado y la ventilación natural, para mitigar el sobrecalentamiento estival y optimizar el confort térmico en climas BSk (Barea et al., 2023; Ben-Alon y Rempel, 2023; Flores-Larsen et al., 2023; Pajek et al., 2022; Sánchez et al., 2020). Estas soluciones adquieren mayor relevancia ante las proyecciones de incremento de temperaturas globales hacia finales de siglo, que exigen una planificación anticipada respaldada por herramientas de simulación y modelado energético. Estas herramientas permiten evaluar escenarios futuros (Duan et al., 2024; Ganem y Barea, 2021), optimizar el desempeño térmico (Chen et al., 2023) y fundamentar decisiones de diseño (Park et al., 2023). Además, el aislamiento térmico (Filippín et al., 2017; Zhai y Helman, 2019) y la incorporación de materiales con elevada inercia térmica (Avendaño-Vera et al., 2020) se posicionan como elementos clave para fortalecer la eficiencia energética y la resiliencia térmica de las viviendas, especialmente en entornos vulnerables.

La frecuencia con que estas intervenciones aparecen en los estudios revisados no implica necesariamente mayor efectividad ni aplicabilidad (Tabla 1). Si bien algunas soluciones aparecen con mayor frecuencia en la literatura, dicha recurrencia puede estar condicionada por variables como la disponibilidad de datos, las prioridades institucionales y editoriales, o la facilidad de implementación. La ventilación natural y nocturna lidera con un 71% de frecuencia, seguida del sombreado en ventanas y fachadas (55%), el aislamiento térmico (31%), la masa térmica (26%) y las envolventes reflectantes (12%). La refrigeración evaporativa (10%) y los vidrios de baja emisividad (7%) tienen menor presencia, aunque se muestran efectivos en contextos particulares. Estos porcentajes evidencian la diversidad de enfoques y la importancia de adaptar las EPD a las condiciones locales, aunque no representan criterios de selección directa, sino tendencias observadas en el marco de un análisis cualitativo y exploratorio. (Figura 5).

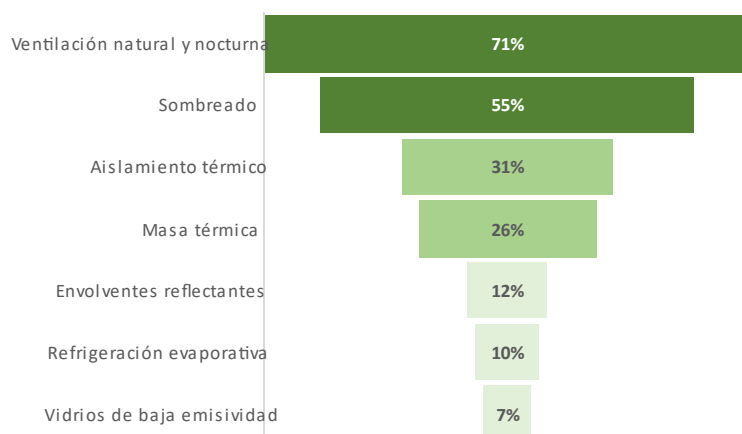


Figura 5. Porcentajes de las estrategias más reportadas. Fuente: Elaboración Autores.

Tabla 1. Síntesis de las estrategias y sus beneficios principales por frecuencia absolutas en los artículos analizados. Fuente: Elaboración Autores

| Estrategia                     | Beneficio                            | FA: |
|--------------------------------|--------------------------------------|-----|
| Ventilación natural y nocturna | Reducción de temperatura interior    | 30  |
| Sombreado (ventanas, fachadas) | Mitigación del sobrecalentamiento    | 23  |
| Masa térmica                   | Regulación de fluctuaciones térmicas | 11  |
| Envolventes reflectantes       | Reducción de carga térmica           | 5   |
| Aislamiento térmico            | Mejora de eficiencia energética      | 13  |
| Vidrios de baja emisividad     | Mejora de aislamiento térmico        | 3   |
| Refrigeración evaporativa      | Reducción de temperatura interior    | 4   |

El estudio sugiere la importancia de un abordaje integral que considere simultáneamente la viabilidad económica, la eficiencia energética y la capacidad de adaptación térmica para el diseño de viviendas sociales en climas semiáridos. La originalidad del estudio reside en la interrelación de estas dimensiones en un contexto climático específico, lo que permite identificar estrategias pertinentes y replicables en zonas BSk, caracterizadas por una alta vulnerabilidad. Este enfoque aporta una base conceptual útil para futuras investigaciones aplicadas, con el posible potencial de reducir la pobreza energética y mejorar la calidad habitacional en contextos vulnerables.

## CONCLUSIONES

El estudio confirma que la incorporación de criterios de viabilidad económica, eficiencia energética y adaptabilidad climática permite evaluar de manera más completa las Estrategias Pasivas de Diseño (EPD) para viviendas sociales en climas BSk. El análisis de 42 investigaciones recientes indica que la ventilación natural y nocturna, el sombreado, el aislamiento y la masa térmica son las estrategias más frecuentes y efectivas, con reducciones energéticas de hasta un 62,5 % en calefacción y un 20,5 % en refrigeración, así como mejoras de confort térmico superiores al 39 %.

La limitada inclusión de evaluaciones económicas y de escenarios climáticos futuros en la literatura revisada evidencia la necesidad de enfoques más integrales que combinen desempeño técnico y viabilidad de implementación, en especial en contextos de vulnerabilidad.

Los resultados obtenidos sugieren elementos útiles para orientar el desarrollo de políticas públicas, instrumentos de financiamiento y guías técnicas que impulsen soluciones pasivas de bajo costo y alto impacto. Además, ofrecen una base metodológica que podría adaptarse a otros contextos climáticos, favoreciendo la transferencia de conocimiento hacia la práctica profesional. Futuras investigaciones deberían avanzar en la cuantificación de beneficios económicos a largo plazo y en el análisis de resiliencia habitacional frente a escenarios de cambio climático.

Entre las líneas futuras de investigación, se propone explorar: (1) el desarrollo de materiales y tecnologías de bajo costo para aumentar la accesibilidad de las EPD; (2) el análisis de la interacción entre estas estrategias y las particularidades culturales y sociales de las comunidades locales; y (3) el diseño de políticas públicas que integren sostenibilidad energética con equidad social. Asimismo, sería pertinente profundizar en evaluaciones costo-beneficio que contemplen el ciclo de vida completo de las soluciones, incluyendo impactos económicos, sociales y ambientales.

## REFERENCIAS

- Adua, L., Asamoah, A., Barrows, J., Brookstein, P., Chen, B., Coleman, D. R., Denzer, A., Desjarlais, A. O., Falconer, W., Fernandes, L., Fisler, D., Foley, C., Gaillard, C., Gladen, A., Guzowski, M., Hill, T., Hun, D., Kishore, R., Klingenberg, K., ... Walker, A. (2024). Ambient energy for buildings: Beyond energy efficiency. *Solar Compass*, 11, 100076. <https://doi.org/10.1016/j.solcom.2024.100076>
- Alba Gómez, L. K., Herrera Sosa, L. C., & Esparza López, C. J. (2021). Análisis de costo-beneficio de estrategias de climatización pasiva en vivienda social en Ciudad Juárez, Chihuahua. *Vivienda Y Comunidades Sustentables*, (10), 81–91. <https://doi.org/10.32870/rvcs.v2i10.165>
- Arcas-Abella, J., Pagès-Ramon, A., y Casals-Tres, M. (2011). El futuro del hábitat: repensando la habitabilidad desde la sostenibilidad. El caso español. *Revista INVI N°26*, 26(72), 65–93. <https://doi.org/10.4067/S0718-83582011000200003>
- Ascione, F., de Rossi, F., Iovane, T., Manniti, G., y Mastellone, M. (2024). Energy demand and air quality in social housing buildings: A novel critical review. *Energy and Buildings*, 319, 114542. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114542>
- Avendaño-Vera, C., Martínez-Soto, A., y Marincioni, V. (2020). Determination of optimal thermal inertia of building materials for housing in different Chilean climate zones. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 131. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110031>
- Azimi Fereidani, N., Rodrigues, E., y Gaspar, A. R. (2021). A review of the energy implications of passive building design and active measures under climate change in the Middle East. En *Journal of Cleaner Production* (Vol. 305). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127152>
- Barea, G., Ganem, C., y Esteves, A. (2017). The multi-azimuthal window as a passive solar system: A study of heat gain for the rational use of energy. *Energy and Buildings*, 144, 251–261. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.03.059>
- Barea, G., Karlen, C. G., Molina, M. C., y Mateo, P. (2023). Future effectiveness of passive house design strategies. *Habitat Sustentable*, 13(1), 30–41. <https://doi.org/10.22320/07190700.2023.13.01.03>
- Ben-Alon, L., y Rempel, A. R. (2023). Thermal comfort and passive survivability in earthen buildings. *Building and Environment*, 238. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110339>
- Bhamare, D. K., Rathod, M. K., y Banerjee, J. (2019). Passive cooling techniques for building and their applicability in different climatic zones—The state of art. En *Energy and Buildings* (Vol. 198, pp. 467–490). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.06.023>
- Boardman, B. (1991). Fuel poverty is different. *Policy Studies*, 12(4), 30–41. <https://doi.org/10.1080/01442879108423600>
- Caldas, P., Aranda, E., y Dongo, C. (2019). Adaptación climática de barrios de vivienda social en una ciudad árida Piura. *TECNIA*. <https://doi.org/10.15460/tecnia.v29i1.328>

- Cantón, M. A., Ganem, C., Barea, G., y Llano, J. F. (2014). Courtyards as a passive strategy in semi dry areas. Assessment of summer energy and thermal conditions in a refurbished school building. *Renewable Energy*, 69, 437–446. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2014.03.065>
- Carlosena, L., Ruiz-Pardo, Á., Rodríguez-Jara, E. Á., y Santamouris, M. (2023). Worldwide potential of emissive materials based radiative cooling technologies to mitigate urban overheating. *Building and Environment*, 243. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110694>
- Cavka, B. T., & Ek, M. (2018). Future weather files to support climate resilient building design in Vancouver (Student Research Report, UBC SEEDS Sustainability Program). University of British Columbia, Vancouver, Canadá. Presentado en 1st International Conference on New Horizons in Green Civil Engineering (NHICE-01), Victoria, Canadá, 25–27 abril 2018. <https://doi.org/10.14288/1.0374203>
- Chalmers, P. (2015). Cambio climático Implicaciones para los Edificios. Hallazgos claves del Quinto informe de evaluación del IPCC. University of Cambridge. [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch)
- Chen, Y., Gao, J., Yang, J., Berardi, U., y Cui, G. (2023). An hour-ahead predictive control strategy for maximizing natural ventilation in passive buildings based on weather forecasting. *Applied Energy*, 333. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120613>
- D’Amanzo, M., Mercado, M. V., y Karlen, C. G. (2020). 10 questions about zero energy buildings: A state-of-the-art review. *Habitat Sustentable*, 10(2), 24–41. <https://doi.org/10.22320/07190700.2020.10.02.02>
- Diz-Mellado, E., López-Cabeza, V. P., Rivera-Gómez, C., y Galán-Marín, C. (2023). Performance evaluation and users’ perception of courtyards role in indoor areas of mediterranean social housing. *Journal of Environmental Management*, 345. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118788>
- Duan, Z., de Wilde, P., Attia, S., y Zuo, J. (2024). Prospect of energy conservation measures (ECMs) in buildings subject to climate change: A systematic review. *Energy and Buildings*, 322, 114739. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2024.114739>
- Durán, R., y Condorí, M. (2019). Evolución de la pobreza energética en Argentina durante el período 2002 - 2018. Oportunidades para las Energías Renovables. <https://doi.org/10.30972/eitt.503780>
- Fernández Morocho, J. D., & Pesantez Rivadeneira, B. X. (2019). Diseño térmico de edificaciones resilientes al cambio climático (Tesis de licenciatura, Escuela Superior Politécnica del Litoral). Repositorio Institucional de la ESPOL. <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/46992>
- Filippín, C., Ricard, F., Flores Larsen, S., y Santamouris, M. (2017). Retrospective analysis of the energy consumption of single-family dwellings in central Argentina. Retrofitting and adaptation to the climate change. *Renewable Energy*, 101, 1226–1241. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2016.09.064>
- Flores-Larsen, S., Filippín, C., y Barea, G. (2019). Impact of climate change on energy use and bioclimatic design of residential buildings in the 21st century in Argentina. *Energy and Buildings*, 184, 216–229. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.12.015>
- Flores-Larsen, S., Filippín, C., y Bre, F. (2023). New metrics for thermal resilience of passive buildings during heat events. *Building and Environment*, 230. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.109990>
- Ganem, C. K., y Barea, G. J. P. (2021). A Methodology for Assessing the Impact of Climate Change on Building Energy Consumption. *Urban Microclimate Modelling for Comfort and Energy Studies*, 363–381. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-65421-4\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-030-65421-4_17)
- Givoni, B. (1998). Climate considerations in building and urban design. John Wiley & Sons. [http://books.google.com/books?id=MGkArZ\\_berAC&pgis=1](http://books.google.com/books?id=MGkArZ_berAC&pgis=1)
- Guo, Z., Zhang, W., Deng, G., y Guan, Y. (2024). The Impact of Window Opening Behavior on the Indoor Thermal Environment and Coping Strategies in Passive Houses. *Energy and Built Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2024.04.003>
- Gupta, V., y Deb, C. (2023). Envelope design for low-energy buildings in the tropics: A review. *En Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 186). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113650>
- Hampo, C. C., Schinasi, L. H., y Hoque, S. (2024). Surviving indoor heat stress in United States: A comprehensive review exploring the impact of overheating on the thermal comfort, health, and social economic factors of occupants. *Heliyon*, 10(3), e25801. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25801>
- Harkouss, F., Fardoun, F., y Biwole, P. H. (2018). Passive design optimization of low energy buildings in different climates. *Energy*, 165, 591–613. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.019>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023a). Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023b). Climate change 2023: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental

- Panel on Climate Change (Core Writing Team, H. Lee, y J. Romero, Eds.). IPCC. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- International Energy Agency (IEA). (2024). World Energy Outlook 2024 IEA. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>
- Jayalath, A., Vaz-Serra, P., Hui, F. K. P., y Aye, L. (2024). Thermally comfortable energy efficient affordable houses: A review. *En Building and Environment* (Vol. 256). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111495>
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., y Rubel, F. (2006). World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15(3), 259–263. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>
- Liu, L., Hammami, N., Trovalet, L., Bigot, D., Habas, J.-P., y Malet-Damour, B. (2022). Description of phase change materials (PCMs) used in buildings under various climates: a review. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X22017480>
- Mejica, M. S. A., Gil, M. L., Mendoza, M., y Zapata, M. C. (2008). Córdoba y Mendoza: Dos casos para pensar la producción social del hábitat. *Revista INVI* No23, 62, 21–73. <https://doi.org/10.5354/0718-8358.2008.62191>
- Okushima, S. (2016). Measuring energy poverty in Japan, 2004–2013. *Energy Policy*, 98, 557–564. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.09.005>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *The BMJ*, 372. <https://doi.org/10.1136/BMJ.N71>,
- Pajek, L., Potočník, J., y Košir, M. (2022). The effect of a warming climate on the relevance of passive design measures for heating and cooling of European single-family detached buildings. *Energy and Buildings*, 261. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111947>
- Park, B., Rempel, A. R., y Mishra, S. (2023). Performance, robustness, and portability of imitation-assisted reinforcement learning policies for shading and natural ventilation control. *Applied Energy*, 347. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121364>
- Piña Hernández, E. H. (2018). Prototype for sustainable social high-rise housing, an approach to climate change resilience. *Revista INVI*; Vol. 33 Núm. 92 (2018); 213-237. <https://revistainvi.uchile.cl/index.php/INVI/article/view/62744>
- Rempel, A. R., Danis, J., Rempel, A. W., Fowler, M., y Mishra, S. (2022). Improving the passive survivability of residential buildings during extreme heat events in the Pacific Northwest. *Applied Energy*, 321. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119323>
- Rodrigues, E., Fereidani, N. A., Fernandes, M. S., y Gaspar, A. R. (2023). Climate change and ideal thermal transmittance of residential buildings in Iran. *Journal of Building Engineering*, 74. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106919>
- Roshan, G. R., Oji, R., y Attia, S. (2019). Projecting the impact of climate change on design recommendations for residential buildings in Iran. *Building and Environment*, 155, 283–297. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.03.053>
- Sánchez, M. N., Soutullo, S., Olmedo, R., Bravo, D., Castaño, S., y Jiménez, M. J. (2020). An experimental methodology to assess the climate impact on the energy performance of buildings: A ten-year evaluation in temperate and cold desert areas. *Applied Energy*, 264. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114730>
- Seo, J., Choi, M., Yoon, S., y Lee, B. J. (2023). Climate-dependent optimization of radiative cooling structures for year-round cold energy harvesting. *Renewable Energy*, 217. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119166>
- Sharbaf, S. A., y Schneider-Marin, P. (2025). Cost-benefit analysis of sustainable upgrades in existing buildings: A critical review. *Energy and Buildings*, 328, 115142. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2024.115142>
- Shen, P., Braham, W., y Yi, Y. (2019). The feasibility and importance of considering climate change impacts in building retrofit analysis. *Applied Energy*, 233–234, 254–270. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2018.10.041>
- Shen, P., y Lior, N. (2016). Vulnerability to climate change impacts of present renewable energy systems designed for achieving net-zero energy buildings. *Energy*, 114, 1288–1305. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.07.078>



- Soflaei, F., Shokouhian, M., y Soflaei, A. (2017). Traditional courtyard houses as a model for sustainable design: A case study on BWs mesoclimate of Iran. *Frontiers of Architectural Research*, 6(3), 329–345. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2017.04.004>
- Soflaei, F., Shokouhian, M., Tabadkani, A., Moslehi, H., y Berardi, U. (2020). A simulation-based model for courtyard housing design based on adaptive thermal comfort. *Journal of Building Engineering*, 31. <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101335>
- Soutullo, S., Sánchez, M. N., Enríquez, R., Olmedo, R., y Jimenez, M. J. (2017). Bioclimatic vs conventional building: Experimental quantification of the thermal improvements. *Energy Procedia*, 122, 823–828. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.413>
- Tajuddeen, I., y Sajjadian, S. M. (2024). Climate change and the built environment - a systematic review. En *Environment, Development and Sustainability*. Springer Science and Business Media B.V. <https://doi.org/10.1007/s10668-024-04962-2>
- Viñuela, J., Chévez, P., Martini, I., y San Juan, G. (2021). Fundamentos y metodología de encuesta para análisis y evaluación de hogares en condiciones de pobreza energética. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 25, 315–326. <http://hdl.handle.net/11336/173754>
- Wei, J., Li, H. X., Sadick, A. M., y Noguchi, M. (2024). A systematic review of key issues influencing the environmental performance of social housing. En *Energy and Buildings* (Vol. 319). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114566>
- Zhai, Z. J., y Helman, J. M. (2019). Implications of climate changes to building energy and design. *Sustainable Cities and Society*, 44, 511–519. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.10.043>

## FUENTES DE FINANCIAMIENTO

Este trabajo se desarrolla en el Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE) y se financia mediante una beca interna doctoral de CONICET (2024-2029) y los siguientes proyectos de I+D: ANPCYT FONCYT PICT 2019-02752 (2021-2025) y CONICET PIP 11220200101711CO (2021-2025).

## SUSTAINABLE SOCIAL HOUSING: EVALUATION OF PASSIVE DESIGN STRATEGIES IN SEMIARID CLIMATES.

**ABSTRACT** This study reviews 42 recent investigations (2017–2024) on Passive Design Strategies (PDS) applied to social housing in cold semi-arid climates (BSk, according to the Köppen–Geiger classification), integrating three key dimensions: economic viability, energy efficiency, and climate adaptability. The analysis shows that natural and nocturnal ventilation is the most frequent studied strategy (71%), followed by shading (55%), thermal insulation (31%), and thermal mass (26%), with energy demand reductions of up to 62.5% for heating and 20.5% for cooling. However, only 17% of the studies explicitly address economic analysis, highlighting a critical gap in the literature. Energy savings between 35% and 50% are identified in cases combining PDS with renewable energies, as well as thermal comfort improvements exceeding 39% in adapted typologies. The main contribution of this review lies in the comparative systematization of applicable strategies for highly vulnerable contexts, simultaneously considering thermal performance, costs, and resilience to projected temperature increases. The literature also points to the importance of comprehensive public policies and accessible financing to support the adoption of PDS in social housing, which could help improve housing quality and address energy poverty.

**Keywords:** social housing, economic viability, energy efficiency, climate adaptability.

## MEDICIÓN DE LA REFLECTIVIDAD DE LA RADIACIÓN INFRARROJA TÉRMICA DE LÁMINAS DE CONTROL SOLAR

**Luis P. Thomas, Beatriz M. Marino, Natalia Muñoz**

Grupo Flujos Geofísicos y Ambientales – Centro de Investigaciones en Física e Ingeniería del Centro de la Provincia de Buenos Aires (CONICET – UNCPBA – CICPBA) – Pinto 399, 7000 Tandil  
Tel. 0249-4385650 int. 2160 / 2159 – e-mail: [lthomas@exa.unicen.edu.ar](mailto:lthomas@exa.unicen.edu.ar)

**RESUMEN:** La comprensión del desempeño de las láminas de control solar en condiciones reales de uso importa para calcular el balance de la radiación total intercambiada a través de la envolvente edilicia. El presente estudio consiste en la medición de la reflectividad especular de la radiación infrarroja térmica, a incidencia casi normal, de cuatro láminas comerciales de control solar mediante experimentos específicos de laboratorio. La metodología se basa en el uso de una fuente de radiación de cuerpo negro con temperaturas en el rango 80°C–170°C y de una cámara termográfica sensible a una banda espectral infrarroja entre 7,5  $\mu\text{m}$  y 14,0  $\mu\text{m}$ . Se encuentra que las láminas analizadas tienen menor reflectividad que el vidrio y por ende mayores absorptividad y emisividad de la radiación infrarroja térmica. Estos resultados contrastan con los obtenidos cuando la reflectividad de las láminas se mide en el espectro infrarrojo solar con fotómetros que usan diodos que emiten en una longitud de onda determinada.

**Palabras clave:** láminas de control solar, acristalamientos, flujos de calor, eficiencia energética.

### INTRODUCCIÓN

Las superficies vidriadas de un edificio proporcionan iluminación natural y una vista del exterior al ambiente interior, y las propiedades térmico-radiativas de los materiales de acristalamiento son fundamentales para evaluar el rendimiento energético y el comportamiento térmico de los edificios (Muraj y Ostojić, 2023; Ramirez y Orozco, 2015; Fernández, 2023). El conocimiento de estas propiedades es necesario en numerosas aplicaciones prácticas, desde la termografía infrarroja hasta la simulación del rendimiento de edificios y las evaluaciones del confort térmico. La elección de las superficies vidriadas con las propiedades adecuadas mejora el rendimiento global del edificio al optimizar el uso de energía y el confort interior de acuerdo al clima local, la localización y las orientaciones de las superficies vidriadas (De Gastines et al., 2023; Shaker, 2024).

Las superficies vidriadas contribuyen a la pérdida y la ganancia de energía interna de los edificios mediante la transferencia de calor por conducción y radiación. La conducción puede reducirse mejorando el aislamiento térmico, como en las ventanas de doble y triple vidriado hermético (Leftheriotis y Yianoulis, 2020; Khaled y Berardi, 2021). Sin embargo, esto no cambia la transferencia de la energía solar que, en algunas ubicaciones y orientaciones, puede afectar significativamente el balance térmico de los espacios interiores. La luz visible (V), la radiación infrarroja (IR) y la radiación ultravioleta (UV) del espectro solar incidente son reflejadas, absorbidas en el vidrio, y transmitidas a los espacios interiores en diferente proporción de acuerdo con las propiedades espectrales del sistema vidriado. Los vidrios sódico-cálcico comunes son muy transparentes a la luz visible y permiten la transmisión parcial de la radiación UV e IR, mientras que son poco transmisores del calor emitido por cuerpos a temperatura ambiente. En particular, la reflexión y emisión de radiación IR puede considerarse como un fenómeno superficial y por ello se han desarrollado recubrimientos y láminas que pueden cambiar selectivamente las propiedades de los vidrios para adaptarlas al clima local (Leftheriotis y Yianoulis, 2020; Griffiths et al., 1992).



Los recubrimientos se implantan sobre la superficie de vidrio durante su fabricación y las láminas de materiales plásticos se colocan sobre las superficies vidriadas después de haber sido instaladas (Dang et al., 2020; Baetens et al., 2010). En particular, las láminas de control solar de poliéster representan una solución eficiente para mejorar el confort térmico y la eficiencia energética en espacios cerrados ya contruidos al disminuir la necesidad de climatización (Pereira et al., 2022; Pereira et al., 2019; Li et al., 2015; Bahadori-Jahromi et al., 2017). Las láminas se aplican sencillamente sobre el cristal de forma adhesiva, y son más económicas que el vidrio tratado con recubrimientos metálicos. Tienen diferentes usos de acuerdo al recubrimiento; también pueden mejorar la estética de las fachadas, ya que se ofrecen en una amplia gama de colores y tonalidades, lo que permite integrarlas de manera armoniosa en el diseño arquitectónico. Algunos modelos cuentan con acabados espejados o metalizados que aportan un toque moderno y elegante al exterior. La incorporación de tintes metálicos permite reducir la transmisión de la luz visible ofreciendo un alto grado de privacidad, ya que limitan la visibilidad desde el exterior sin sacrificar la luz natural que entra al interior. Esto las convierte en una excelente opción para edificios ubicados en zonas urbanas o con mucho tránsito peatonal. También pueden actuar como una barrera térmica en climas calurosos cuando bloquean la radiación IR solar, limitando la cantidad de calor que entra en los espacios interiores (Sedaghat et al., 2020; Yin et al., 2012). Al reducir la transferencia de calor, estas láminas ayudan a mantener un ambiente más fresco disminuyendo la necesidad de sistemas de refrigeración, los puntos calientes causados por la exposición directa al sol, haciendo más agradables los interiores y protegiendo los equipos de los efectos nocivos del calor. Por otra parte, las láminas también se pueden diseñar para reducir la pérdida de calor en invierno y por ende la necesidad de calefacción contribuyendo al ahorro energético (Moghaddam et al., 2021). Esto se traduce en una disminución de los costos operativos de un edificio, algo especialmente relevante en términos de sostenibilidad, y en una reducción de la huella de carbono.

El principal componente de estas láminas de control solar es el poliéster, un material sintético conocido por su durabilidad, flexibilidad y resistencia a factores externos como la humedad y las altas temperaturas. Este componente reduce significativamente la radiación UV solar que es responsable del deterioro de cortinas, alfombras y otros tejidos, muebles y demás objetos expuestos al sol dentro de las edificaciones (Andrady et al., 2023; van Kuijk, 1991). Además, protegen la piel y mejoran el confort visual de los usuarios, previniendo los efectos nocivos de la exposición solar. La capa base de poliéster se combina con una serie de recubrimientos que bloquean parcialmente la radiación solar de acuerdo al uso que se quiera dar. Las láminas de baja emisividad se colocan sobre las caras internas de las superficies vidriadas para mejorar las prestaciones de los vidrios, generando un ahorro energético en invierno y también en verano, tanto en el uso de cerramientos con doble vidriado hermético (DVH) como con vidrios simples. Las láminas de alta reflectividad se colocan sobre las caras externas para reducir parcialmente la radiación V e IR, generando un importante ahorro de energía de enfriamiento en comparación con el uso de acristalamientos transparentes o de láminas de baja emisividad, aunque pueden aumentar el requerimiento de calefacción en invierno.

En un trabajo anterior, Muñoz et al. (2025) presentaron los resultados del balance energético de un edificio construido en la zona bioclimática IVc – Templada Fría de transición (IRAM 11603, 2012). Dado los inviernos fríos de la región, el edificio consta de una importante superficie vidriada en la fachada enfrentada al NO, y en menor medida en las fachadas que dan al NE y SO, para captar una buena parte de la energía solar en invierno. Los ventanales DVH disminuyen el calor perdido en invierno y no cuentan con cortinas, en tanto que aleros protegen parcialmente el interior del sol durante el mediodía estival. Este tipo de diseño, habitual en la región, involucra una excesiva ganancia solar y deslumbramiento en verano que suelen crear un interior poco confortable. Este balance se estudió por medio de simulaciones realizadas con el software Energy Plus (2024) y las consecuencias de la instalación de dos tipos de láminas de control térmico sobre las superficies vidriadas se analizaron numéricamente. Se encontró que la lámina interior reduce el calor solar ingresado al interior mejorando el confort interior en verano, genera ahorros de energía de refrigeración en comparación con el que surge de usar acristalamientos transparentes, aunque empeora ligeramente la performance en invierno al reducir la energía solar ingresada en el edificio. Por otra parte, la lámina exterior reduce significativamente la radiación solar interior y el gasto energético para mantener la temperatura

constante en verano, aunque aumenta la necesidad de una mayor calefacción en invierno por la reducción del ingreso de la energía solar.

La caracterización de las propiedades ópticas de las láminas de control solar requiere un adecuado análisis de la transferencia de energía por radiación entre el exterior y el interior en condiciones normales de uso (Echániz et al., 2015). Estos resultados dependen críticamente de las características de las láminas. En particular, se especificaron la transmitancia de la luz visible, la reflectancia en el IR cercano y la reflectancia de la radiación UV solar medidas con un fotómetro *Linshang Solar Film Transmission Meter* LS 101 (resolución 0,1% y exactitud 2% para materiales transparentes) en las longitudes de onda 0,365  $\mu\text{m}$  para la radiación UV, 0,380–0,760  $\mu\text{m}$  para la radiación V y 0,940  $\mu\text{m}$  para la radiación IR. En este caso, la longitud de onda para la determinación de la reflectancia en el IR corresponde al rango de la radiación IR solar o “cercana” a la radiación V. Normalmente se elige la radiación de 0,940  $\mu\text{m}$  para la medición de la reflectividad IR en los fotómetros porque permiten medir mejor el efecto de bloqueo infrarrojo en las películas de absorción de calor solar. Otros fotómetros miden el bloqueo de la radiación IR solar para la radiación de 1,400  $\mu\text{m}$  para determinar mejor las características de películas de reflexión como las películas metálicas y las nano-películas cerámicas.

De estos parámetros medidos por el instrumento, se estima el coeficiente de ganancia de calor solar  $g$  considerando que la energía de la radiación solar sobre la superficie terrestre consta, aproximadamente, de 42 % de luz visible, 55% de radiación IR y 3% de radiación UV. Si bien los valores medidos en vidrios comunes concuerdan con el rango de valores de la transmisividad de la luz visible reportados en la bibliografía, las mediciones en longitudes de onda específicas con anchos de banda restringidos de las mediciones de las características en el UV e IR son discutibles dada la distribución espectral de la radiación solar. Se encontró que la reflectividad de la radiación IR solar del vidrio común es 18,6 %, 89,3 % con las láminas *Termax Balance*, 85,5 % con *Termax Diamont*, 80,1% con *Termax Tranlucent* y 95,0% con *Termax Prisma 40*. En particular, la reflectividad de la radiación IR del vidrio común medida de esta forma es menor que la reportada en la bibliografía como se verá más adelante.

En este estudio, se presentan los resultados de las mediciones de la reflectividad especular (i.e., no la hemisférica), a incidencia casi normal, de cuatro tipos de láminas de control solar de la radiación de cuerpo negro en el IR lejano. Las láminas se adosan a piezas de vidrio. La radiación de cuerpo negro tiene la ventaja de involucrar un rango espectral conocido que depende de la temperatura, de modo que se puede variar la radiación incidente al cambiar la temperatura de la fuente. La mejor caracterización de las láminas lograda mediante estas mediciones conduce al consiguiente más preciso balance de los flujos de calor entrantes y salientes de edificios con el fin de evaluar su sustentabilidad energética.

## ESTUDIOS PREVIOS Y FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Existen varios trabajos asociados con la medición de la reflexión en superficies transparentes y metálicas. Rubin (1985) presentó un conjunto completo de constantes y propiedades ópticas para vidrios transparentes con bajo contenido de hierro, utilizados usualmente en ventanas, utilizando un espectrómetro de transformada de Fourier. Midió la transmitancia desde el UV cercano hasta el IR lejano (0,1–10,0  $\mu\text{m}$ ), y la reflectividad  $R$  con una incidencia casi normal de 3 a 50  $\mu\text{m}$  (i.e. desde el IR cercano hasta el lejano). Para longitudes de onda de 3  $\mu\text{m}$  es  $R \sim 0,04$  y disminuye lentamente al aumentar la longitud de onda hasta casi anularse a 8  $\mu\text{m}$ . Rubin (1985) encontró dos máximos de  $R \approx 0,20$  y 0,25 en el IR correspondientes a las resonancias principales del Si–O centradas alrededor de 9,5 y 21,0  $\mu\text{m}$ , respectivamente. Los resultados de absorción solar muestran variaciones para diferentes vidrios, mientras que las propiedades en el IR lejano son prácticamente constantes para todos los tipos de vidrio. De estas propiedades espectrales del vidrio se deduce que el resultado depende de la composición espectral de la radiación incidente. En particular, en los materiales transparentes usados en los acristalamientos interesa el comportamiento de la radiación IR solar y la emitida por los cuerpos.

El desarrollo de cámaras termográficas permitió medir la radiación reflejada integrada en un rango espectral apreciable con buena precisión. Larsen y Hongn (2014) describen una metodología para medir la reflectancia de materiales especulares para diferentes ángulos de incidencia en el rango IR entre 8 y 14  $\mu\text{m}$  de una cámara termográfica y una fuente de radiación IR. Rüdiss et al. (2022) midieron la

reflectancia del vidrio con cámara termográfica, resolvieron las ecuaciones de Fresnel y realizaron la integración de Montecarlo sobre el espectro de cuerpo negro. Los cálculos se realizaron para diversas temperaturas del emisor a fin de establecer sus dependencias con su temperatura, y se analizó la transmitancia dependiente de la temperatura del vidrio. Mediante la aplicación de un algoritmo de optimización no lineal, derivaron fórmulas de ajuste para la reflectividad angular, la emisividad y la absorptividad con la mayor precisión hasta la fecha.

La fuente cuerpo negro es especialmente útil para los estudios de la radiación IR en laboratorio, ya que la emisividad  $\varepsilon = 1$  y la radiación emitida tiene una composición espectral conocida que depende de la temperatura. Por lo tanto, se puede medir la respuesta a la radiación IR de una muestra variando la temperatura absoluta  $T_f$  de la fuente. El máximo de radiación de un cuerpo negro se produce a la longitud de onda  $\lambda_{max}$  relacionada con  $T_f$  por medio de la ley de desplazamiento de Wein:

$$\lambda_{max} = \frac{2897,6 \mu m K}{T_f} \quad (1)$$

De acuerdo a la conservación de la energía, cuando una radiación estacionaria llega a la muestra se cumple que:

$$R + \alpha + \tau = 1, \quad (2)$$

donde  $R$  es la reflectividad,  $\alpha$  la absorptividad y  $\tau$  la transmisividad del material. En medios transparentes como el vidrio común se puede ignorar la energía transmitida para la radiación IR térmica en el rango de espesores y temperaturas ambiente típicos, es decir,  $\tau = 0$ . Entonces, no hay una cantidad significativa de radiación que alcanza la parte posterior de la muestra y se puede considerar que el fenómeno de la reflexión de la radiación IR es superficial.

Por otra parte, la ley de radiación térmica de Kirchhoff establece que la superficie de un cuerpo con temperatura  $T$  en equilibrio térmico emite la misma fracción de potencia de radiación que absorbe. Por lo tanto,  $\varepsilon = \alpha$  y, para un medio transparente irradiado con radiación IR, se cumple que:

$$\varepsilon = 1 - R, \quad (3)$$

ya que  $\tau = 0$ . La radiación detectada por el sensor de la cámara termográfica en la imagen reflejada de la fuente consta de la radiación de la fuente reflejada en la superficie del vidrio y la radiación emitida por el propio vidrio a la temperatura  $T_v$ . De acuerdo a las ecuaciones (2)–(3), la temperatura absoluta  $T_c$  medida por la cámara es:

$$T_c^4 = R T_f^4 + (1 - R) T_v^4. \quad (4)$$

Aquí se considera que la respuesta del sensor IR de la cámara es proporcional a  $T_c^4$ , una expresión similar a la ley de Stefan Boltzmann y una de las más utilizadas en la bibliografía (ver por ejemplo, Larsen y Hongn, 2014; Rüdisser et al., 2022 y referencias allí citadas). De la Ec. (4) se observa que, por ejemplo, para el vidrio con  $R \approx 0,1$ ,  $T_c$  depende en un 10% de  $T_f^4$  y 90% de  $T_v^4$ , y para valores más pequeños de  $R$  la dependencia con  $T_v^4$  se incrementa. Por lo tanto, el mayor esmero debe ponerse en la medición de  $T_v$ . De la Ec. (4) se calcula la reflectividad como:

$$R = \frac{T_c^4 - T_v^4}{T_f^4 - T_v^4}. \quad (5)$$

## DESCRIPCIÓN EXPERIMENTAL

El arreglo experimental usado para la determinación de  $R$  se muestra en la Figura 1, es similar al propuesto por Larsen y Hongn (2014) y Rüdisser et al. (2022), y probó ser práctico y eficiente. La fuente de cuerpo negro proviene de un disco en el interior de un cilindro metálico, ambos de color negro, adentro de un horno cerámico compuesto por una resistencia eléctrica y una cubierta aislante externa de lana de vidrio. El horno tiene una abertura de 1 cm en uno de sus lados por donde sale la radiación en la dirección del eje del cilindro. Las muestras consisten en diferentes piezas de vidrio comunes de 12cm×24cm de 3 y 6 mm de espesor, sobre las cuales se adhieren las láminas de control solar. Se usaron varios tipos de vidrios a fin de averiguar la dispersión de las características o posibles defectos, y no se encontraron diferencias significativas. Las temperaturas del disco y de la muestra se miden con termocuplas K y un medidor *Smartmeter* con 0,1°C de resolución y 0,25% de precisión; la temperatura ambiente se controla con un termómetro digital y otro de alcohol. La cámara termográfica Fluke TIR32 es de matriz de plano focal de 320×240 píxeles basada en microbolómetro no refrigerado. Mide en el rango de temperatura entre -20°C y 150°C con una precisión  $\pm 2^\circ\text{C}$  o 2% en una banda espectral IR desde 7,5  $\mu\text{m}$  a 14,0  $\mu\text{m}$  que corresponde a un rango de -66°C a 113°C de acuerdo a la Ec. (1).

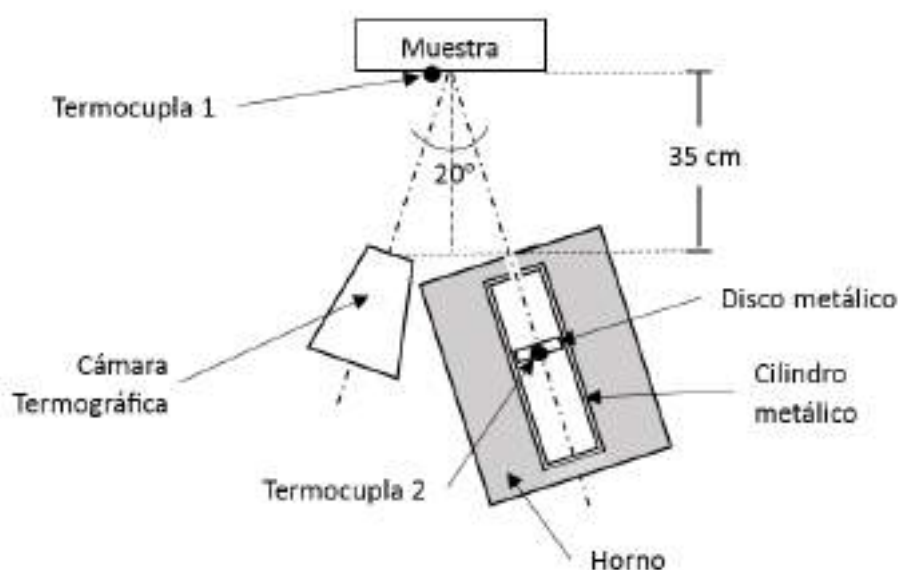


Figura 1. Disposición experimental.

Una serie de experimentos preliminares permitió calibrar las termocuplas y las medidas obtenidas con la cámara. En particular, la relación (o respuesta) entre la radiación recibida y la temperatura medida es una característica del sensor, la óptica y el software de la cámara, y normalmente no está disponible para el usuario. En nuestro caso, la respuesta se ajustó con la temperatura de la radiación de cuerpo negro captada por la cámara en forma directa desde la fuente y con la reflectividad del vidrio común de acuerdo a los resultados reportados por Rüdisser et al. (2022). Estas calibraciones redujeron al mínimo la dispersión entre medidas de temperatura del mismo objeto con diferentes instrumentos a  $\pm 0,2^\circ\text{C}$ . En la disposición experimental de la Figura 1, el haz emitido por la fuente incide sobre la muestra y la imagen reflejada se capta con la cámara termográfica (Figura 2). La distancia entre la fuente y la muestra es 35 cm y el ángulo entre el haz incidente proveniente del horno y el haz reflejado que llega a la cámara es  $20^\circ$ . Los valores medidos de  $R$  se pueden considerar como los correspondientes a un ángulo normal de incidencia ya que la reflexión especular de la radiación no polarizada no cambia significativamente para ángulos menores a  $30^\circ$  (Rüdisser et al., 2022). La incerteza de la medición de la reflectancia depende de las incertezas de las mediciones de la temperatura de la fuente, de la radiación reflejada y la del aire, y se calcula mediante la propagación de errores (Larsen y Hongn, 2014). Las incertezas más importantes son aquellas de la medición de la temperatura de la radiación reflejada obtenida con la cámara y la de la temperatura ambiente. Las calibraciones específicas realizadas previamente a los experimentos permitieron alcanzar una incerteza mínima total de 2% para temperaturas altas, si bien crece cuando disminuyen la reflectividad de la muestra y la temperatura de la fuente (Ecs. 4 y 5).



Los experimentos consisten en calentar el horno a  $180^{\circ}\text{C}$ , aproximadamente, durante 2 min por medio de una tensión eléctrica controlada. Luego se desconecta la alimentación del horno y se lo deja enfriar naturalmente durante unas tres horas. El intervalo útil de temperatura en los experimentos abarca el rango de la fuente (entre  $80$  y  $170^{\circ}\text{C}$ ). Para valores menores a  $80^{\circ}\text{C}$  surgen dispersiones entre medidas de muestras similares producto de los errores de cálculo (Ec. 5). Las temperaturas del horno, la de la muestra y la de la obtenida en el centro de la imagen captada de la cámara se registran cada 5 min. En los primeros 15 min desde la desconexión de la alimentación aparecen desviaciones de temperatura producto de la redistribución de la temperatura dentro del horno y no son analizadas aquí. Luego comienza un lento enfriamiento del horno que implica una radiación IR prácticamente estacionaria durante cada medición. La variación de la temperatura de la fuente con el tiempo permite obtener resultados con diferente radiación de cuerpo negro.

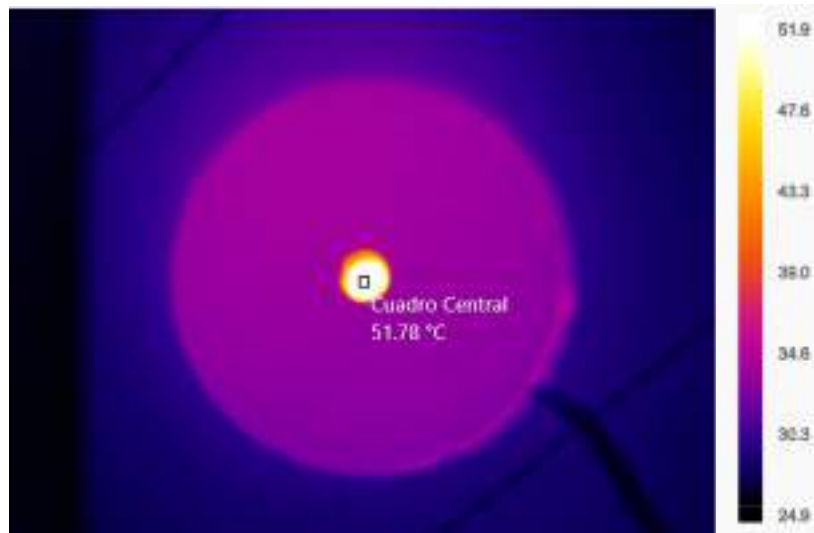


Figura 2. Imagen termográfica de la radiación infrarroja de un cuerpo negro reflejada sobre una muestra de vidrio. Las temperaturas de la escala se expresan en  $^{\circ}\text{C}$ .

## RESULTADOS

Los valores medidos de  $R$  de los vidrios con y sin láminas en función de la temperatura de la fuente se presentan en la Figura 3. Se realizaron tres mediciones de  $R$  por cada lámina obteniéndose valores similares, por lo que se reporta solo uno de ellos por lámina para facilitar la visualización en los gráficos. Los resultados coinciden con los reportados por Rüdiger et al. (2022) porque fueron empleados para la calibración de la respuesta de cámara. Sin embargo, las mediciones de  $R$  para los diferentes vidrios simples de 3 y 6 mm de espesor no presentan una dispersión apreciable. Se observa que todas las láminas tienen menor reflectividad en el IR térmico que el vidrio. El valor más grande de  $R$  para las láminas se obtiene con la lámina *Termax Balance* (lámina interior), un valor intermedio con la *Termax Translucent* (exterior), y los menores con *Termax Prisma 40* (exterior) y *Termax Diamont* (interior). Los resultados para estas dos últimas llaman la atención, ya que la lámina exterior es más oscura que la transparente interior. Sin embargo, cabe recordar que las propiedades de los materiales en el rango IR no guardan relación con la apariencia percibida por los ojos, es decir, en el rango V. Por otro lado, concuerdan los valores obtenidos con vidrios de 3 y 6 mm en todos los casos, de modo que las láminas no cambian la reflexión de radiación IR por el espesor del vidrio en la cual están instaladas.

La Figura 4 muestra que la reflectividad de las láminas respecto a la del vidrio tiene un ligero aumento cuando se reduce  $T_f$ . Sin embargo, una extrapolación de estos resultados parece indicar que  $R$  no superaría a la del vidrio a la temperatura ambiente típica ( $20^{\circ}\text{C}$ ) como evidencian las rectas de mejor ajuste. Los valores extrapolados de  $R/R_v$  a  $20^{\circ}\text{C}$  a partir de las rectas de mejor ajuste son: 0,87 para la lámina *Balance*, 0,68 para la *Translucent* y 0,55 para las *Prisma 40* y *Diamont*. La incerteza adicional de estos valores estimada a partir de la incerteza de los coeficientes de las rectas de mejor ajuste es menor al 1%.

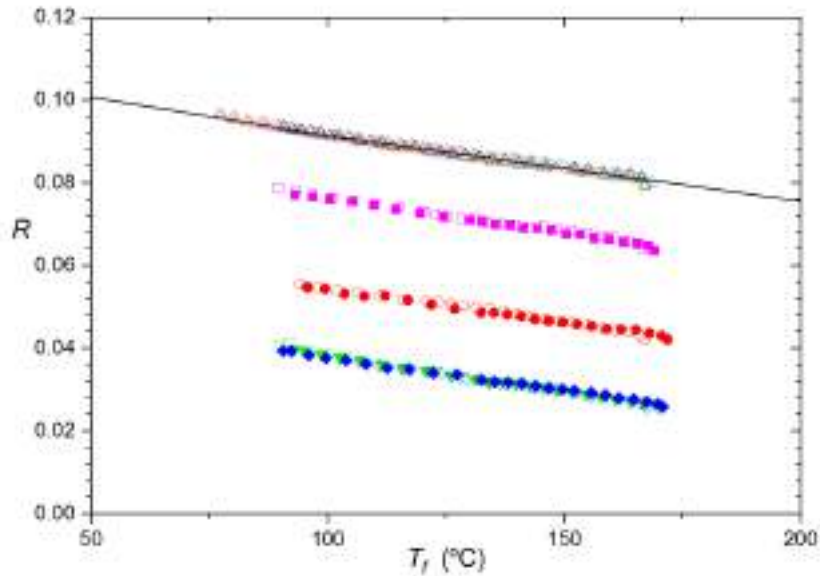


Figura 3. Reflectividad de la radiación infrarroja de cuerpo negro a temperatura  $T_f$  en vidrios simples de 3 y 6 mm ( $\Delta$ ), con láminas Termax Balance ( $\square$  magentas), Translucent ( $\circ$  rojos), Prisma 40 ( $\nabla$  verdes) y Diamont ( $\diamond$  azules) instaladas sobre vidrios de 3 mm (símbolos abiertos) y 6mm (símbolos llenos). La línea continua representa los valores obtenidos por Rüdissler et al. (2022).

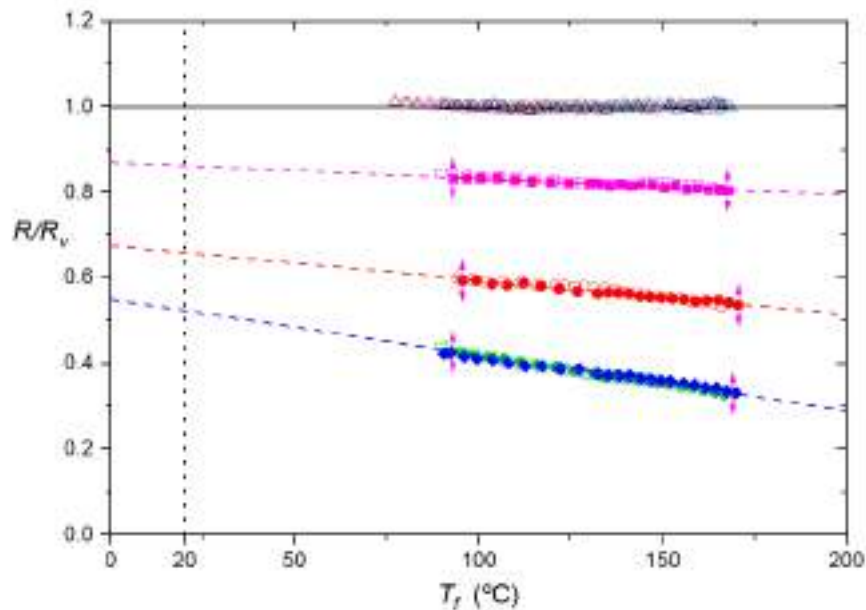


Figura 4. Resultados de la Figura 3 adimensionalizados con la reflectividad del vidrio simple. Las líneas de trazos son las rectas de mejor ajuste de los correspondientes puntos.

## DISCUSIÓN

Los resultados muestran baja dispersión y buena consistencia entre sí. Los valores determinados en los experimentos realizados con diferentes vidrios y a distintas temperaturas de las muestras coinciden dentro del error experimental. Claramente, la reflectividad de la radiación IR térmica de todas las láminas es menor a la del vidrio común, a diferencia de la reflectividad de la radiación IR solar como la medida con el fotómetro LS 101 descrito en la Introducción. Cabe señalar que el rango de sensibilidad de la cámara termográfica está en la banda espectral IR desde  $7,5\ \mu\text{m}$  a  $14,0\ \mu\text{m}$  y que la cámara capta solo una parte del espectro de la radiación reflejada. La existencia de bandas espectrales significativas por fuera de este intervalo, si existiesen, podría influir en los valores determinados de reflectividad,

dependiendo de la sensibilidad de la cámara que no es proporcionada por el fabricante. Para hallarlas se requiere de experimentos y equipamiento específico que están fuera del alcance de este trabajo.

Las mediciones obtenidas usando vidrios de 3 y 6 mm concuerdan entre sí, tengan o no láminas adosadas. Por lo tanto, la reflexión de la radiación IR es un fenómeno básicamente superficial y no es afectada por el espesor y las características de la cara trasera del vidrio. Así, este resultado conocido en el caso de los vidrios es aplicable también a las láminas y se confirman las hipótesis introducidas. De la ley de Kirchhoff (Ec. 3) se deduce que la emisividad aumenta si se instala cualquiera de las láminas en vidrios comunes. Considerando que  $R$  disminuye aproximadamente un 85% con la *Termax Balance*, un 60% con la *Termax Translucent*, y un 45 % con la *Termax Prisma 40* y *Diamond* respecto al vidrio a temperaturas superiores a la del ambiente, la absorptividad y la emisividad de dichas láminas es 92%, 94% y 96%, respectivamente. El aumento de la absorptividad implica que la energía de radiación es captada en mayor medida por la lámina y el calor absorbido puede aumentar la temperatura superficial del vidrio sobre el que está instalada. No se detectó tal aumento en los experimentos probablemente por la baja intensidad de la fuente dada la escasa superficie irradiada, y porque la distribución del calor en toda la muestra hace que este aumento sea del orden de la incerteza experimental. Sin embargo, es de esperar que las superficies vidriadas grandes sometidas a la intensa radiación IR de verano estén expuestas a calentamientos, dilataciones y tensiones diferenciales que rompan los acristalamientos.

## CONCLUSIONES

Se midió la reflectividad con incidencia casi normal de láminas de control de la radiación solar IR de cuerpo negro en el rango de temperatura 80°C–170°C con una cámara termográfica. Aunque el equipamiento disponible permitió mediciones en un rango acotado y a temperaturas mayores que la del ambiente usual, los resultados son sugestivos. Se encuentra que todas las láminas tienen menor reflectividad en el rango de la radiación IR térmica que el vidrio y por ende mayor emisividad. Estos resultados contrastan con los obtenidos cuando se mide la reflectividad en el rango de la radiación IR solar con fotómetros que usan diodos que emiten en una longitud de onda determinada. Las diferencias sustanciales se hallan en la longitud de onda de la máxima intensidad de la radiación y en la distribución espectral de la emisión de cuerpo negro empleada aquí. En un próximo estudio se intentará medir la reflectividad de las láminas con radiación de cuerpo negro con temperaturas más próximas a la del ambiente, y la emisividad en forma directa. La estimación del posible impacto del aumento de temperatura en los vidrios en condiciones estivales y las recomendaciones prácticas para los diseñadores serán analizadas en un próximo trabajo.

## REFERENCIAS

- Andrady A.L., Heikkilä A.M., Pandey K.K., Bruckman L.S., White C.C., Zhu M. y Zhu, L. (2023). Effects of UV radiation on natural and synthetic materials. *Photochemical and Photobiological Sciences* 22, 5, 1177–1202.
- Baetens R., Jelle B.P. y Gustavsen A. (2010). Properties, requirements and possibilities of smart windows for dynamic daylight and solar energy control in buildings: A state-of-the-art review. *Solar energy materials and solar cells* 94, 2, 87–105.
- Bahadori-Jahromi A., Rotimi A., Mylona A., Godfrey P. y Cook, D. (2017). Impact of Window Films on the Overall Energy Consumption of Existing UK Hotel Buildings. *Sustainability* 9, 5, 731.
- Dang S., Yi Y. y Ye H. (2020). A visible transparent solar infrared reflecting film with a low long-wave emittance. *Solar Energy* 195, 483–490.
- De Gastines M., Correa E. y Pattini A. (2023). Etiquetado energético de ventanas en Argentina: análisis crítico de la norma IRAM 11507–6 (2018) y propuesta alternativa. *Energías Renovables y Medio Ambiente* 52, 41–49.
- Echániz T., Setién-Fernández I., Pérez-Sáez R.B., Prieto C., Galindo R.E. y Tello M.J. (2015). Importance of the spectral emissivity measurements at working temperature to determine the efficiency of a solar selective coating. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 140, 249–252.
- EnergyPlus Documentation (en línea) (2024). Input Output Reference. Version 24.1.0 En <https://energyplus.net/documentation>. Recuperado de URL el 5 de agosto de 2024.

- Fernández A. (2023). Incidencia de las superficies vidriadas en la eficiencia energética de viviendas: dos casos en Tucumán. *Arquisur Revista* 13, 24, 94–103.
- IRAM 11603 (2012). Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Acondicionamiento térmico en Edificios: Clasificación Bioambiental de la República. Buenos Aires, Argentina.
- Khaled K. y Berardi U. (2021). Current and future coating technologies for architectural glazing applications. *Energy and Buildings* 244, 111022.
- Griffiths P., Batty W.J., Probert S.D. y Knight C. (1992). Solar-control films. *Applied energy* 41, 4, 261–284.
- Larsen S.F. y Hongn M. (2014). Determining the infrared reflectance of specular surfaces by using thermographic analysis. *Renewable Energy* 64, 306–313.
- Leftheriotis G. y Yianoulis P. (2020). Glazings and Coatings. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. doi:10.1016/b978--12-819727-1.00022-4 10.1016/B978--12-819727-1.00022-4
- Li C., Tan J., Chow T.T. y Qiu, Z. (2015). Experimental and theoretical study on the effect of window films on building energy consumption. *Energy and buildings* 102, 129–138.
- Moghaddam S.A., Mattsson M., Ameen A., Akander J., Gameiro Da Silva M. y Simões N. (2021). Low-emissivity window films as an energy retrofit option for a historical stone building in cold climate. *Energies* 14, 22, 7584.
- Muñoz N., Thomas L.P. y Marino B.M. (2025). Ahorro energético en superficies vidriadas usando láminas de control solar y térmico. *Energías Renovables y Medio Ambiente*. En prensa.
- Muraj I. y Ostojić S. (2023). An Environmental Quality Assessment of Office Buildings: The Impact of a Glass Façade on Users in Different Climate Contexts in Croatia. *Buildings* 13, 12, 3092.
- Pereira J., Gomes M.G., Rodrigues A.M. y Almeida M. (2019). Thermal, luminous and energy performance of solar control films in single-glazed windows: Use of energy performance criteria to support decision making. *Energy and buildings* 198, 431–443.
- Pereira J., Teixeira H., Gomes M. ., Moret Rodrigues A. (2022). Performance of Solar Control Films on Building Glazing: A Literature Review. *Applied. Science* 12, 5923.
- Ramírez D. y Orozco S. (2015). La envolvente arquitectónica y su influencia en la iluminación natural. *Hábitat Sustentable* 5, 1, 44–53.
- Rubin M. (1985). Optical properties of soda lime silica glasses. *Solar Energy Materials* 12, 4, 275–88.
- Rüdiger D., McLeod R.S., Wagner W. y Hopfe C.J. (2022). Numerical derivation and validation of the angular, hemispherical and normal emissivity and reflectivity of common window glass. *Building and Environment* 207, 108536.
- Shaker L.M. (2024). Evaluating UV-Protective Low-Emissivity Window Films: Implications for Thermal and Visual Comfort in Luminous Office Buildings. *AUIQ Complementary Biological System* 1, 2, 46–60.
- Sedaghat A., Alkhatib F., Oloomi S.A., Sabri F., Salem H., Sabati M., ... y Negahi A. (2020). Experimental study on the performance of solar window films in office buildings in Kuwait. *Journal of Nanoparticle Research* 22, 4, 85.
- van Kuijk F.J. (1991). Effects of ultraviolet light on the eye: role of protective glasses. *Environmental health perspectives* 96, 177–184.
- Yin R., Xu P. y Shen P. (2012). Case study: Energy savings from solar window film in two commercial buildings in Shanghai. *Energy and Buildings* 45, 132–140.

## MEASUREMENT OF THE REFLECTIVITY OF THE THERMAL INFRARED RADIATION IN SOLAR CONTROL FILMS

**ABSTRACT:** Understanding the performance of solar control films under real conditions of use is important for balancing the total radiation exchanged through the building envelope. The present study deals with the measurement of the specular reflectivity of the thermal infrared radiation, at almost normal incidence, for four commercial solar control films in specific laboratory experiments. The methodology is based on the use of a black body radiation source with temperatures between 80°C and 170°C, and a thermal imaging camera that is sensitive to an infrared spectral range between 7.5  $\mu\text{m}$  and 14.0  $\mu\text{m}$ . It is found that the analysed films have lower reflectivity than glass and, consequently, upper

absorptivity and emissivity of thermal infrared radiation. These results contrast with those obtained when the reflectivity of the films is measured in the infrared solar spectrum with photometers that use diodes emitting in a specific wavelength.

**Keywords:** solar control films, glazing, heat fluxes, energy efficiency.

## EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES DEL AMBIENTE TÉRMICO EN VIVIENDAS SOCIALES DE TUCUMÁN

**Viviana M. Nota, Sara Lía Ledesma, Cecilia F. Martínez, Sebastián A. Bollea**

Centro de Estudios Energía, Habitabilidad y Arquitectura Sustentable (CEEHAS) – Facultad de  
Arquitectura y Urbanismo – Universidad Nacional de Tucumán  
Av. Roca 1800 – San Miguel de Tucumán.

email: [vnota@herrera.unt.edu.ar](mailto:vnota@herrera.unt.edu.ar) [sledesma@herrera.unt.edu.ar](mailto:sledesma@herrera.unt.edu.ar)

**RESUMEN:** El trabajo presenta la evaluación de las condiciones ambientales en viviendas sociales de un barrio de operatoria del estatal de la provincia de Tucumán. Se seleccionaron dos unidades representativas, una original desocupada (VOD) y otra modificada y ocupada (VMO), en las que se registraron las variables de temperatura interior y exterior para la condición de invierno y verano, se estableció el comportamiento térmico de la envolvente y se determinaron los índices de prestaciones energéticas. Asimismo, se realizaron encuestas a los usuarios sobre las condiciones térmicas y hábitos de uso. Los resultados permitieron reconocer el desempeño térmico de las viviendas y elaborar propuestas básicas de mejora de la envolvente, orientada a optimizar la habitabilidad y reducir la demanda energética en la vivienda social en clima cálido-húmedo.

**Palabras claves:** energía, habitabilidad, confort térmico y vivienda social.

### INTRODUCCIÓN

La vivienda social tiene como finalidad principal atender el déficit habitacional existente, facilitando el acceso a una vivienda adecuada a la población con recursos económicos insuficientes (UN-Habitat. (2019). En vista a los Objetivos de Desarrollo Sostenible corresponde reformular la arquitectura y la planificación de la Vivienda con normas, estándares y buenas prácticas de diseño y construcción (IRAM. (2019). que posibiliten intervenciones menos impactantes con el medio ambiente y los recursos naturales, que contemplen el problema energético mitigando los efectos negativos de la edificación, para un desarrollo urbano sustentable (UNEP & GlobalABC; 2025)

El análisis de las condiciones del ambiente térmico en viviendas sociales constituye un desafío clave para la arquitectura y la planificación urbana sustentable, ya que impacta directamente en la habitabilidad y en el uso eficiente de la energía. Estudios han demostrado que, en el contexto latinoamericano, muchas de estas viviendas presentan envolventes con escasa capacidad de control térmico, lo que deriva en fluctuaciones significativas de temperatura y humedad, afectando las condiciones de confort interior y aumentando la dependencia de sistemas de climatización artificial (Vázquez-Torrés et al., 2025).

En el Noroeste del país (NOA), esta problemática se agudiza por las condiciones climáticas extremas y por la aplicación de soluciones constructivas estandarizadas, generalmente desvinculadas de criterios bioclimáticos. Estudios realizados sobre las condiciones térmicas de sistemas constructivos, en la provincia de Tucumán han demostrado que la incorporación de aislamiento y la corrección de puentes térmicos puede reducir significativamente la transmitancia térmica de muros y techos, mejorando la eficiencia energética de las viviendas (Ledesma, Nota, 2021)

Con respecto a la relación entre ambiente térmico, eficiencia energética y percepción de los usuarios, diferentes investigaciones demostraron que, al no considerar en la evaluación pos ocupación la



respuesta subjetiva a las condiciones térmicas, se limita la comprensión de la manera en que interactúan los habitantes con el espacio construido (Rodríguez, Medina y Pinzón, 2019).

Diversos estudios identificaron estrategias adaptativas empleadas por los ocupantes de viviendas sociales frente a situaciones de inconfort térmico, confirmando que prácticas cotidianas, tales como la obstrucción solar y la ventilación selectiva, son variables determinantes de las mencionadas condiciones (Simões et. al, 2025).

El presente trabajo, que se inscribe en el marco del Proyecto de Investigación PIUNT B/717 “Vivienda social sostenible en clima cálido húmedo. Desarrollo de métodos y técnicas que contribuyan a la calidad ambiental y certificación energética”, aborda la evaluación de las condiciones del ambiente térmico en viviendas sociales de un barrio de operatoria estatal de la provincia de Tucumán.

Se seleccionaron dos unidades representativas, una original desocupada (VOD) y otra modificada y ocupada (VMO), en las que se registraron las variables de temperatura interior y exterior en invierno y verano, se analizaron las propiedades térmicas de los elementos de la envolvente y se determinaron índices de prestaciones energéticas. Complementariamente se realizaron entrevistas a los usuarios del barrio para indagar sobre la percepción de las condiciones térmicas y los hábitos de uso de la vivienda.

La información obtenida, permitió identificar fortalezas y debilidades en el desempeño térmico de las viviendas y elaborar propuestas básicas de mejora de la envolvente, orientada a optimizar la habitabilidad y reducir la demanda energética, contribuyendo así a la discusión técnica y académica sobre estrategias de intervención en vivienda social en climas cálidos y templados del NOA.

## DESARROLLO

Las viviendas analizadas se ubican en un conjunto habitacional de 126 unidades denominado “Barrio Municipal”, en el municipio de Yerba Buena, construido por el Instituto Provincial de Vivienda y Desarrollo Urbano de la provincia de Tucumán.

La localidad pertenece a la zona Bioambiental Iib (IRAM 11603, 1996). Presenta veranos cálidos y húmedos con temperatura máxima media superior a los 32°C y máximas absoluta de 41,8°C con baja amplitud térmica que no supera los 12°, siendo la HR media máxima de 85%, lluvias frecuentes y días mayormente nublados. Los inviernos son fríos y secos con temperatura media mínima de 6°C y HR media de 65%. En relación a las necesidades bioclimáticas el 31,9% de las horas del año se requiere calefacción, el 37,2% se presenta situación de confort y un 30,9% se requiere enfriamiento (Gonzalo, 2003). Es decir que la localidad presenta un clima mixto, en donde resulta necesario considerar en el diseño de edificios tanto las estrategias de verano de prevención de calor y ventilación natural como las de invierno de reducción de pérdidas de calor y calefacción solar pasiva.



*Figura 1: Barrio Municipal. Fuente: Elaboración propia en base a Google maps.*



*Figura 2: Vista de las viviendas del B° Municipal*



Las viviendas seleccionadas se ubican en lotes regulares de 9,5m por 28,5m (Fig.8), cuentan con una superficie cubierta de 59 m<sup>2</sup> y se encuentran dispuestas en forma apareada, en una planta, con frente al norte y contrafrentes al sur y este. Los muros son de ladrillo hueco de 0,18m con ambas caras revocadas y techo de chapa galvanizada con cámara de aire, cielorraso de placa de yeso y aislación de lana de vidrio de 2", las aberturas cuentan con aleros de 30 cm de profundidad igual al N, S y E. La vivienda modificada y ocupada presenta una galería en el acceso hacia el norte y ventanas con carpinterías mejoradas de aluminio y doble vidriado hermético.

En su diseño se puede observar que no se prioriza la orientación norte, ya que las mayores superficies se encuentran al este, los dormitorios y sus ventanas se ubican al este y al sur y el estar posee una sola de sus ventanas al norte, limitando el aporte solar para la calefacción pasiva de los ambientes de la vivienda.

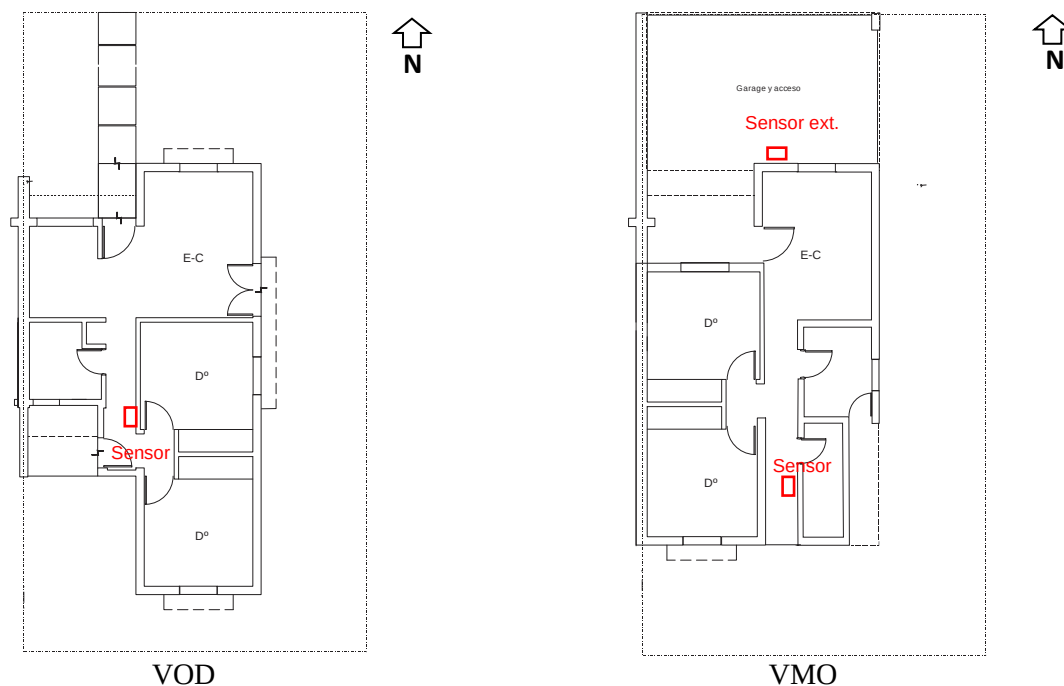


Figura 3: Plantas de las viviendas seleccionadas

#### **Análisis de variación de temperaturas interior y exterior.**

A fin de evaluar las condiciones ambientales interiores, en primer lugar, se realizaron mediciones continuas de las variables de temperatura y humedad relativa en para la condición de invierno y verano, tanto en el interior de las viviendas como en el exterior. Para ello se utilizaron registradores de datos HOBO U12-012 que se colocaron en las dos viviendas, VOD y VMO. Los registros se realizaron durante los meses de noviembre, diciembre y enero en verano y en el mes de junio para invierno. La ubicación de los sensores se indica en la Fig. 3.

La figura 4, que muestra los registros de temperaturas del período cálido, se puede observar que la variación de la temperatura del aire exterior (Te) se encuentra entre los 39,8 °C y 13,2 °C, con un valor promedio de 26,2 °C, mientras que la temperatura interior de la VMO se encuentra entre 32,8 °C y 21,2 °C, con un valor promedio de 26,9 °C; la temperatura interior de la VOD presenta valores muy similares, con registros entre 32,5 °C y 20,3 °C y un valor promedio de 27,0 °C (Fig. 4).

Al analizar la Te en este período, se observa que, el 25% de los registros se encuentra dentro del rango de confort térmico (23 a 26°C), correspondiendo un 30% a las mediciones que se encuentran por debajo de los 23°C y un 45 % a las que superan los 26°C. Estas últimas alcanzan un valor máximo de casi 40°C, con un valor promedio de 30,9°C.

Al analizar la variación de la temperatura interior (Ti) de ambas viviendas, se observa en primer lugar que, a pesar que una de ellas se encuentra ocupada, presentan un comportamiento similar. Los registros dentro del valores de confort se encuentran en un 26 %, la vivienda MDO y en 21 %, la

VOD; solo en un 6 % y 9%, respectivamente, se encuentran por debajo de los 23°C, y un 68 y 70 % superan los 26°C, los que alcanzan un valor máximo de prácticamente 33°C y un valor promedio de 28,2° y 28,9° respectivamente (Fig. 5).

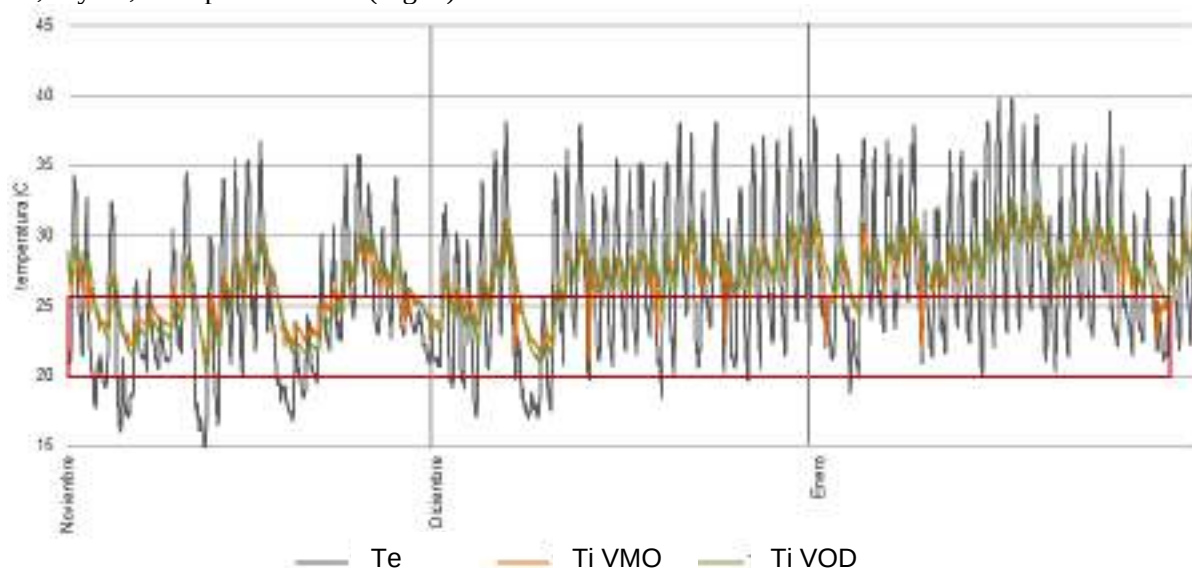
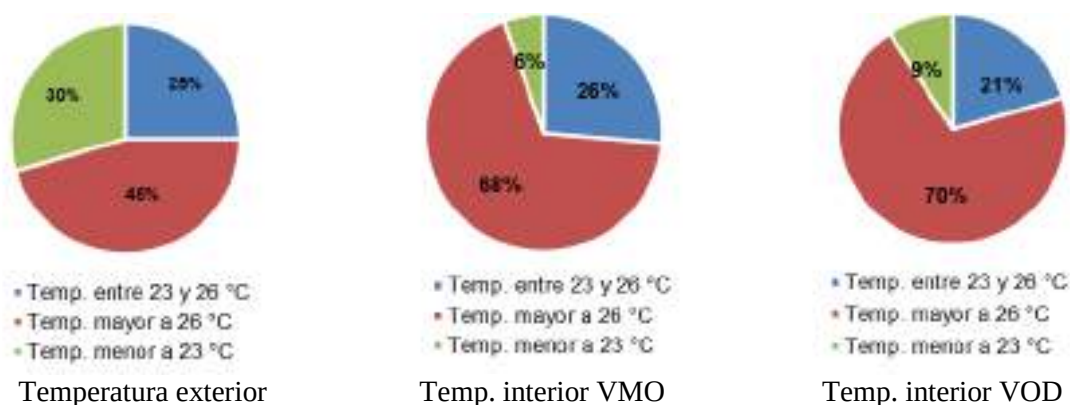


Figura 4: Variación de temperaturas exterior y en el interior de las viviendas analizadas en tres meses del periodo cálido



Temperatura exterior

Temp. interior VMO

Temp. interior VOD

Figura 5: Análisis de los valores promedios de las temperaturas del período de verano.

El mes de enero, que presenta temperaturas más elevadas la mayor parte de los días, se puede observar que Te promedio es de 27,8°C, correspondiendo el 54 % de los registros a valores superiores a 26°C. Las mediciones de la temperatura interior de las VMO y VOD presentan valores promedio de 28,3°C y 27,7°C y registros superiores a 26°C en un 89% y 94 %, respectivamente (Fig. 6).

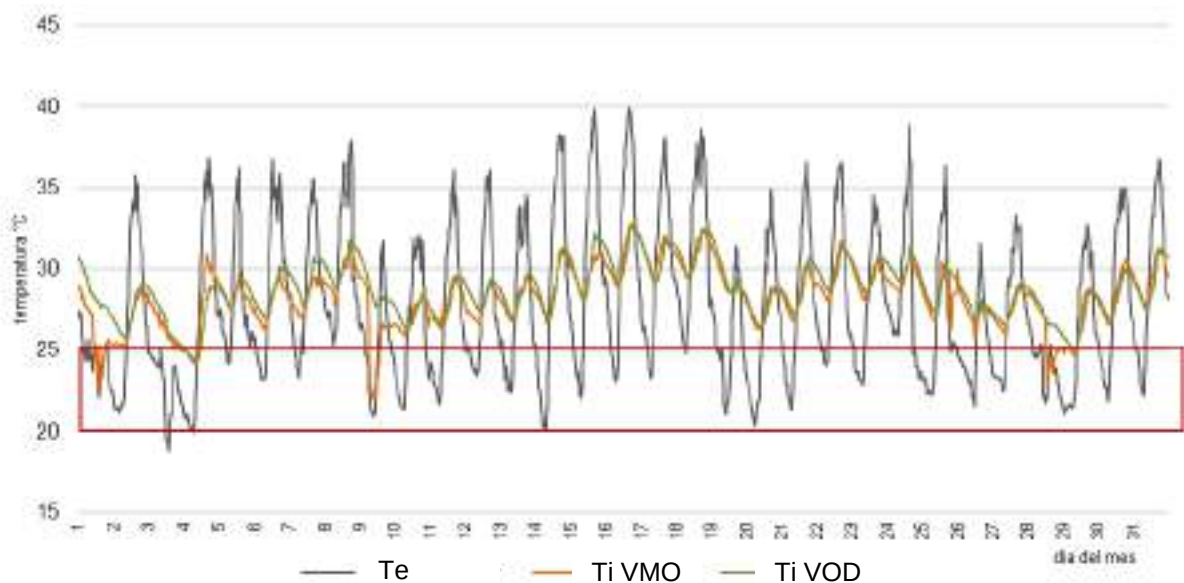


Figura 6: Registros de temperaturas exterior e interior en el mes de enero.

Al analizar la variación en un día típico promedio (12 de diciembre), se observa que solo la Te presenta valores menores a los 26 °C, ya que ambas viviendas superan el rango de confort durante todo el día. Se observa en la VMO, que a pesar que en horas de la madrugada, la Te es más baja que la Ti, no se favorece el enfriamiento nocturno, para refrescar los ambientes internos; se infiere, por lo tanto, que posiblemente razones de seguridad o modos de vida las carpinterías se encuentran cerradas durante toda la noche.

Solo en tres ocasiones en el mes de enero, se observó un comportamiento diferente, donde la TI de la VMO, acompañó el descenso de la Te. Se infiere que solo en esas oportunidades se abrieron las ventanas y se favoreció el enfriamiento interior por efecto de la ventilación natural, quedando demostrada la importancia de favorecer la ventilación natural selectiva (Fig. 7).

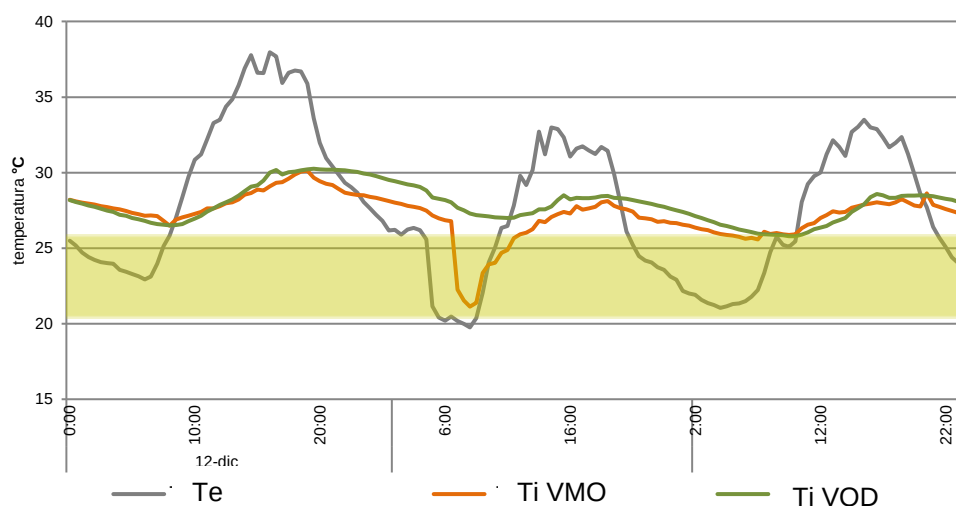


Figura 7: Variación de temperaturas en un día promedio (12/12) y un día atípico (13/12) de verano

La figura 8 muestra la variación de las temperaturas en el período invernal, se puede observar que, la Te se encuentra dentro del rango de confort térmico (mayor a 18°) en un 19% de los registros, con un valor promedio de 19,5°; la Ti de la vivienda desocupada, en un 23% de los registros se encuentra dentro del nivel de confort, con un valor máximo de 20°C y un valor promedio de 18,3°; en cambio la VMO, presenta el 94% de los registros se encuentran dentro del rango de confort, dado que cuenta con calefactores a gas, encendidos durante todo el día.

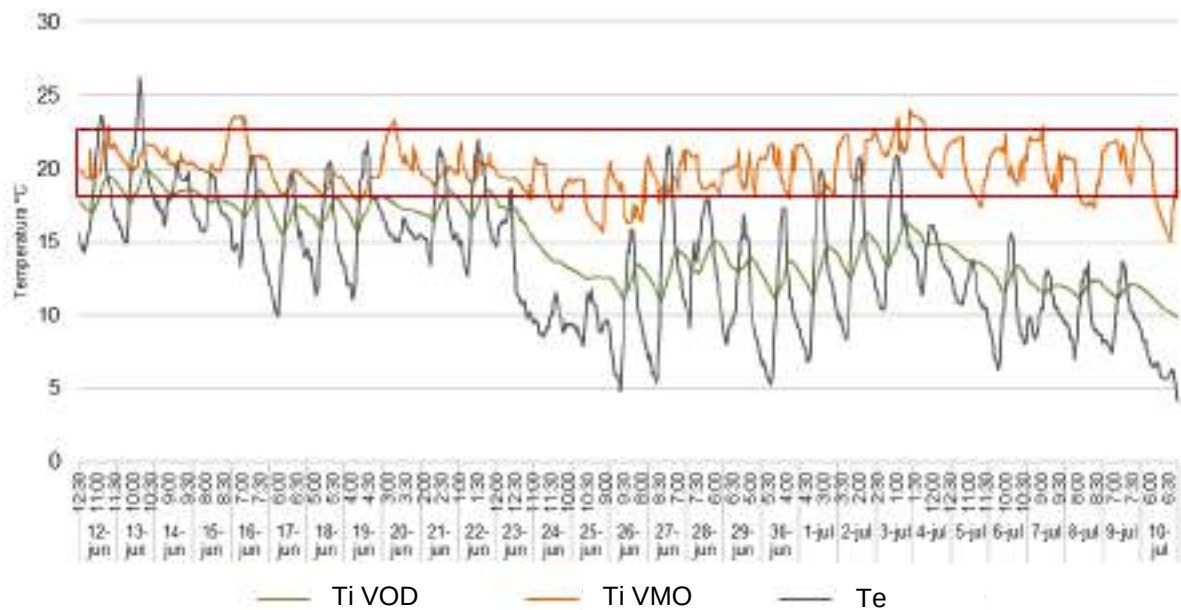


**Figura 8: Registros de temperatura interior y exterior en invierno de las viviendas**  
 En el análisis comparativo entre la Te y la Ti de la VOD, en un día típico de invierno, se observa que ambas se encuentran por debajo del rango de confort térmico durante todo el día, y si bien la Te alcanza valores próximos a 18 °C, la Ti se mantiene entre los 12 y 14 °C. Estos registros ponen en evidencia que las viviendas, no alcanzan las condiciones de confort interior y solamente es posible acercar las temperaturas a las de bienestar térmico, a partir del uso de sistemas de calefacción, con el consecuente consumo de energías no renovables y gasto energético (Fig. 9).

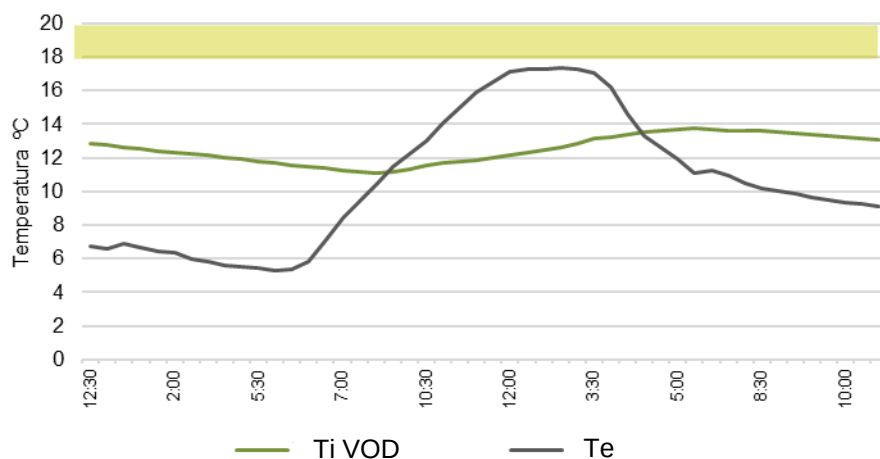


**Figura 9: Variación de temperaturas de un día típico de invierno**

### **Análisis de percepción del ambiente térmico**

Para conocer las condiciones de confort percibidas por los usuarios, se realizaron encuestas, que respondidas por los ocupantes de 28 viviendas del barrio. Las mismas se organizaron en secciones específicas sobre la calidad de vivienda, su confort en verano y en invierno y consumos de energía.

Las respuestas referidas a la sensación térmica interior percibida en cada estación, muestran que, en verano el 43 % las percibe como calientes, el 11% con un calor bochornoso, y solo un 11% lo reconoce confortables. En invierno, el 82% las considera entre muy frías y frías (Fig.10).

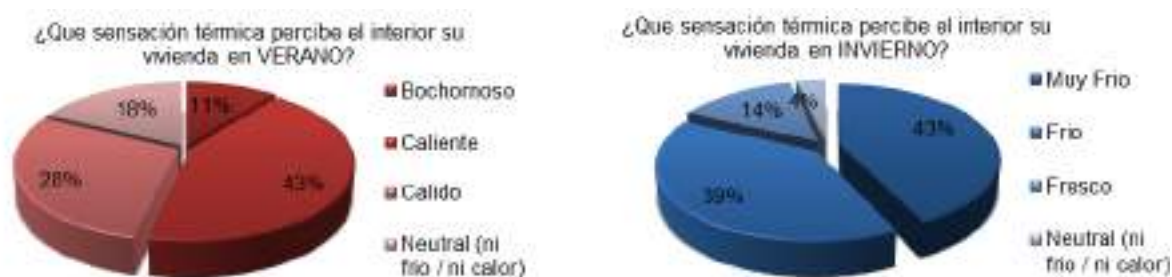


Figura 10: Sensación térmica percibida por los usuarios en las viviendas

El 82% de los encuestados expresaron la necesidad de contar con refrigeración mecánica (aire acondicionado o ventilador) en verano. En invierno, el 64% de los habitantes consideraron necesario contar con sistemas de calefacción. La totalidad de los encuestados manifiesta poseer algún sistema para la climatización, el 93% dispone de aire acondicionado, el 43% de ventiladores, el 54% de calefactor a gas y el 61% de estufas eléctricas. Otro factor percibido es la presencia de corrientes de aire molestas en el invierno proveniente de puertas en un 39%, ventanas 35% y rejillas de ventilación de gas; lo que denota la calidad de las aberturas convirtiéndose en gran factor de pérdida de calor.

Los votos de sensación térmica expresado por los ocupantes de las viviendas, permitió determinar el PMV (Predicted Mean Voted) y el índice PPD (Predicted Percentage Dissatisfied) (%), a partir de asumir los votos entre -3, -2, y, entre +2 y +3, como votos de los ocupantes insatisfechos (ASHRAE, 55-2017) (Tabla 1). La ponderación de los votos de sensación térmica de los ocupantes, posibilitan observar que, para la estación cálida, la PMV es de 1,32, lo que corresponde a sensación de ligeramente cálido y el índice PPD (%), establece un 48% de ocupantes en situación de inconformidad frente a las condiciones térmicas del aire. Para la estación fría, los votos de sensación térmica de los ocupantes, dan valores de PMV de -2,14 (frío). El índice PPD (%), establece un 79% de ocupantes en situación de inconformidad por frío, en el interior.

Tabla 1: Condiciones de sensación térmica verano e invierno

|          | Mucho calor<br>3 | Calor<br>2 | Ligeram. cálido<br>1 | Ligeram. frío<br>-1 | Frío<br>-2 | Mucho frío<br>-3 | Neutro<br>0 | PMV   | PPD |
|----------|------------------|------------|----------------------|---------------------|------------|------------------|-------------|-------|-----|
| Verano   | 3                | 12         | 8                    | 0                   | 0          | 0                | 5           | 1,32  | 48% |
| Invierno | 0                | 0          | 0                    | 4                   | 11         | 12               | 1           | -2,14 | 79% |

En síntesis, con las mediciones y las encuestas queda demostrado que las viviendas no posibilitan condiciones de confort interior, lo cual depende directamente de la eficiencia térmica de los elementos de la envolvente y de las características de diseño de las unidades habitacionales desarrolladas en operativas estatales.

#### **Análisis de la carga térmica de la envolvente:**

A fin de analizar el comportamiento térmico de las viviendas, se determinaron las propiedades térmicas de los componentes de la envolvente, así también la verificación del cumplimiento de los valores normados, a partir de la aplicación del programa CEEMAKMP.xls (Gonzalo, 2004).

Los resultados demostraron que, el sistema constructivo empleado en los muros de las viviendas, presenta un valor de K que supera los valores máximos admisibles establecidos por Normas considerando el nivel mínimo de confort, tanto para verano como para invierno (Tabla 2). En el caso del techo, el coeficiente K cumple solamente con el mínimo nivel establecido por Normas, para verano e invierno (Tabla 2)

Tabla 2: Valores de transmitancia térmica de los elementos constructivos y verificación de normas.

| Muros                             |                                       | Techo                          |                                       |
|-----------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|
| K calculado<br>W/m <sup>2</sup> C | K norma nivel C<br>W/m <sup>2</sup> C | K calculado W/m <sup>2</sup> C | K norma nivel C<br>W/m <sup>2</sup> C |

|      |      |           |           |      |      |           |           |
|------|------|-----------|-----------|------|------|-----------|-----------|
| Ver. | Inv. | Ver.1,80  | Inv. 1,82 | Ver. | Inv. | Ver. 0,72 | Inv. 1,00 |
| 2,21 | 2,12 | No cumple | No cumple | 0,59 | 0,57 | Cumple    | Cumple    |

Se verificó, además, el riesgo de condensación superficial e intersticial de los elementos de la envolvente de las viviendas con el uso del programa CEEMACOND.xls (Gonzalo, 2008) basado en las Normas IRAM 11601 y 11625 (Fig.11).

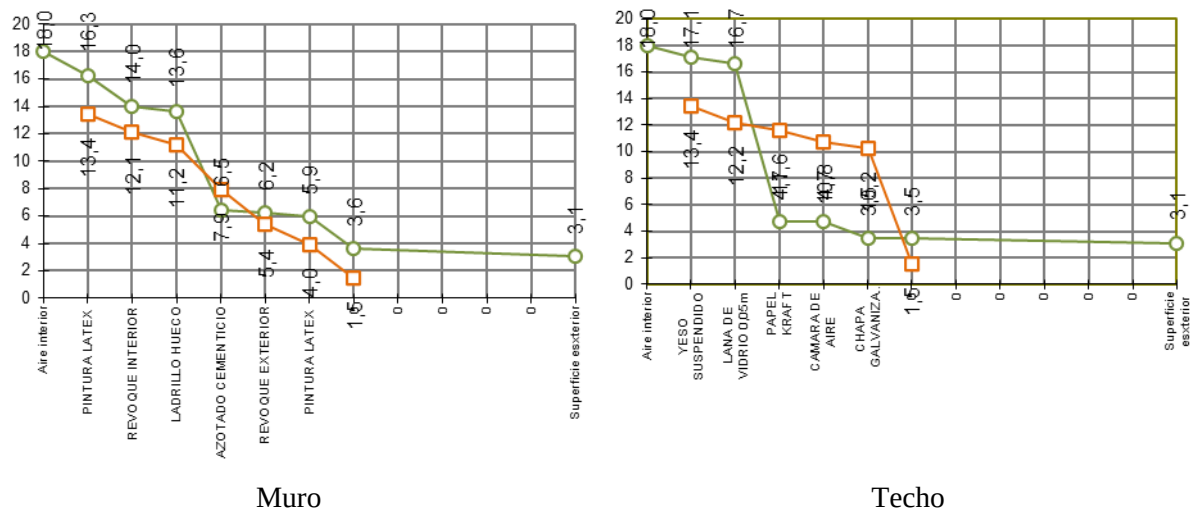


Figura 11: Verificación del riesgo de condensación de los elementos de la envolvente de las viviendas.

Se puede observar que los cerramientos presentan riesgo de condensación intersticial. Esto demuestra que la envolvente no cumple con las condiciones de habitabilidad requerida para brindar tanto condiciones de confort interior a los ocupantes, como para preservar la vivienda de patologías constructivas derivadas de la condensación (Fig.11).

Posteriormente, se realizó el análisis del balance térmico de la envolvente bajo régimen periódico (Qp) a partir del cálculo de las cargas térmicas para verano e invierno. Mediante el programa CEEHASQPER.xls (Ledesma, Nota, 2018), se establecieron los requerimientos de enfriamiento y calefacción de las viviendas en análisis, se consideraron las temperaturas exteriores promedio de los meses de verano e invierno, correspondientes a los registros del Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2000-2010) y los valores de temperatura interior establecido por IRAM 11659-1.

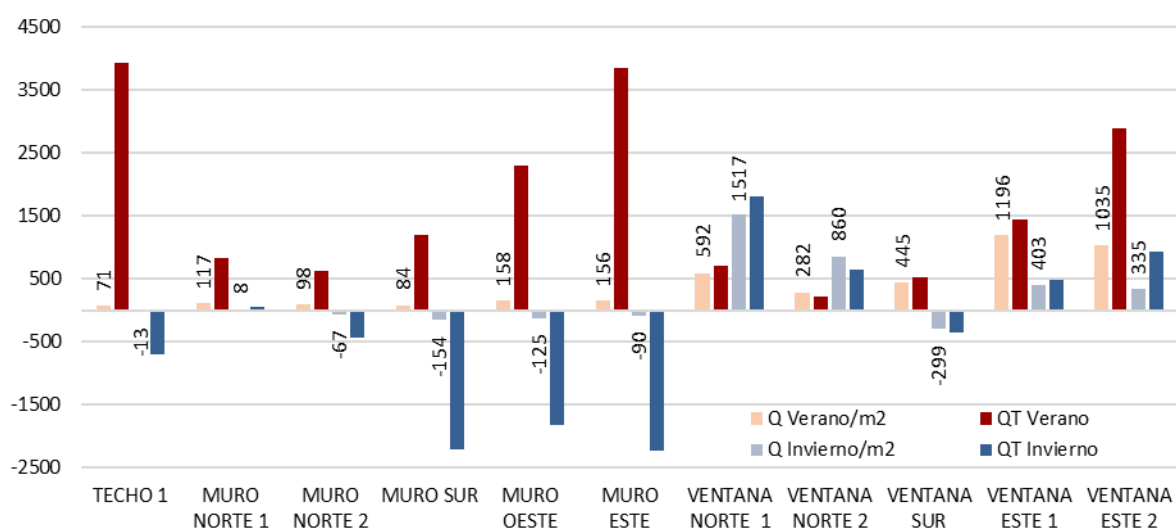


Figura 12: Análisis de la carga térmica estacional de la VOD



A partir del análisis de las cargas térmicas de la VOD, se observa, en primer orden, que el mayor intercambio de calor se presenta en el período estival, con un promedio de ganancias diarias de 18500 W diario; en invierno el intercambio es menor, con un promedio de 3720 W de pérdidas diarias.

Para verano, en el análisis de cada cerramiento, se puede observar que el techo, si bien es el elemento con menor carga térmica unitaria por su superficie, transmite la mayor cantidad de calor hacia la vivienda; también el muro orientado al este con una superficie un 50% menor, prácticamente lo iguala, debido a su baja resistencia y alta exposición solar, al igual que su ventana con la misma orientación.

En invierno, las mayores pérdidas las presentan los muros sur, este y oeste, superando notablemente al muro norte, que recibe una importante incidencia solar. En cuanto a las superficies vidriadas, las mayores ganancias le corresponden también las ventanas al norte, siendo el estar comedor el que presenta un importante aporte a la carga térmica necesaria para la época invernal (Fig.13).



Figura 13: Porcentajes de cargas térmicas de verano e invierno por cada elemento de la envolvente de la VOD en relación a los valores totales de cada período.

Al analizar la incidencia porcentual de los componentes sobre el total del intercambio térmico y su relación con la superficie de cada componente, se observa que las mayores ganancias en verano las presentan los muros (48 % del total), lo cual se debe a su superficie (52 % del total), a la baja resistencia al paso del calor y a la gran incidencia solar; se observa, además, que las ventanas con una superficie del 6 % de la envolvente, presentan el 31 % de las ganancias totales. En invierno, las mayores pérdidas también corresponden a los muros, siendo un 61 % en relación a la carga térmica total (Fig.14).

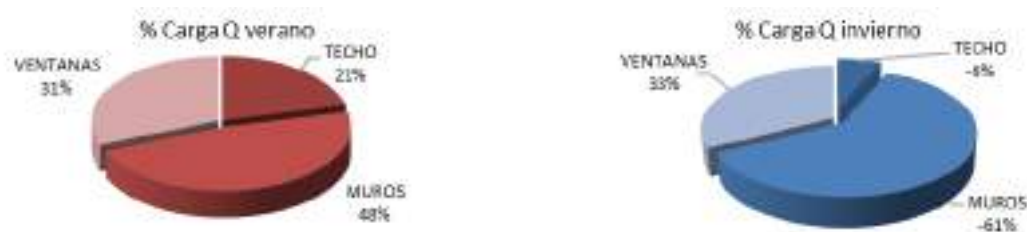


Figura 14: Porcentajes de cargas térmicas de verano e invierno de la VOD considerando cada elemento y su superficie en relación a los valores totales de cada periodo

En el análisis de la vivienda modificada, se observa que, si bien se logra una disminución del 20% en la carga estival, las pérdidas de invierno aumentan en un 60%, lo cual se debe fundamentalmente, al garaje ubicado hacia el norte, que imposibilita aprovechar los aportes térmicos sobre los muros y principalmente a través de la ventana del estar-comedor. En ambos casos resultan similares los valores absolutos de intercambio térmico (Fig.15)





Figura 15: Porcentajes de cargas térmicas de verano e invierno por cada elemento de la envolvente de la vivienda remodelada en relación a los valores totales de cada periodo.

Al analizar la incidencia porcentual de los componentes en verano, se observa que las mayores ganancias las presentan los muros (53 % del total) en relación a las ventanas que presentan el 31 % de las ganancias totales con una superficie del 6 % de la envolvente. En invierno, las mayores pérdidas también les corresponden a los muros, con un 61 % de carga total (Fig.16).



Fig.16: Porcentajes de cargas térmicas de verano e invierno de la vivienda remodelada considerando cada elemento y su superficie en relación a los valores totales de cada periodo.

En el análisis comparativo de la carga térmica estacional de las dos situaciones analizadas, se observa una disminución de la carga térmica por unidad de superficie de la envolvente (11%) y por metro cuadrado de superficie cubierta (23%) para la estación de verano de la vivienda remodelada en relación a la original. En invierno la situación se invierte, superando la vivienda remodelada en un 75 % las pérdidas por m<sup>2</sup> de la envolvente y en un 40% la carga por unidad de superficie cubierta (Fig.17).

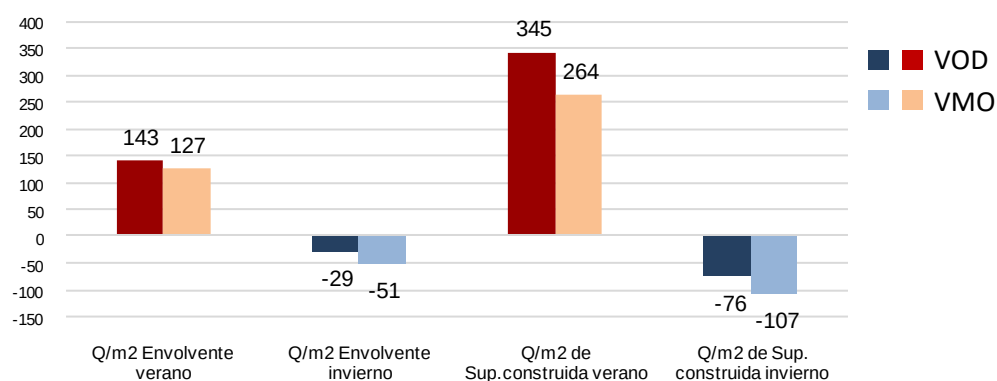


Figura 17: Valores de carga térmica totales para la VOD y VMO

### Análisis de las propuestas

Con el fin de ponderar la posibilidad de mejorar el comportamiento térmico de la vivienda original VOD, se analizaron y compararon algunas intervenciones en la envolvente de la misma, desde propuesta sencilla de uso de protección solar a cambios en la materialidad constructiva. Se plantearon las siguientes alternativas:

|                           |     |                                                                       |
|---------------------------|-----|-----------------------------------------------------------------------|
| Caso 1.- Muro original:   | 1.a | Muro original.                                                        |
| ladrillo hueco 180 mm con | 1.b | Muro original, alero de 0,80 m en muro este y cortinas de enrollar en |

|                                                                                             |     |                                                                                      |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 2 caras revocadas                                                                           | 1.c | superficies vidriadas.                                                               |
|                                                                                             |     | Muro original y ventanas con DVH.                                                    |
| Caso 2.- Muro doble: ladrillo macizo 130mm, EPS 25mm y placa yeso                           | 2.a | Muro doble.                                                                          |
|                                                                                             | 2.b | Muro doble, alero de 0,80 m en muro este y cortinas de enrollar.                     |
|                                                                                             | 2.c | Muro doble y ventanas con DVH.                                                       |
| Caso 3.- Muro con revoque termoaislante: ladrillo hueco 180 mm y revoque ext. termoaislante | 3.a | Muro con revoque termoaislante.                                                      |
|                                                                                             | 3.b | Muro con revoque termoaislante, alero de 0,80 m en muro este y cortinas de enrollar. |
|                                                                                             | 3.c | Muro con revoque termoaislante y ventanas con DVH.                                   |

Los resultados alcanzados permitieron ponderar las posibles mejoras que se alcanzarían para ambos periodos estacionales. Se observa que, la presencia de la protección solar sobre el muro este y protección solar en las ventanas (caso 1.b), provoca una disminución de la carga para enfriamiento del 25% para verano, en cambio para invierno genera un incremento de las cargas para calefacción del 15%. En caso de colocar DVH en todas las ventanas (caso 1.c), se observa, en verano, una reducción de solo el 4%, siendo mayor su influencia para la situación de invierno, con una reducción del 13% (Fig. 18).

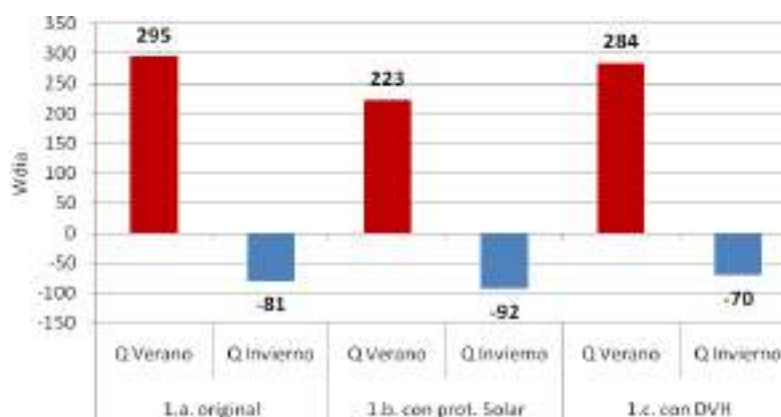


Figura 18: Cargas térmicas por  $m^2$  de superficie de la vivienda para el caso 1 con las variantes de protección solar (1.b) y DVH (1.c)

Para el caso de modificar la envolvente opaca, reemplazándola por un muro doble con aislación térmica (Caso 2.a), se logra una disminución de ganancias estivales y de pérdidas en invierno del 51%; si a ello la sumamos las protecciones en la envolvente al este (Caso 2.b), se logra una disminución del 55% en verano y, en invierno, dado que las ganancias solares se reducen por la presencia del alero, las pérdidas de calor son levemente mayores.

Para la propuesta de colocar revoque exterior termoaislante (Caso 3.a), se registran reducciones de la carga térmica del 42% para verano e invierno y en el caso de incorporar, además, protecciones solares (caso 3.b) las reducciones registradas serían del 46% y 37 % (Fig. 19).

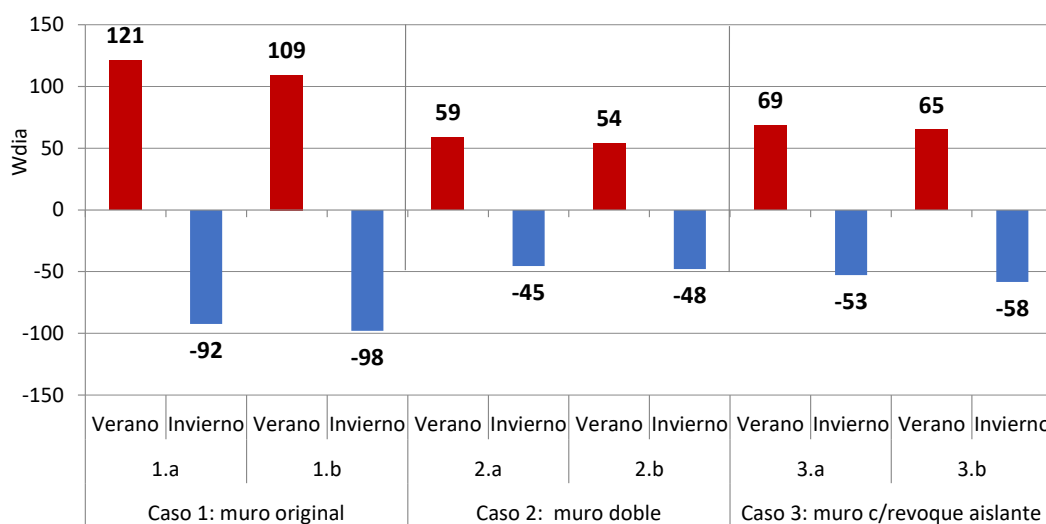


Figura 19: Cargas térmicas por m<sup>2</sup> de superficies opacas de la vivienda original y sus variantes

Se determinó, además, el Índice de Prestaciones Energéticas (IPE) de las situaciones propuestas, mediante la implementación del Aplicativo para el Etiquetado de Viviendas de la Secretaría de Energía de la Nación. Se obtuvo un IPE para la vivienda original de 280 kWh/m<sup>2</sup>año, con la incorporación de protecciones solares dicho valor se reduce a 254 y con DVH a 259 kWh/m<sup>2</sup>año, correspondiendo una disminución del 9 y 8% respectivamente.

Los planteos de muro doble y muro con revoque termoaislante, presentan un IPE de 265 y 250 kWh/m<sup>2</sup>año respectivamente, lo que corresponde a una reducción del 5% y 11%. En todos los casos corresponde una etiqueta G, ultimo valor de la categorización.

## CONCLUSIONES

Al analizar las condiciones de temperatura interior en la vivienda original desocupada (VOD), se observa que, en las viviendas de gestión estatal, no se alcanzan los parámetros de confort térmico requeridos. La envolvente edilicia no garantiza un desempeño energético eficiente, situación atribuible no solo a las características constructivas, sino también a las decisiones de diseño arquitectónico, que limitan la captación óptima de radiación solar durante el invierno y la protección solar necesaria, en la estación estival. Al comparar la VOD con la vivienda ocupada y modificada (VMO), no se evidencia una variación significativa en la temperatura interior ni en el comportamiento térmico de la envolvente, dado que las intervenciones realizadas, se orientan principalmente al mejoramiento funcional de la vivienda, llegando incluso a incidir de manera negativa en su desempeño térmico.

La evaluación de las propuestas de mejoramiento térmico planteadas para la VOD, permitió constatar la relevancia del control de la radiación incidente sobre superficies opacas y transparentes durante el período estival. Asimismo, se verificó que los beneficios más significativos de la incorporación de material aislante térmico se manifiestan en la estación invernal, reforzando la necesidad de estrategias diferenciales según el período climático.

Los prototipos analizados, se replican en numerosos barrios de la ciudad, lo que torna imprescindible replantear las estrategias de diseño y las soluciones constructivas con el propósito de alcanzar una mayor adecuación climática de las unidades habitacionales promovidas por el Estado. Ello contribuirá a optimizar su calidad ambiental y eficiencia energética, fomentando un uso más racional de los recursos y favoreciendo la mitigación del cambio climático, mediante la reducción del impacto ambiental negativo per cápita de las ciudades y la consecuente disminución de las emisiones de CO<sub>2</sub>.

## REFERENCIAS

- Bustamante W. (2009). Guía de diseño para la eficiencia energética en la vivienda social. Disponible: [https://www.researchgate.net/publication/264975670\\_Guia\\_de\\_diseno\\_para\\_la\\_eficiencia\\_energetica\\_en\\_la\\_vivienda\\_social](https://www.researchgate.net/publication/264975670_Guia_de_diseno_para_la_eficiencia_energetica_en_la_vivienda_social)
- Gonzalo, G.E. (2003). Manual de Arquitectura Bioclimática. D.F.: Universidad Nacional de Tucumán.
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación (1996) Normas IRAM 11.605: Valores máximos de transmitancia térmica para cerramiento opacos. Buenos Aires.
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación (1996) Normas IRAM 11603: Clasificación bioambiental de la República Argentina. Buenos Aires.
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2019). Normas IRAM 11900 – Prestaciones energéticas en viviendas. Método de cálculo y etiquetado.
- Kuchen, Ernesto, Kozak, Daniel. (2020). Transición energética argentina. El nuevo estándar de eficiencia energética en la evaluación de la vivienda social. Caso de estudio: vivienda de barrio papa francisco. Revista hábitat sustentable, 10(1), 44-55. Disponible en: <https://dx.doi.org/10.22320/07190700.2020.10.01.04>
- Ledesma S.L, Nota V.M. (2021) Soluciones Constructivas de Techos de Escuelas. Análisis de su desempeño térmico para el clima de San Miguel de Tucumán. Revista AVERMA Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente”. Vol. 25, pp. 121-132, ISSN 2796-8111.
- Ministerio de Economía de la Nación. Programa Nacional de Etiquetado de Viviendas (PRONEV). Aplicativo Informático Nacional. Disponible en: <https://etiquetadoviviendas.mecon.gov.ar>
- Rodríguez, C. M., Medina, J. M., & Pinzón, A. (2019). Thermal comfort and satisfaction in the context of social housing: Case study in Bogotá, Colombia. Journal of Construction in Developing Countries, 24(1), 25–45. <https://doi.org/10.21315/jcdc2019.24.1.2>
- Simões, G. M. F., Cavalcanti, J. E. W., Lamberts, R., & Ghisi, E. (2025). Thermal discomfort and adaptation strategies in Brazilian social housing. Building and Environment, 256, 113963. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.113963>
- Vázquez-Torrés, C. E., Ozawa-Meida, L., Bienvenido-Huertas, D., & Bassam, A. (2025). Advancing sustainable housing in Latin America: A critical review of energy efficiency, indoor environmental quality, and policy. Sustainability, 17(13), 6139. <https://doi.org/10.3390/su17136139>
- UNEP & GlobalABC. (2025). Global Status Report for Buildings and Construction 2024/2025. United Nations Environment Programme. <https://globalabc.org>

## EVALUATION OF THERMAL ENVIRONMENT CONDITIONS IN SOCIAL HOUSING IN TUCUMÁN

**ABSTRACT** This paper presents an assessment of the environmental conditions in social housing in a neighborhood operated by the state-owned company in the province of Tucumán. Two representative units were selected: one originally unoccupied (OVD) and one modified and occupied (VMO). Indoor and outdoor temperature variables were recorded for winter and summer conditions, the thermal behavior of the envelope was established, and energy performance indices were determined. User surveys were also conducted regarding thermal conditions and usage habits. The results allowed for an assessment of the thermal performance of the homes and the development of basic proposals for improving the envelope, aimed at optimizing habitability and reducing energy demand in social housing in a hot-humid climate.

**Keywords:** energy, habitability, thermal comfort, and social housing.

## **LINEAMIENTOS BIOAMBIENTALES PARA LA REHABILITACIÓN DE UN EDIFICIO PATRIMONIAL EN EL IMPENETRABLE. I+D POSIBLES EN UN CONTEXTO DE CRISIS DEL SISTEMA DE CIENCIA Y TÉCNICA NACIONAL**

**Ismael Eyra<sup>1,2</sup>, Gabriel Burgueño Galván<sup>2,3</sup>, María José Leveratto<sup>2</sup>, Verónica Segura<sup>4,2</sup>, Guido Guillén<sup>4,2,6</sup>, Sebastián Zanetti<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>Departamento Energía Solar. Comisión Nacional de Energía Atómica

<sup>2</sup>Centro Investigación en Hábitat y Energía – FADU UBA

<sup>3</sup>Cátedra Meta Paisaje FADU UBA

<sup>4</sup>Administración Parques Nacionales APN

<sup>5</sup>Instituto de la Espacialidad Humana UBA

<sup>6</sup>Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas CONICET

Tel: +54 11 6125 7552 ismaeleyras@cnea.gob.ar

**RESUMEN:** Este trabajo presenta avances del proyecto “Lineamientos bioambientales para la rehabilitación y apertura al uso público del casco de la estancia La Fidelidad, en el Parque Nacional El Impenetrable, provincia del Chaco” (Proyecto PDE\_6\_2024 SICYT UBA). El objetivo es desarrollar criterios de intervención arquitectónica y paisajística sustentables, compatibles con valores patrimoniales, ambientales y de uso previstos para el sitio. Se aplican herramientas de diagnóstico climático y simulaciones energéticas para evaluar el comportamiento térmico y lumínico del edificio, un relevamiento gráfico exhaustivo y una primera caracterización del entorno vegetal, orientada a su potencial bioclimático. Se propone y dimensiona un sistema autónomo de generación solar fotovoltaica ajustado a escenarios funcionales posibles. En el marco de severas restricciones presupuestarias y operativas derivadas de la crisis económica nacional y del debilitamiento del sistema de ciencia y técnica argentino, el trabajo permite construir una base técnica y conceptual sólida inicial para orientar futuras intervenciones. Los resultados obtenidos confirman la validez del enfoque adoptado y su potencial de transferencia no solo a Parques Nacionales y este caso de estudio, sino a otras edificaciones patrimoniales o vernáculas en la misma zona bioambiental del norte argentino.

**Palabras clave:** sustentabilidad ambiental, estrategias bioclimáticas, patrimonio, Chaco semiárido, arquitectura y paisaje.

### **INTRODUCCIÓN**

Este trabajo se inscribe en la continuidad de una línea de investigación proyectual orientada a la sustentabilidad ambiental en arquitectura, desarrollada por miembros del equipo desde hace más de una década. En particular, se apoya en dos antecedentes clave: el proyecto SI-PIT TRP-04 (FADU-UBA), que aborda en uno de sus capítulos el estudio de las diferentes estrategias proyectuales de sustentabilidad las distintas regiones bioclimáticas de la Argentina, y el trabajo de compilación y difusión, galardonado con la Beca Creadores del Fondo Nacional de las Artes 2021: “Arquitectura y Ambiente – Sustentables de La Quiaca a Ushuaia”, que permitió sistematizar principios de diseño y estrategias proyectuales clasificadas y adecuadas a distintas zonas bioambientales del país.

En ese marco, el Proyecto PDE\_6\_2024 propone una profundización y acercamiento de estos enfoques en un caso de estudio concreto: el casco de la estancia La Fidelidad, en el Parque Nacional El Impenetrable (Pcia. de Chaco). El casco constituye uno de los valores focales de conservación del Área protegida y se encuentra a orillas del antiguo cauce del río Bermejo, apartado de rutas transitadas o



asfaltos, en una región de alto valor ecológico y cultural (Leveratto et al 2015). Se trata de un edificio patrimonial vinculado a la historia productiva y social del Gran Chaco, actualmente en estado de abandono y sin servicios básicos de infraestructura sanitaria ni energética. El sitio presenta condiciones ambientales extremas: marcada continentalidad térmica, sequías prolongadas y nula cobertura de servicios, lo que plantea desafíos singulares para su rehabilitación y adaptación para posteriores usos públicos.

La edificación aún conserva una morfología y materiales representativos de la arquitectura rural chaqueña, pero acusa un importante deterioro progresivo. Su recuperación, en el marco de un área protegida nacional, exige la compatibilización de criterios de conservación patrimonial con estrategias de sustentabilidad ambiental, minimizando el impacto sobre un entorno natural de elevada fragilidad.

El Parque Nacional El Impenetrable, creado en 2014, es parte de la ecorregión del Chaco Seco y alberga una notable biodiversidad. La estancia La Fidelidad, uno de sus pocos asentamientos con valor histórico-arquitectónico, constituye un potencial nodo para el uso público y la interpretación del paisaje chaqueño. Sin embargo, la mencionada localización remota y el contexto socioeconómico nacional dificultan la asignación de recursos y la implementación de obras de rehabilitación.

La iniciativa plantea investigar y aplicar estrategias proyectuales de sustentabilidad ambiental para su rehabilitación, como se estudió en otras infraestructuras operativas (Guillen, de Schiller, 2022), combinando criterios de eficiencia energética, energías renovables, acondicionamiento pasivo de espacios interiores y exteriores, apropiación del entorno natural, preservación patrimonial y uso público en un territorio de alto valor ecológico y cultural.

Durante el primer año se desarrollaron tareas de revisión de antecedentes y bibliografía existentes, se realizó un diagnóstico climático, simulaciones energéticas, análisis del relevamiento gráfico, la evaluación de vegetación con fines bioclimáticos y un dimensionamiento preliminar de un sistema fotovoltaico autónomo. Todo ello en un contexto institucional complejo, caracterizado por la discontinuidad política en Parques Nacionales, la pérdida de valor de los fondos asignados debido a un contexto de fuerte inflación económica y las restricciones operativas propias de un sistema científico nacional en retracción. A pesar de estas dificultades, se construyó una base técnica sólida para orientar futuras intervenciones sobre el edificio y su entorno.

## **CASO DE ESTUDIO**

La estancia La Fidelidad, funcionó como desde principio del siglo XX dedicada principalmente a la ganadería extensiva del bosque chaqueño y cuenta con un valioso patrimonio arquitectónico y cultural, fue incorporada al Parque Nacional El Impenetrable en 2014 tras un proceso de expropiación. Según lo expuesto en el Plan de Gestión del Parque Nacional el Impenetrable (APN, 2025), el casco de la estancia la fidelidad se encuentra entre los 7 Valores de Conservación focales identificados para la gestión del PN El Impenetrable para el periodo de planificación considerado.

La importancia que tiene este conjunto, está puesta en su valor histórico derivado de su asociación con un momento de la historia local pero también Nacional, evidencia la diversidad y variabilidad de las actividades y relaciones de individuos y/o sociedades y sus interrelaciones con el medio natural (APN, 2001). A su vez, se le asigna un valor social y simbólico puesto que constituye un referente de identidad a través del que se reconoce parte de la comunidad vecina.

Se reconoce el valor del conjunto edilicio histórico, fundado en su carácter constructivo por lo que se encuentra entre los registros de Recursos Culturales del área Protegida, compuesto por las siguientes unidades y números de identificación de registro: Casa Principal, Galpón, Carnicería o Matadero, Almacén y el Aserradero, que contiene una gran cantidad de maquinaria agrícola.

Por otra parte, se encuentran relevados los siguientes elementos que completan el conjunto patrimonial: Molino cubierto casi por completo de vegetación, el Cementerio, Motor estacionario y el Antiguo Puesto Pancho Montes 16, un antiguo puesto ganadero que funcionó como vivienda en el contexto de funcionamiento de la estancia. (APN, 2025)



El casco se compone de un edificio principal, compuesto por 9 habitaciones, que tenía las funciones de vivienda unifamiliar. Las demás actividades se desarrollaban en los edificios cercanos, actualmente en muy mal estado de conservación. El conjunto se completa con un antiguo pozo de agua y una antena al Oeste, y al frente del edificio principal se ubica un tractor de vapor y maquinaria utilizada tiempo atrás para el traslado de la madera extraída. Al SO del edificio principal se encuentra el antiguo cauce del río Bermejo actualmente seco y forma parte del paleocauce circundante atravesado por un camino de acceso al Casco. (APN, 2025)



*Figura 1: Conjunto histórico Estancia La Fidelidad, (SIB, APN)*

La documentación gráfica de relevamiento arquitectónico (APN, 2025) analizada, detalla el estado de conservación de los elementos que componen el sistema, así como un registro fotográfico y un relevamiento de identificación de lesiones patológicas existentes en la edificación También expone un registro de elementos artísticos o susceptibles de ser conservados.

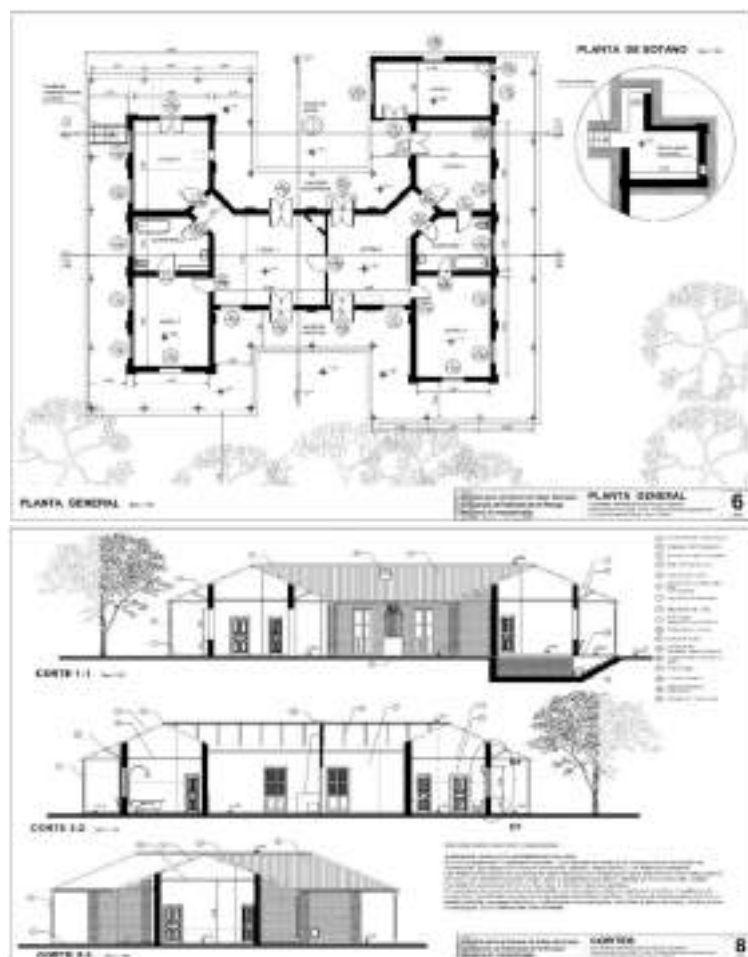


Figura 2: Relevamiento arquitectónico, (APN,2025)

Este documento, además de evidenciar el estado actual del conjunto, realiza una propuesta que aborda únicamente un reordenamiento funcional acompañado por un listado de tareas preliminares para abordar las patologías presentes en el edificio llevándolo a su estado original y agregando una serie de sanitarios.



Figura 3: Foto de archivo, Estancia La Fidelidad.

El casco de la Estancia La Fidelidad, en el Parque Nacional el Impenetrable, se ubica a 25°00 ' 34" latitud Sur. El clima es subtropical continental con marcada estacionalidad pluviométrica y amplitud térmica anual. Se caracteriza por sus altas temperaturas durante la primavera y el verano, con valores medios máximos de entre 33 °C y 35 °C. Entre mayo y septiembre las condiciones suelen ser agradables, con máximas que no superan los 27 °C y noches frescas entre 10 °C y 15 °C de temperatura. Durante los meses de invierno, las temperaturas durante el día suelen ser confortables con valores por encima de los 20 °C descendiendo hacia la noche a aproximadamente 10 a 12 °C. Otro factor climático

característico de esta región es la sequía prolongada entre los meses de abril a noviembre. Las lluvias se producen casi exclusivamente durante el verano, en algunos casos con tormentas eléctricas intensas. Si bien es notable la variabilidad de las precipitaciones de un año a otro, con años más húmedos y otros de sequías prolongadas, los promedios anuales de lluvias varían de 400 mm a 600 mm. Los vientos predominantes soplan desde los cuadrantes Norte, Noreste, combinando altas velocidades y altas temperaturas que se manifiestan como vientos secos con polvo y tierra. Durante los meses más fríos, soplan con mayor frecuencia los vientos del cuadrante sur, con velocidades que no superan los 50 km/h (14 m/seg).

## METODOLOGÍA

La metodología desarrollada consistió en determinar las estrategias bioclimáticas más aptas, simular las condiciones térmicas y lumínicas del edificio, y se clasificaron especies vegetales en relación a su capacidad de moderación climática y se realizó una primera propuesta de generación energética fotovoltaica autónoma.

Según la clasificación del Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM 11603), el edificio se encuentra dentro de la Zona Bioambiental IIb – Cálida Seca. La estación meteorológica más próxima es la de Las Lomitas a 24°42' latitud Sur en la Provincia de Formosa. Utilizando datos de esta localidad se analizaron con el programa Climate Consultant las condiciones de temperatura, humedad relativa, precipitaciones, vientos y radiación solar esperables en el casco de la estancia La Fidelidad para obtener información sobre estrategias de diseño bioclimático más eficaces, según se muestra en la figura 4, a continuación.

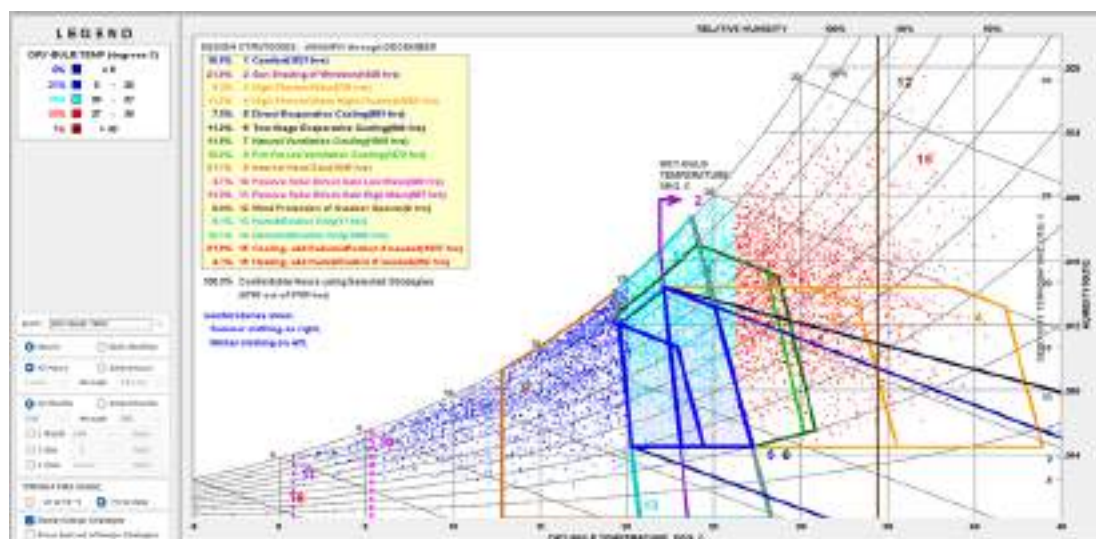


Figura 4: Resultados diagnóstico con Climate Consultant

El análisis del desempeño térmico y lumínico se desarrolló a partir de la construcción de un modelo tridimensional de la Estancia. Se evaluaron tres condicionantes: la iluminación natural, la radiación solar y el comportamiento térmico en distintas estaciones del año.

Para el comportamiento térmico, se utilizó como motor de cálculo el software Energy Plus, desarrollado por el Departamento de Energía de EEUU (DOE, 2020). Se registraron las temperaturas medias interiores durante el invierno y el verano, y se determinó el porcentaje de tiempo que la vivienda se mantiene dentro de los rangos de confort adaptativo establecidos para climas cálidos. Se utilizaron además los valores de transmitancia térmica de cada componente de la envolvente para evaluar su grado de aislamiento en relación con los niveles recomendados por la norma IRAM 11605 para la zona bioclimática II (Ver Tabla 1)

| Elemento         | Capas y espesores (resumen constructivo)                       | Transmitancia k<br>(W/m <sup>2</sup> ·K) |
|------------------|----------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| Muros exteriores | Ladrillo macizo 300 mm                                         | 1,82                                     |
| Techo            | Chapa de acero galvanizado + cámara de aire + machimbre ≈15 mm | 3,90                                     |
| Aberturas        | Vidrio simple 3 mm + marco de madera maciza                    | 5,30                                     |

Tabla 1: Transmitancia térmica de los componentes de la envolvente. Fuente: producción propia

Como en el análisis climático previo, se empleó el archivo climático de Las Lomitas – TMY 2009–2023. Se reportaron temperaturas interiores horarias y métricas derivadas durante dos periodos: verano (21/12–21/3) e invierno (21/6–21/9). El modelo se geometriza en 8 zonas térmicas (ver Figura 5), agrupando recintos por contigüidad y uso.

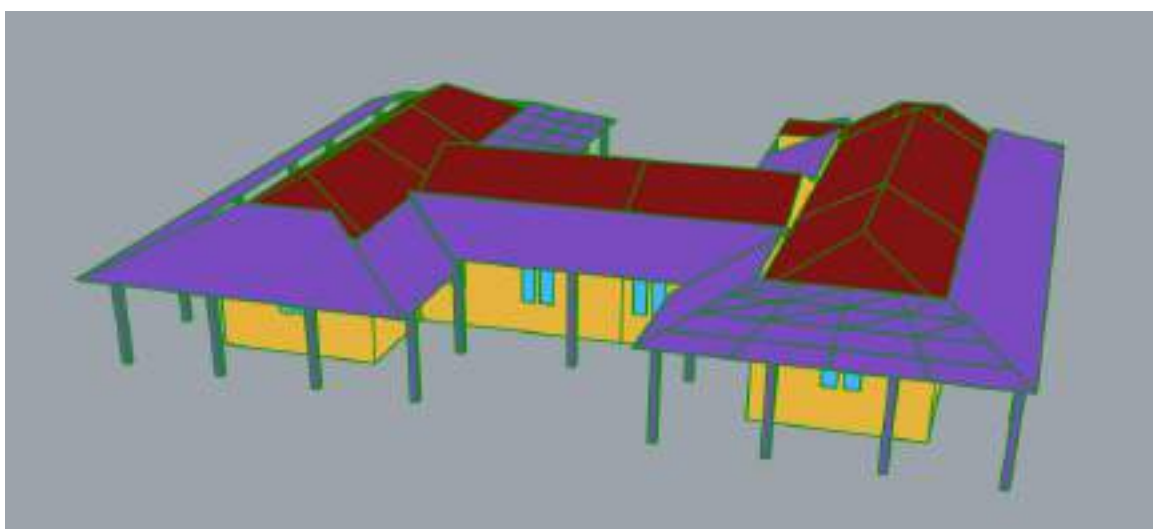


Figura 5. Modelo térmico. Producción propia.

Con respecto a los perfiles de uso y cargas internas, la ocupación se fijó en 0,028 personas/m<sup>2</sup>, con indumentaria de 0,5 clo en verano y 1,0 clo en invierno. Las cargas internas consideradas fueron iluminación: 9,4 W/m<sup>2</sup> y equipos eléctricos: 6,7 W/m<sup>2</sup>, con los mismos horarios de ocupación.

Respecto al intercambio de aire, la infiltración se modeló como caudal por superficie de envolvente de 0,0006 m<sup>3</sup>/s·m<sup>2</sup> (≈ 0,6 L/s·m<sup>2</sup>), representativa de envolvente con permeabilidad elevada propia de vivienda antigua, aplicada de forma continua. Adicionalmente, se definió una ventilación mínima de 0,5 renovaciones/hora (ACH) ligada a los horarios de ocupación. Se ensayó, además, un control de ventilación natural por apertura de ventanas con activación cuando la temperatura interior se encuentra entre 18 °C y 28 °C.

En el caso de la iluminación, se utilizó como motor de cálculo el software Radiance (Ward, 1994), desarrollado por el LBNL (Lawrence Berkeley National Lab). Se evaluó la autonomía de luz natural útil (UDI) en los espacios interiores, definiendo un rango mínimo de 200 lux y un máximo de 3000 lux como valores de referencia para un desempeño adecuado.

La radiación solar se estudió en forma anual, cuantificando la energía incidente acumulada sobre la envolvente en sus cuatro orientaciones principales —noroeste, noreste, suroeste y sureste—, así como en las cubiertas inclinadas.

## RESULTADOS

### *Estrategias bioclimáticas*

A partir del análisis con Climate Consultant, puede observarse que el edificio registra condiciones confortables solamente un 18,5% de las horas totales. En ese marco las estrategias de diseño recomendadas son prioritariamente la protección solar (en particular frente a aberturas), el aislamiento térmico en combinación con el uso de masa térmica para la regulación de valores extremos de temperatura, la ventilación nocturna o selectiva y el refrescamiento evaporativo.

### *Iluminación natural*

Los resultados indican que la Estancia presenta niveles insuficientes de iluminación natural. La presencia de aleros pronunciados, diseñados para mitigar la radiación solar directa, reduce de forma considerable la entrada de luz. En consecuencia, el 80 % del tiempo en que el espacio se encuentra en uso es necesario recurrir a iluminación artificial para cumplir con el mínimo de 200 lux. Este déficit se acentúa en las zonas más profundas del interior, donde la luz difusa que ingresa no compensa la falta de radiación directa.

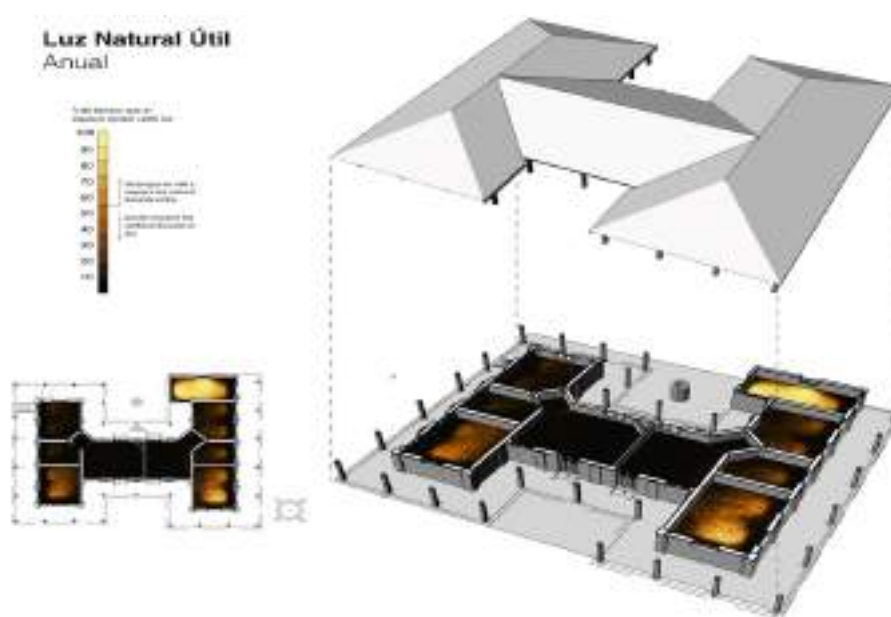


Figura 6: Luz natural útil anual  
(producción propia)

### *Radiación solar anual y comportamiento térmico*

El análisis de la radiación solar acumulada a lo largo del año revela que las cubiertas inclinadas, particularmente las orientadas al norte y oeste, superan los 1300 kWh/m<sup>2</sup>/año, lo que implica una alta exposición. En contraste, las fachadas muestran una distribución menos uniforme: noreste y sureste reciben menor radiación directa, mientras que noroeste y suroeste concentran una mayor carga térmica en los meses y horas de mayor temperatura.

Los aleros cumplen un papel de sombreado eficaz en ventanas altas, especialmente en las fachadas noreste y sureste, donde generan sombras consistentes durante buena parte del año. Sin embargo, esta protección no compensa completamente la ganancia térmica acumulada en cubiertas y muros con alta exposición.

En la temporada invernal, la temperatura media interior registrada es de 20,9 °C, un valor que se ubica dentro del rango de confort para actividades sedentarias. La orientación norte de los aventanamientos principales favorece la captación de radiación solar, y la morfología en H de la planta contribuye a una distribución homogénea del calor. Los aleros, aunque diseñados para el verano, permiten en esta estación



la entrada del sol bajo, favoreciendo las ganancias pasivas. No obstante, se detectan franjas horarias y ciertos espacios que permanecen por debajo de los valores de confort, principalmente en orientaciones menos expuestas o zonas con filtraciones de aire.

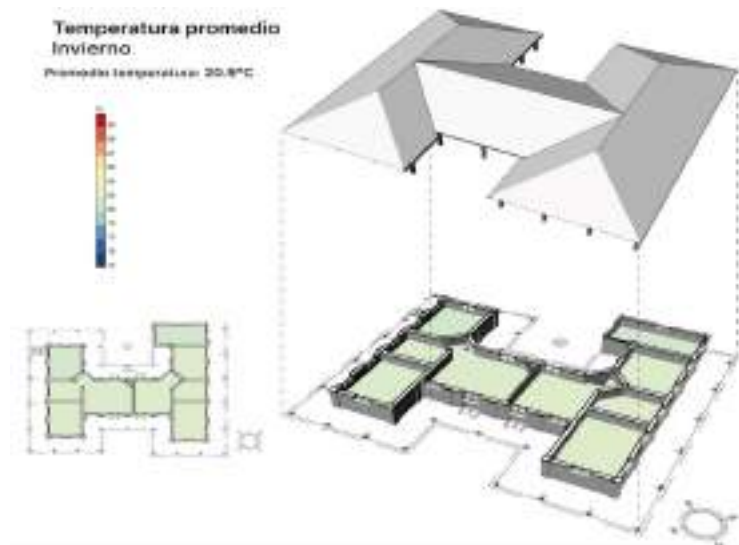


*Figura 7: Temperatura promedio invierno  
(producción propia)*

Durante el verano, la temperatura media interior asciende a 29 °C, lo que supera ampliamente el límite superior de confort adaptativo (27 °C). La mayor parte de los espacios se encuentran en rangos de 28 a 30 °C, señalando que las estrategias pasivas actuales no logran controlar la acumulación de calor. La ventilación cruzada no es continua ni está garantizada en todos los recintos, y no se implementan mecanismos de enfriamiento nocturno. Los aleros reducen la radiación directa en horas críticas, pero no evitan que la masa térmica y la baja aislación de techos y muros contribuyan al sobrecalentamiento.

### **Confort y Envolverte**

El balance anual muestra que solo un 24 % del tiempo la vivienda se mantiene en el rango de confort, frente a un 44 % por encima y un 31 % por debajo. Este comportamiento evidencia un mejor desempeño relativo en invierno que en verano, aunque la falta de aislamiento suficiente afecta negativamente en ambas estaciones.

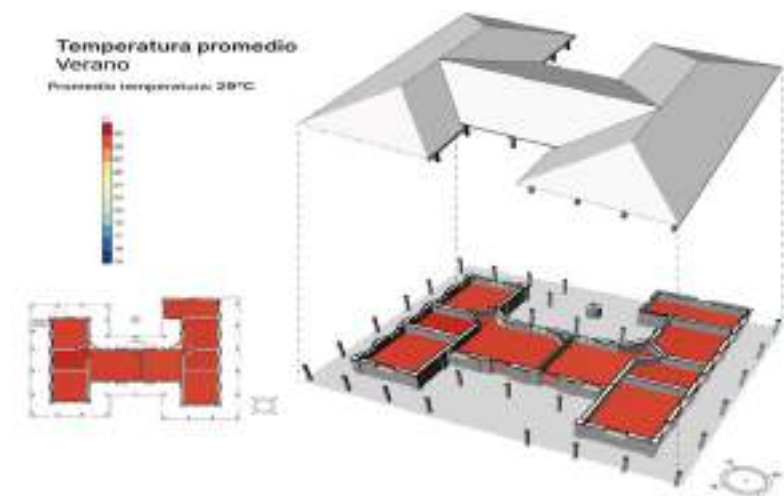


*Figura 8: Temperatura promedio verano (producción propia)*

Por último, se realizó un cuadro resumen con las temperaturas promedio en invierno y en verano (Ver Figura 7). La región presenta un marcado efecto de continentalidad, con grandes diferencias de temperaturas diarias y estacionales entre el verano y el invierno, dando como resultado una acentuada amplitud térmica. Los valores extremos pueden superar los 40 °C en verano. En el invierno, la irrupción de aire frío puede provocar temperaturas nocturnas ligeramente por debajo de 0 °C. Esta condición de continentalidad da como resultado que durante todo el año se registren valores de temperatura dentro de la zona de confort en algún momento del día. En los meses cálidos, estas condiciones se registran en horario nocturno y en el periodo frío durante el día.

La Figura 9 compara los promedios horarios de temperatura exterior e interior para verano (21/12–21/3) e invierno (21/6–21/9).

En verano, la temperatura exterior varía entre 23,1 y 31,6 °C. La interior se ubica entre 26,1 y 32,5 °C y permanece por encima de la exterior durante todo el día: de madrugada la diferencia es de 2 a 3 °C y a la tarde ronda 1 °C. Con una franja de confort estival de 23–26 °C, el interior no ingresa al rango en ninguna hora promedio, lo que indica sobrecalentamiento sostenido por ganancias internas e inercia.

En invierno, la temperatura exterior va de 14,2 a 25,2 °C. La interior se mantiene entre 18,8 y 23,4 °C y reduce la amplitud diaria de 11,0 a 4,6 °C, una disminución cercana al 60%. Eleva los mínimos nocturnos entre 3 y 5 °C respecto del exterior y recorta los máximos de la tarde en 1 a 2 °C. Con la franja de confort invernal de 20–24 °C, el interior permanece mayormente dentro del rango entre las 10 y las 23 h, mientras que el exterior solo lo alcanza alrededor del mediodía. Esto tiene como implicancia que la envolvente modera el invierno y favorece la permanencia en confort diurno. En verano, el edificio opera por encima del confort prácticamente todo el día; para mitigarlo se requiere una ventilación cruzada y nocturna efectiva.

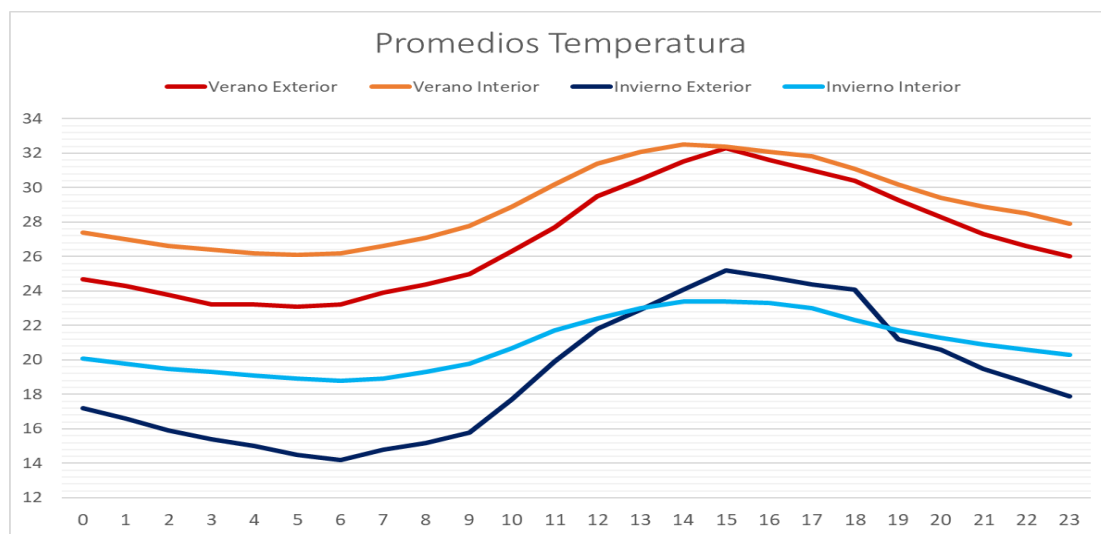


Figura 9. Promedios horarios de temperatura exterior e interior para verano e invierno. Curvas obtenidas como promedio por hora de todos los días de cada estación. (producción propia)

### Informe de vegetación y rol bioclimático

Se prioriza conservar árboles de gran porte y valor patrimonial, implantar barreras verdes contra vientos dominantes, e incorporar trepadoras y especies ribereñas para sombreado, control térmico y fijación de suelos (Burgueño y Nardini, 2019). A partir de estos parámetros se elaboró una selección de especies a conservar, cultivar o implantar, de la cual se presentan aquí sólo algunos ejemplos.

**Sombra estival y control de radiación solar directa:** Árboles de gran porte como *Aspidosperma quebracho-blanco*, *Schinopsis lorentzii* y *Neltuma alba/nigra* proyectan sombra densa en fachadas, cubiertas y espacios exteriores, reduciendo la ganancia térmica. (Demaio et al. 2021)

**Reducción de temperatura superficial:** Las copas arbóreas y arbustivas disminuyen la temperatura del suelo circundante y del aire adyacente, generando microclimas más frescos. La evapotranspiración de especies como *Albizia inundata* y *Parkinsonia praecox* contribuye al enfriamiento pasivo.



*Control de vientos y polvo:* Cercos vivos y alineaciones de especies persistentes (*Schinus fasciculatus*, Moradillo) funcionan como barreras rompevientos y retentores de partículas, protegiendo edificaciones y personas.

*Fijación de suelos y control de erosión:* Especies pioneras en riberas (*Tessaria integrifolia*, *Salix humboldtiana*, *Ludwigia peploides*) previenen la pérdida de suelos durante lluvias intensas. Arbustos y cubresuelos (*Commelina erecta*, *Pluchea sagittalis*) mejoran la cobertura y disminuyen el escurrimiento superficial.

*Valor patrimonial y biodiversidad:* Muchas especies listadas poseen usos culturales, medicinales y madereros tradicionales (ej. *Gonopterodendron sarmientoi*, *Geoffroea decorticans*), aportando identidad al sitio (Haene, 2018). Trepadoras como *Cissus striata* y *Mikania* sp. generan fachadas verdes que aumentan el aislamiento térmico y fomentan la presencia de polinizadores.

#### *Lineamientos generales para manejo y plantación*

- Conservar individuos de gran porte y especies de alto valor patrimonial (quebrachos, algarrobos, palo santo).
- Cultivar o reimplantar especies caducas para sombreado estacional y regulación térmica de patios y fachadas norte/oeste.
- Implantar barreras verdes mixtas en bordes de vientos dominantes (SE y NO) para control de polvo y viento seco.
- Incorporar vegetación trepadora en galerías y pérgolas para enfriamiento evaporativo y sombreado filtrado.
- Proteger vegetación y humedales asociados, si se encontraran, ya que son claves para la regulación hídrica.

#### ***Propuesta preliminar de generación fotovoltaica autónoma***

Se propuso un sistema autónomo de generación solar fotovoltaica para abastecer energéticamente el casco patrimonial de la estancia, que actualmente no cuenta con acceso a la red eléctrica ni con grupo electrógeno. La solución fue dimensionada para una demanda base estimada de **7 kWh/día**, con una autonomía de **4 días**, en un contexto climático con buena radiación solar promedio (aproximadamente **5 kWh/m<sup>2</sup>/día**).

La radiación solar promedio diaria considerada para el dimensionamiento (5 kWh/m<sup>2</sup>/día) fue tomada de bases climáticas regionales (estación meteorológica de Las Lomitas, Formosa, SMN), evaluadas con el software Climate Consultant 6.0. Para maximizar la captación anual, se adoptó un ángulo de inclinación de los paneles equivalente a la latitud del sitio (25°) con leve ajuste estacional previsto en el diseño estructural.

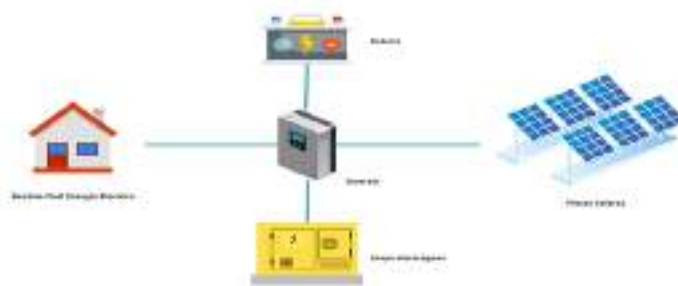


*Figura 10: Esquema de Instalación fotovoltaica Híbrida (producción propia)*

*Justificación técnica:* El sistema fue diseñado en función de una estimación detallada de consumos energéticos (electrodomésticos de clase A), sumando **6,4 kWh/día** y una carga diaria de **133 Ah**, lo que respalda su adecuación al perfil funcional de una vivienda de uso intermitente pero permanente. Se destaca la elección de componentes de calidad, escalables, con mínimo mantenimiento y adecuados para

un entorno aislado y de difícil acceso. Al momento de realizar este dimensionado no contamos con información fehaciente de Parques Nacionales acerca de los posibles usos que se le asignaría al establecimiento: Centro de Visitantes Interpretativo con servicios de atención al visitante con un alojamiento permanente para personal de apoyo es el uso que se discute actualmente.

*Consideraciones adicionales:* El sistema prevé la posible alimentación desde un grupo electrógeno, y también desde otra batería incluso de un vehículo en marcha. Ofrece una solución de muy bajo impacto ambiental, en línea con la conservación del entorno protegido del Parque Nacional. El sistema es modular y expansible, previendo ampliaciones en función del uso futuro del sitio (vivienda permanente, alojamiento turístico, centro de interpretación, etc.).

**Costo total estimado del sistema (agosto 2025): USD 12.696,39 (IVA incluido).**



*Figura 11: Consumos estimados por equipo en relación a la generación/acumulación del equipo (elaboración propia)*

El gráfico de consumo estimado evidencia una fuerte concentración de la demanda energética diaria en tres equipos: heladera (756 Wh/día), lavarropas (667 Wh/día) y freezer (400 Wh/día), que en conjunto representan más del 60 % de la energía diaria requerida. Este patrón justifica la necesidad de un banco de baterías robusto, dimensionado para cubrir no sólo la autonomía de cuatro días sin insolación suficiente sino también los ciclos profundos de descarga vinculados a estas cargas críticas de refrigeración y lavado. Se recomienda realizar los lavados- en el caso de que el destino del establecimiento sea finalmente vivienda, durante las horas de mayor insolación.

## CONCLUSIONES

La documentación aportada por Parques es un relevamiento de existencias que no aborda cuestiones de sustentabilidad ambiental. Tampoco describe ni los sistemas de provisión de agua o de tratamiento de efluentes, ni se prevén futuros usos.

Respecto al desempeño térmico, la simulación de uso de estrategias pasivas aplicadas en el edificio actual resulta moderadamente efectiva en invierno, pero claramente insuficiente en verano. La elevada transmitancia térmica de la envolvente, junto con la limitada ventilación natural, reduce las horas de confort anual y obligaría al uso de sistemas activos para mantener la habitabilidad. Para evitarlo se propondrán intervenciones que incluyan un refuerzo del aislamiento en techos y carpinterías, mejoras en la ventilación selectiva y protecciones solares específicas por orientación con el objetivo de optimizar el desempeño térmico y reducir la dependencia de climatización artificial.

A pesar de las dilaciones que generó un cambio de gestión política en la Administración de Parques Nacionales y la severa restricción presupuestaria que afecta también a la Universidad de Buenos Aires, hemos logrado consolidar en este primer año una base técnica y conceptual sólida para la rehabilitación del casco patrimonial de la Estancia La Fidelidad. El trabajo interdisciplinario permitió integrar criterios de sustentabilidad ambiental, conservación patrimonial y energías renovables en un contexto de alta complejidad logística y ambiental.

Los objetivos para el próximo año incluyen: completar el relevamiento de situación in situ, definición de futuros usos, optimizar el diseño de estrategias pasivas adaptadas a las condiciones climáticas extremas del Chaco Seco, avanzar en el proyecto ejecutivo del sistema fotovoltaico autónomo y elaborar un plan de manejo de vegetación que potencie el acondicionamiento bioclimático del conjunto.

## REFERENCIAS

- Administración de Parques Nacionales. Sistema de Información de Biodiversidad. sib.gob.ar (2025). Plan de Gestion del Parque Nacional El Impenetrable. RESFC-2025-210-D#APNAC
- Burgueño, G., Nardini C. 2019. Plantas nativas rioplatenses para el diseño de espacios verdes. Introducción al Paisaje Natural. Parte II. Orientación Gráfica Editora. Buenos Aires.
- Burgueño, G., Rodríguez. G. O. 2022. Plantas invasoras del cono sur. Reconocimiento de especies principales e impacto en el ambiente y la cultura sudamericana. Orientación Gráfica Editora. Buenos Aires.
- Demaio, P., Ola Karlin U., Medina M. (2021). Árboles nativos de la Argentina. Tomo III: Noroeste. Ecoval ediciones. Córdoba.
- Guillen Gutierrez, G.; De Schiller, S. (2022) La noción de confort interior en el hábitat construido: estrategias bioclimáticas de una vivienda seccional de clima frío.
- Haene, E. (2018). Inventario florístico del Parque Nacional El Impenetrable, Chaco, Argentina. Relevamiento fotográfico de marzo de 2013. Buenos Aires,
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM). (1996). IRAM 11605: Acondicionamiento térmico de edificios - Condiciones de habitabilidad en edificios - Valores máximos de transmitancia térmica en cerramientos opacos. IRAM.
- Leveratto, Maria Jose, J. Braña, V. Schechtel y J. Trillo. (2016) Hacia Soluciones Habitacionales en el Gran Chaco. Publicación de Hábitat para la Humanidad Argentina. [https://issuu.com/hphargentina/docs/diagnostico\\_gran\\_chaco\\_hpha2015](https://issuu.com/hphargentina/docs/diagnostico_gran_chaco_hpha2015)

## BIOENVIRONMENTAL GUIDELINES FOR THE RESTORATION OF A HERITAGE BUILDING IN THE IMPENETRABLE. -POSSIBLE R&D IN A CONTEXT OF CRISIS IN THE NATIONAL SCIENCE AND TECHNOLOGY SYSTEM

**ABSTRACT:** This paper presents progress on the project “Bio-environmental guidelines for the rehabilitation and opening to public use of the La Fidelidad ranch in El Impenetrable National Park, Chaco Province” (Project PDE\_6\_2024 SICYT UBA). The objective is to develop sustainable architectural and landscape intervention criteria that are compatible with the heritage, environmental, and intended use values of the site. Climate diagnostic tools and energy simulations are applied to evaluate the thermal and lighting performance of the building, along with an exhaustive graphic survey and an initial characterization of the vegetation, focused on its bioclimatic potential. An autonomous solar photovoltaic generation system is proposed and dimensioned to fit possible functional scenarios. Within the framework of severe budgetary and operational restrictions resulting from the national economic crisis and the weakening of the Argentine science and technology system, the work allows for the construction of a solid initial technical and conceptual basis to guide future interventions. The results obtained confirm the validity of the approach adopted and its potential for transfer not only to National Parks and this case study, but also to other heritage or vernacular buildings in the same bio-environmental zone in northern Argentina.

**Keywords:** environmental sustainability, bioclimatic strategies, heritage, semi- arid Chaco, architecture and landscape.

## HERRAMIENTA DE RELEVAMIENTO PARA LA ELABORACIÓN DE UN DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO EN ÁREAS DE INTERNACIÓN

**Santiago T. Fondoso Ossola, Pedro J. Chévez, Dante A. Barbero, Irene Martini**

Instituto de Investigaciones y Políticas del Ambiente Construido (IIPAC) Consejo Nacional de  
Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) - Universidad Nacional de La Plata (UNLP)

Facultad de Arquitectura y Urbanismo. Calle 47 N°162, La Plata, CP 1900, Buenos Aires.

Web: <https://iipac.unlp.edu.ar/> Tel.: (54) (221) 4236587/90, interno 207 e-mail: [iipac@fau.unlp.edu.ar](mailto:iipac@fau.unlp.edu.ar)

**RESUMEN:** Las áreas de Internación resultan espacios potenciales para la rehabilitación energética, lo cual se explica por su demanda en climatización y por su cantidad de superficie construida. Si bien existen estudios que analizan los hospitales, no se ha profundizado en áreas de Internación a nivel red, donde sus servicios pueden resultar contrastantes en cuanto al consumo energético. Este trabajo tiene por objetivo desarrollar una herramienta para relevar los parámetros que influyen en el comportamiento energético de servicios en áreas de Internación. Mediante su aplicación en una red de establecimientos, se obtendría un diagnóstico para verificar diferencias de consumo, tanto por sus requerimientos higrotérmicos y asépticos, como por el uso real en distintos hospitales. Para ello, se elabora un formulario estructurado en seis puntos (Presentación del formulario, Datos del auditor y de la institución, Servicio de Internación, Climatización, Equipamiento e Iluminación, y Agua caliente sanitaria). Como resultado se obtuvo una herramienta que consiste en un formulario de acceso *online*, el cual permite centralizar y administrar respuestas, además de facilitar una auditoría desde escritorio o en recorrido. Asimismo, se considera que, al constar de treinta y tres preguntas, puede completarse en una jornada de trabajo, lo cual resulta positivo para el usuario.

**Palabras clave:** auditoría energética, áreas hospitalarias, hospitales, sector salud

### INTRODUCCIÓN

Los hospitales se conforman por áreas hospitalarias, las cuales se distinguen —en una primera instancia— por su funcionamiento y actividad principal. Esto significa que las mismas difieren en el tiempo de uso, intensidad de equipos, niveles de luminosidad y climatización (calidad del aire y rangos higrotérmicos aceptables). Las áreas hospitalarias mantienen, entonces, un comportamiento energético-ambiental característico, en el sentido de que su consumo se relaciona directamente con los requerimientos mínimos necesarios para efectuar su funcionamiento, y con la eficiencia de los sistemas que utilizan para transformar energía neta en utilizable. En este sentido, las áreas de Internación resultan sectores potenciales para la rehabilitación energética, debido al elevado requerimiento que mantienen en climatización. En los hospitales, estos espacios poseen la mayor cantidad de superficie en contacto con el exterior (Cesari et al., 2018), con lo cual se tienen mayores flujos de calor a través de muros y ventanas en comparación con otras áreas. En el estudio de Fondoso Ossola (2025) se identificó que las áreas de Internación —junto con las áreas de Servicios Auxiliares y de Apoyo— resultan ser las de mayor consumo energético neto anual para una red de hospitales, tanto por la cantidad de superficie construida (habitable) como por las deficiencias técnico-constructivas identificadas. En dicho trabajo se propusieron medidas de mejoramiento, como el reciclado en la envolvente edilicia, el recambio del equipamiento termo-mecánico y la instalación de sistemas para el aprovechamiento de la energía solar. Si bien se obtuvieron valores de mejoras referenciales en cuanto al comportamiento energético-ambiental por áreas hospitalarias a nivel red y en diferentes horizontes temporales, se considera necesario desagregar las áreas de Internación en servicios para obtener un relevamiento diferenciado y proponer medidas concretas para cada uno. La discriminación de espacios según funciones específicas

en áreas de Internación resulta relevante ya que pueden presentarse elevados contrastes en cuanto a requerimientos higrotérmicos y asépticos y, en consecuencia, en el consumo (y/o demanda) de la energía.

Por otro lado, se considera que, contar con un diagnóstico energético a nivel red, discriminando áreas hospitalarias y servicios, es una tarea necesaria para llevar a cabo planes y lineamientos desde entidades administrativas centrales. Ejemplos de este tipo de acciones se encuentran en dos casos: el “Plan integral de guardias hospitalarias” (Ministerio de Salud de la Provincia de Buenos Aires, 2020), y el acondicionamiento de diversas salas de Internación en el año 2020, ambas medidas aplicadas en establecimientos hospitalarios de la provincia de Buenos Aires. El primer caso, se llevó a cabo en el periodo 2018-2020, donde se reacondicionaron y construyeron nuevos espacios en las áreas de Atención ambulatoria de distintos hospitales públicos. El segundo caso se llevó a cabo en el año 2020 con el objetivo de afrontar la pandemia COVID-19. En este último, se adoptaron resoluciones de forma urgente e inmediata, sin contar con una base de datos que contenga información respecto a las características técnico-constructivas y posibles medidas de mejoramiento. De modo que, en diversas ocasiones, las estrategias resultaron inadecuadas desde el punto de vista arquitectónico y aséptico (como la instalación de bombas de calor tipo *split* en salas de Internación, contenidas en edificios de carácter patrimonial). Así, contar con una base de datos que presente el estado actual de diversas áreas hospitalarias y sus respectivos servicios, posibilitará servir de apoyo a la toma de decisiones respecto de la implementación de medidas en establecimientos hospitalarios.

A partir de lo esbozado, se analizan los servicios de las áreas de Internación con el fin de establecer un diagnóstico energético en una determinada red de hospitales. Para abordar estos espacios, además de contar con los requerimientos necesarios mediante normativas técnico-constructivas (Instituto Argentino de Normalización y Certificación, 2006, 2020) y funcionales (Dirección Nacional de Calidad en Servicios de Salud y Regulación Sanitaria, 2021a, 2021b), se busca conocer la situación existente de distintos establecimientos. Para ello, resulta necesario definir una línea de base. Actualmente existen guías que proporcionan plantillas de control y relevamiento para edificios en general, como las que ofrece el Manual de procedimiento para la realización de auditorías energéticas en edificios (Junta de Castilla y León, 2009), y para establecimientos hospitalarios, como las proporcionadas por la Agencia Chilena de Eficiencia Energética (2012) y las presentes en la guía de la Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid (2010). Asimismo, la herramienta de evaluación de la Organización Panamericana de la Salud (OPS) (2018) fue diseñada para recopilar información y guiar la toma de decisiones en reformas a llevarse a cabo en un establecimiento de salud. Estos trabajos no abordan las particularidades de las áreas hospitalarias y —en el caso del trabajo de la OPS— las encuestas y plantillas resultan demasiado extensas, lo cual podría dificultarse su completamiento.

El objetivo de este trabajo consiste en el desarrollo de una herramienta que facilite el relevamiento detallado en los servicios de Internación de una red de establecimientos hospitalarios. Esto implica la recolección de datos en cuanto a características de climatización, equipamiento, iluminación y de agua caliente sanitaria (ACS). Además, se propone relevar otros datos que influyen indirectamente en el consumo energético, tales como el tipo de equipos, las cargas térmicas internas y externas, orientación del edificio y características de la envolvente edilicia. En cuanto a los usuarios de dicha herramienta, los mismos requieren del entendimiento de un lenguaje relacionado a la construcción y al mantenimiento de establecimientos hospitalarios.

## **METODOLOGÍA**

La herramienta consiste en la elaboración de un formulario orientado al personal del área de arquitectura o mantenimiento de los hospitales perteneciente a una misma red. Su organización y estructura se resume a continuación.

- Presentación del formulario
- Datos del auditor y de la institución
- Servicio de Internación
- Climatización

- Equipamiento e iluminación
- Agua caliente sanitaria

### **Presentación del formulario**

La presentación consta de un texto de tres párrafos explicando el objetivo del formulario. Se especifica además un acuerdo en la definición de áreas hospitalarias. Se menciona la desagregación realizada por Martini (2010), donde se obtienen las áreas de Internación, Atención ambulatoria, Diagnóstico y tratamiento, Cirugía, Servicios Auxiliares y de apoyo, Circulaciones y baños, y Administración.

Finalmente, se explica que el formulario se destina a un servicio por planta o nivel de un pabellón o edificio, debido a la cantidad de datos solicitados. En caso de que un mismo servicio se desarrolle en más de un nivel dentro de un mismo edificio o pabellón, se deberá realizar otro formulario señalando el nivel correspondiente.

### **Datos del auditor y de la institución**

En este punto se busca que el auditor proporcione datos necesarios personales e indique la institución que representa. Luego de ingresar su prefijo (título) y nombre y apellido, debe seleccionar la institución a la que representa. Para ello se ofrece una serie de opciones según la red de establecimientos en estudio y la opción “otro”, en caso de que la institución no pertenezca a ninguna de ellas.

### **Servicio de Internación**

Aquí, se realiza un relevamiento del servicio de Internación. En primer lugar, se solicita una imagen satelital del edificio o pabellón. Luego, se especifica su denominación y el nivel donde se encuentra el servicio. Posteriormente, se selecciona el tipo de Internación a auditar. Para ello se ofrecen tres opciones según lo establecido por la Dirección Nacional de Calidad en Servicios de Salud y Regulación Sanitaria (2021). Se escoge entre las opciones Cuidados básicos, Cuidados intermedios o Cuidados intensivos.

Ya en una etapa de relevamiento, se incorpora un croquis de la planta o una imagen desde un dispositivo con la numeración de espacios, lo cual genera una referenciación para los puntos siguientes. Finalmente, se solicita asignar la denominación, una breve descripción de la función, la superficie y la altura de cada espacio del sector referenciado anteriormente (Tabla 1).

*Tabla 1. Características generales y dimensiones del servicio de Internación*

| Espacio N°      | Denominación               | Función                                                                                                               | Superficie [m <sup>2</sup> ] | Altura [m]      |
|-----------------|----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|-----------------|
| Ej: 3           | Ej: Salas inmunodeprimidos | Ej: Internación de pacientes inmunodeprimidos. Espacio hospitalario con aire presurizado más alto que sus alrededores | Ej: 30                       | Ej: 2,7         |
| (Valor: número) | (Valor: texto)             | (Valor: texto)                                                                                                        | (Valor: número)              | (Valor: número) |
| (Valor: número) | (Valor: texto)             | (Valor: texto)                                                                                                        | (Valor: número)              | (Valor: número) |
| (Valor: número) | (Valor: texto)             | (Valor: texto)                                                                                                        | (Valor: número)              | (Valor: número) |

### **Climatización**

Para el relevamiento de los datos de climatización, se define el tiempo de uso de cada espacio, las características principales de los equipos de refrigeración y calefacción, cantidad de ocupantes, tratamiento del aire, características de la envolvente edilicia (superficie transparente y opaca) y de elementos internos (muros adyacentes a otros espacios y entrepisos).

Para considerar el período de funcionamiento de los sistemas de climatización, se establece la franja horaria diaria de cada espacio (Tabla 2).



Tabla 2. Tiempo de uso por cada espacio del servicio

| Habitaciones   | Circulaciones  | Esperas        | Baños          | Estar médicos  | Recepciones    | Office         | Otros          |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Ej: 24hs       | Ej: 24hs       | Ej: 24 hs      | Ej: 24hs       | Ej: 24hs       | Ej: 8hs - 14hs | Ej: 9hs - 17hs | Ej: 9hs - 17hs |
| (Valor: texto) | (Valor: texto) | (Valor: texto) | (Valor: texto) | (Valor: texto) | (Valor: texto) | (Valor: texto) | (Valor: texto) |
| (Valor: texto) | (Valor: texto) | (Valor: texto) | (Valor: texto) | (Valor: texto) | (Valor: texto) | (Valor: texto) | (Valor: texto) |
| (Valor: texto) | (Valor: texto) | (Valor: texto) | (Valor: texto) | (Valor: texto) | (Valor: texto) | (Valor: texto) | (Valor: texto) |

Para la caracterización de los sistemas de refrigeración y calefacción se ingresa el tipo de equipo en cuanto a la gestión de la cesión o absorción de calor, es decir si se cuenta con un sistema individual, zonal o central. Luego, se señala la tecnología del sistema, por ejemplo, si el equipo resulta individual se escoge entre las tecnologías conocidas: ventana (autocontenido), *split* o portable. Así, también, se requiere de la potencia térmica y eléctrica, y el rendimiento del sistema, como la etiqueta energética (A-G) o valores de SEER (Relación de Eficiencia Energética Estacional, por sus siglas en inglés), en caso de refrigeración, o SCOP (Coeficiente de Rendimiento Estacional, por sus siglas en inglés), en caso de calefacción. Luego, se determina a qué espacios abastecen los sistemas. Por ejemplo, si el tipo de sistema es “central”, tecnología “caldera”, con un rendimiento de “0,7”, cantidad “1”, podrá especificar qué espacios son climatizados por el mencionado equipo, escribiendo en Espacio N° “1, 2, 3 y 8”. Por otro lado, en el ítem de calefacción, a diferencia de refrigeración, se solicita la fuente energética, ya que existe la posibilidad de generar calor a partir de la combustión de gas natural o envasado (Tabla 3).

Tabla 3. Características de sistemas de refrigeración/calefacción en el servicio

| Tipo de equipo | Tecnología     | Potencia térmica [W] | Potencia eléctrica [W] | Rendimiento    | Cantidad        | Espacio N°             |
|----------------|----------------|----------------------|------------------------|----------------|-----------------|------------------------|
| Ej: Central    | Ej: Chiller    | Ej: 140000           | Ej: 9300               | Ej: 15         | Ej: 1           | Ej: 1, 2, 3, 6, 8 y 10 |
| (Valor: texto) | (Valor: texto) | (Valor: número)      | (Valor: número)        | (Valor: texto) | (Valor: número) | (Valor: texto)         |
| (Valor: texto) | (Valor: texto) | (Valor: número)      | (Valor: número)        | (Valor: texto) | (Valor: número) | (Valor: texto)         |
| (Valor: texto) | (Valor: texto) | (Valor: número)      | (Valor: número)        | (Valor: texto) | (Valor: número) | (Valor: texto)         |

Para el tratamiento del aire se ingresan datos relacionados a los tipos, la cantidad, la potencia y la eficiencia de los sistemas que se utilizan para aportar calidad al aire interior. A diferencia de los ítems anteriores, se ofrece la posibilidad de seleccionar más de una de las siguientes opciones:

- Apertura y cierre de ventanas.
- Función integrada en el sistema de climatización.
- Equipos auxiliares.
- Otro.

Al momento de especificar las características del equipo auxiliar, se caracteriza el mismo definiendo el tipo del equipo (unidades manejadoras de aire (UMAs), purificadores de aire, entre otros), el tipo de filtro (retención de sólidos (G4), de carbono activado, HEPA (Filtros de Aire de Alta Eficiencia, por sus siglas en inglés), entre otros). También se detalla la potencia del equipo, la frecuencia en el cambio de filtros, la cantidad de equipos y los espacios a los que abastece (Tabla 4). Luego, se requiere indicar si en el proceso de inyección de aire exterior se utilizan mecanismos para la recuperación de calor.

*Tabla 4. Características del equipo auxiliar para el tratamiento del aire*

| Tipo de equipo | Tipo de filtro | Potencia nominal [W] | Frecuencia en el recambio de filtros [meses] | Cantidad        | Espacio N°      |
|----------------|----------------|----------------------|----------------------------------------------|-----------------|-----------------|
| Ej: UMA        | Ej: HEPA       | Ej: 5000             | Ej: 6                                        | Ej: 1           | Ej: 1, 2, 4 y 5 |
| (Valor: texto) | (Valor: texto) | (Valor: número)      | (Valor: número)                              | (Valor: número) | (Valor: texto)  |
| (Valor: texto) | (Valor: texto) | (Valor: número)      | (Valor: número)                              | (Valor: número) | (Valor: texto)  |
| (Valor: texto) | (Valor: texto) | (Valor: número)      | (Valor: número)                              | (Valor: número) | (Valor: texto)  |

Respecto a las características constructivas, en se busca definir, en primer lugar, los parámetros de la envolvente edilicia con el fin de establecer pérdidas de calor y cargas térmicas por transmisión y radiación. En este caso, se aborda la envolvente vertical (muros, ventanas y puertas) y la envolvente horizontal (pisos en contacto con el terreno y techos).

Para la envolvente edilicia vertical se especifica la cantidad de superficie opaca y transparente por orientación (Tabla 5).

*Tabla 5. Superficie de envolvente opaca y transparente por orientación*

| Orientación | Muros [m <sup>2</sup> ] | Ventanas [m <sup>2</sup> ] | Puertas [m <sup>2</sup> ] |
|-------------|-------------------------|----------------------------|---------------------------|
| Norte       | (Valor: número)         | (Valor: número)            | (Valor: número)           |
| Noroeste    | (Valor: número)         | (Valor: número)            | (Valor: número)           |
| Este        | (Valor: número)         | (Valor: número)            | (Valor: número)           |
| Sureste     | (Valor: número)         | (Valor: número)            | (Valor: número)           |
| Sur         | (Valor: número)         | (Valor: número)            | (Valor: número)           |
| Suroeste    | (Valor: número)         | (Valor: número)            | (Valor: número)           |
| Oeste       | (Valor: número)         | (Valor: número)            | (Valor: número)           |
| Noroeste    | (Valor: número)         | (Valor: número)            | (Valor: número)           |

De una manera similar sucede con la envolvente horizontal donde se ingresa la cantidad de metros cuadrados de piso y/o de techo según corresponda. Previo a ello, se solicita seleccionar la condición de exposición del servicio según adyacencias:

- Entrepiso.
- Superficie horizontal superior en contacto con el exterior e inferior en contacto con terreno natural.
- Superficie horizontal superior en contacto con el exterior e inferior en contacto con otra función del establecimiento.
- Superficie horizontal superior en contacto con otra función del establecimiento e inferior en contacto con terreno natural.

En este caso, la selección de una respuesta afecta la secuencia de información que el usuario deberá cargar de la envolvente horizontal. Por ejemplo, si se selecciona la condición “Entrepiso” se pasará al próximo ítem; o en el caso de que se seleccione “Superficie horizontal superior en contacto con el exterior e inferior en contacto con otra función del establecimiento” se caracterizarán los componentes del techo y no del piso.

Tanto para la superficie horizontal como para la vertical, se seleccionará entre posibles resoluciones constructivas. Para ello, se ofrece una serie de opciones para elegir la que se considere más representativa o la opción “otro” para incluir otra composición y/o aclarar especificaciones de una opción seleccionada. Para la elaboración de estas alternativas se utiliza el catálogo desarrollado por Urteche (2024), el cual analiza la envolvente edilicia actual de una red de establecimientos hospitalarios, al tiempo que ofrece propuestas de mejoramiento.

Seguido a las especificaciones de la envolvente, se incluyen opciones para determinar características técnico-constructivas de elementos internos del servicio (entrepisos y muros en adyacencia con otros ambientes). Contar con esta información permite establecer parámetros relacionados a la inercia térmica, es decir, determinar la disposición de las capas de cada elemento interno, su masa y su capacidad calorífica, permitirá conocer el tiempo necesario para llegar a las condiciones internas de confort, utilizando estrategias pasivas o equipos activos de climatización. Como en el caso anterior, se ofrece una serie de soluciones constructivas con la opción “otro” para añadir detalles o bien para agregar otra solución constructiva no incluida en el listado.

### ***Equipamiento e iluminación***

En este punto se busca caracterizar los equipos y luminarias en los servicios de Internación. En el caso del equipamiento se establecen valores por cada espacio del servicio, se especifica su uso (médico, ofimático u otro), el tipo de equipo (TV, PC, cargadores de teléfonos, entre otros), su potencia, la cantidad y el tiempo de uso estimado en el período de una semana (Tabla 6). En el caso de la iluminación, se ingresan por cada espacio del servicio el tipo de luminarias (tubos, lámparas, entre otros), la tecnología (LED, fluorescentes, incandescentes, entre otros), la potencia, la cantidad y el tiempo de uso estimado por día (Tabla 7).

*Tabla 6. Caracterización del equipamiento*

| Espacio N°     | Uso            | Tipo de equipo | Potencia nominal [W] | Cantidad        | Tiempo de uso estimado por semana [h/semana] |
|----------------|----------------|----------------|----------------------|-----------------|----------------------------------------------|
| Ej: 3          | Ej: ofimático  | Ej: PC         | Ej: 5000             | Ej: 1           | Ej: 40                                       |
| (Valor: texto) | (Valor: texto) | (Valor: texto) | (Valor: número)      | (Valor: número) | (Valor: número)                              |
| (Valor: texto) | (Valor: texto) | (Valor: texto) | (Valor: número)      | (Valor: número) | (Valor: número)                              |
| (Valor: texto) | (Valor: texto) | (Valor: texto) | (Valor: número)      | (Valor: número) | (Valor: número)                              |

*Tabla 7. Caracterización de la iluminación*

| Espacio N°      | Tipo de luminarias | Tecnología        | Potencia nominal [W] | Cantidad        | Tiempo de uso estimado por día [h/día] |
|-----------------|--------------------|-------------------|----------------------|-----------------|----------------------------------------|
| Ej: 4           | Ej: tubos          | Ej: fluorescentes | Ej: 36               | Ej: 2           | Ej: 16                                 |
| (Valor: número) | (Valor: texto)     | (Valor: texto)    | (Valor: número)      | (Valor: número) | (Valor: número)                        |
| (Valor: número) | (Valor: texto)     | (Valor: texto)    | (Valor: número)      | (Valor: número) | (Valor: número)                        |
| (Valor: número) | (Valor: texto)     | (Valor: texto)    | (Valor: número)      | (Valor: número) | (Valor: número)                        |

Cabe destacar que estas caracterizaciones resultan necesarias para determinar las cargas térmicas internas correspondientes a equipamiento e iluminación.

### ***Agua caliente sanitaria (ACS)***

En cuanto al ACS se buscan establecer los consumos generados en a partir de su producción. El primer ítem consiste en verificar la existencia de artefactos que suministren ACS en el servicio de Internación. En este caso, se realiza una pregunta del tipo “Sí/No” para determinar si el servicio utiliza ACS. En caso de ser negativa la respuesta, se finaliza el formulario, de lo contrario se procede a continuar con las siguientes preguntas. Posteriormente, se solicita ingresar el tipo de sistema (individual o central), la tecnología (caldera, pasteurizadores, termotanques, entre otros), la fuente (electricidad o gas natural), la potencia, la eficiencia del sistema y la cantidad (Tabla 8). Asimismo, se requiere de los artefactos que utilizan ACS por cada espacio, así como su cantidad (Tabla 9).

Tabla 8. Generación de ACS

| Tipo           | Tecnología      | Fuente          | Potencia nominal [W] | Rendimiento     | Cantidad        |
|----------------|-----------------|-----------------|----------------------|-----------------|-----------------|
| Ej: individual | Ej: termotanque | Ej: gas natural | Ej: 1500             | Ej: C           | Ej: 2           |
| (Valor: texto) | (Valor: texto)  | (Valor: texto)  | (Valor: número)      | (Valor: número) | (Valor: número) |
| (Valor: texto) | (Valor: texto)  | (Valor: texto)  | (Valor: número)      | (Valor: número) | (Valor: número) |
| (Valor: texto) | (Valor: texto)  | (Valor: texto)  | (Valor: número)      | (Valor: número) | (Valor: número) |

Tabla 9. Artefactos para la utilización de ACS

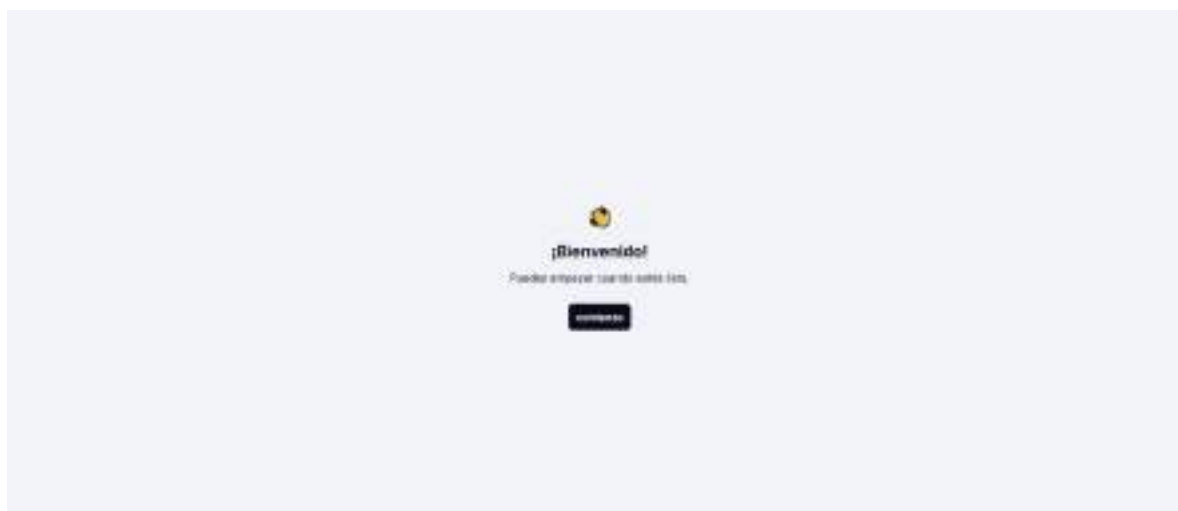
| Espacio N°      | Artefacto      | Cantidad        |
|-----------------|----------------|-----------------|
| Ej: 5           | Ej: Ducha      | Ej: 1           |
| (Valor: número) | (Valor: texto) | (Valor: número) |
| (Valor: número) | (Valor: texto) | (Valor: número) |
| (Valor: número) | (Valor: texto) | (Valor: número) |

Por último, en cuanto al tratamiento del ACS se especifican los medios que se utilizan en el servicio de Internación para controlar y tratar la bacteria *Legionella Pneumophila* ya que, dependiendo la respuesta, podrían existir diferencias respecto al consumo energético.

## RESULTADOS

Para la utilización de la herramienta desarrollada para el diagnóstico energético en los servicios que integran las áreas de Internación se requirió de una plataforma de acceso *online* que permitiera gestionar las distintas respuestas. Las principales características que definieron la elección fueron: la capacidad de admitir preguntas de diferente tipo y realizar bocetos o cargar imágenes. Por este motivo, se adoptó la aplicación *forms* (forms.app, 2025), ya que —además— presenta una interfaz amigable con el usuario y una organización que facilita guiarlo a los ítems que correspondan en función de sus respuestas.

Otro aspecto a destacar es el completamiento del formulario mediante distintos dispositivos (PC, tableta o *smartphone*) (Figura 1). La plataforma permite ser responsiva, adaptando el formulario según el dispositivo que se utilice, lo cual posibilita al usuario realizar parcial o completamente la auditoria en su oficina (PC de escritorio o Notebook) o en recorrido (tableta o *smartphone*). Por otro lado, se utilizaron imágenes creadas con Copilot (Microsoft, 2025) para orientar al auditor a responder correctamente (Figura 2) y otras para ilustrar secciones (Figura 3). Asimismo, para facilitar el completamiento de ciertas preguntas se utilizaron espacios del tipo *placeholder* (Figura 4), donde se ofrece una respuesta ejemplo a lo que podría completarse.



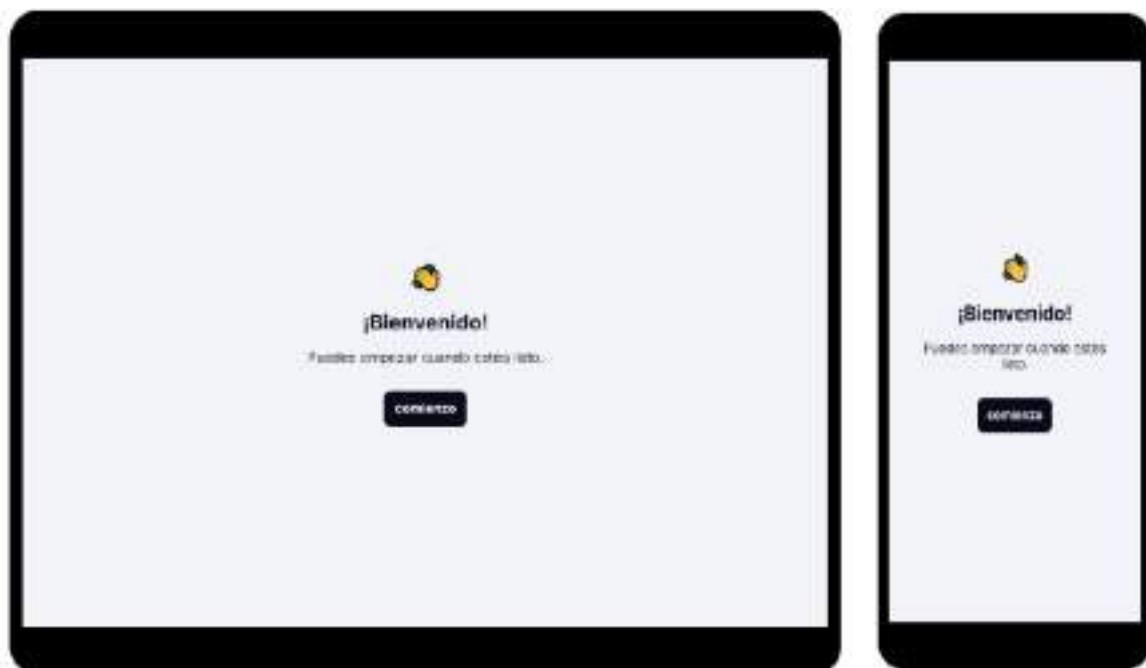


Figura 1: Adaptación de formulario a PC, tableta o a smartphone



Figura 2: Imagen que orienta al auditor para responder pregunta. Ejemplo de lo que podría resultar un croquis del servicio de Internación y su referenciación.



(a) (b)  
Figura 3: Imágenes que ilustran secciones, (a) Refrigeración, (b) Calefacción

**11. Refrigeración - Sistemas para la refrigeración \***

Utilizando la referenciación realizada en el croquis ingrese el tipo, la tecnología, la cantidad, la potencia y la eficiencia del sistema de refrigeración. En la columna "Espacio N°" especifique los espacios que son climatizados por cada sistema. Agregue las filas necesarias con el botón "+". No cargue espacios sin refrigeración.

| Tipo de equipo | Tecnología    | Cantidad |
|----------------|---------------|----------|
| T Ej: Central  | T Ej: Chiller | 1 Ej: 1  |

+

Presione **ENTRAR** **próximo**

Figura 4: Utilización de espacios tipo placeholder.

A partir de la estructura propuesta en la metodología y disposición de elementos se obtuvieron treinta y tres preguntas organizadas de la siguiente manera: 0 para Presentación del formulario, 2 para Datos del auditor y la institución, 5 para Servicio de Internación, 20 para Climatización, 2 para Equipamiento e iluminación y 4 para Agua caliente sanitaria. En este sentido, se estima que el usuario de la herramienta podría completar el formulario en una jornada laboral (dentro de las ocho horas de un día de trabajo). Este aspecto resulta positivo desde el punto de vista operacional, ya que podría generarse desmotivación si la misma resultara extensa e impráctica.

## CONCLUSIONES

Siendo las áreas de Internación espacios potenciales para la rehabilitación energética en establecimientos hospitalarios, este trabajo propuso el desarrollo de una herramienta de relevamiento para el diagnóstico energético en servicios de Internación, tales como Unidad de Trasplante de Médula Ósea (UTMO), Unidad de Terapia Intensiva (UTI), Quemados, entre otros. Considerando la necesidad de establecer un



diagnóstico a nivel red, se elaboró un formulario a completarse por profesionales de la construcción en entornos de salud.

Dicha herramienta, en comparación con guías y plantillas existentes, aborda particularidades propias de cada uno de los servicios de las áreas de Internación. Por tal motivo se generaron preguntas específicas acerca del tratamiento del aire y otros aspectos que influyen directamente en el consumo de la climatización, tales como las características de la envolvente edilicia y de elementos internos, y los tipos de sistemas, tanto para refrigerar como calefaccionar espacios. En este sentido, se elaboraron 20 (de 33) preguntas correspondientes al punto Climatización, lo cual denota el interés en este uso.

La plataforma utilizada para la generación del formulario resultó ser una herramienta práctica para la elaboración de preguntas. Asimismo, permitió introducir diversos elementos para orientar al usuario para obtener respuestas concretas y adecuadas.

Para la aplicación de esta herramienta en el corto plazo se orienta a que sus usuarios sean los arquitectos del programa de Residencia de Arquitectura Hospitalaria, llevado a cabo en la provincia de Buenos Aires. El mismo busca la capacitación de arquitectos especializados en el diseño y gestión de espacios de salud. De este modo, la triangulación entre entidades de gestión, hospitales pertenecientes a una misma red y la institución que genera la transferencia tecnológica, posibilitaría concretar el diagnóstico energético en los distintos servicios de las áreas de Internación de una red de establecimientos hospitalarios.

En una primera instancia se espera ensayar la herramienta desarrollada en hospitales que contengan edificios con diversidad en cuanto a los tipos de Internación y con características heterogéneas en aspectos tecnológicos y constructivos. En este sentido, se propone realizar una prueba piloto en el Hospital Interzonal General de Agudos (HIGA) “Gral. San Martín”, establecimiento perteneciente a la Región Sanitaria XI de la Provincia de Buenos Aires. Dicho establecimiento se encuentra en la Micro-Región del Gran La Plata y cuenta con servicios de UTI, UTMO, Quemados e Internación general. Además, aglomera funciones en edificios de primera generación (construidos en 1880-1925), segunda generación (construidos en 1925-1955), tercera generación (construidos en 1955-2000) y cuarta generación (construidos a partir del 2000 hasta la actualidad), lo cual permite establecer el contraste en cuanto a aspectos técnico-constructivos.

Como futuros trabajos se propone el desarrollo de una encuesta para usuarios de las áreas de Internación y sus respectivos sectores que la integran. La misma complementaría los resultados obtenidos a partir de esta herramienta con el relevamiento y análisis de variables del tipo cualitativas. Por último, estos trabajos constituyen insumos para investigaciones vigentes que se relacionan al desarrollo de un sistema de etiquetado energético por área hospitalaria (Seltzer, 2024).

## REFERENCIAS

- Agencia Chilena de Eficiencia Energética. (2012). *Manual de Gestor en eficiencia energética. Sector hospitalario* (1era ed.). <https://www.guiachileenergia.cl/agencia-chilena-de-eficiencia-energetica-achee/>
- Cesari, S., Valdiserri, P., Coccagna, M., & Mazzacane, S. (2018). Energy savings in hospital patient rooms: The role of windows size and glazing properties. *Energy Procedia*, 148, 1151–1158. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.08.027>
- Dirección Nacional de Calidad en Servicios de Salud y Regulación Sanitaria. (2021a). *Directrices, organización y funcionamiento de internación. Modelo de gestión por cuidados progresivos*.
- Dirección Nacional de Calidad en Servicios de Salud y Regulación Sanitaria. (2021b). *La habitación de internación en cuidados básicos*.
- Fondoso Ossola, S. T. (2025). *Formulación, análisis y evaluación de estrategias energéticas alternativas para el subsector salud, en el marco de la construcción de escenarios* [Universidad Nacional de La Plata]. <https://doi.org/10.35537/10915/179457>
- Forms.app. (2025). Forms.app [Herramienta de creación de formularios en línea]. <https://forms.app/>

- Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid. (2010). *Guía de Ahorro y Eficiencia Energética en Hospitales* (1era ed.). <http://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/Guia-de-Ahorro-y-Eficiencia-Energetica-en-Hospitales-fenercom-2010.pdf>
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2006). *Norma argentina IRAM 11625. Aislamiento térmico en edificios. Verificación de sus condiciones higrotérmicas. Verificación del riesgo de condensación de vapor de agua superficial e intersticial en los paños centrales de muros exteriores, pisos y techos de* .
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2020). *Norma argentina IRAM 80400. Sistemas para el tratamiento del aire en los establecimientos para el cuidado de la salud*.
- Junta de Castilla y León. (2009). *Manual de procedimiento para la realización de auditorías energéticas en edificios*. Tomo 2 (Vol. 2). <https://energia.jcyl.es/web/jcyl/Energia/es/Plantilla100Detalle/1267710822752/Publicacion/1235466274402/Redaccion>
- Martini, I. (2010). *Diagnóstico y mejoramiento de los procesos de gestión edilicia energética productiva en la red de salud* [Universidad Nacional de Salta]. <https://drive.google.com/open?id=0Bz3sfV4ZQ06NMXRJbFhEb08zVVk>
- Microsoft. (2025). Copilot [Software de inteligencia artificial]. Microsoft. <https://copilot.microsoft.com/>
- Ministerio de Salud de la Provincia de Buenos Aires. (2020). *La Provincia finalizó guardias y realizó obras de remodelación en 25 hospitales bonaerenses*. [https://www.gba.gob.ar/saludprovincia/noticias/la\\_provincia\\_finalizó\\_guardias\\_y\\_realizó\\_obras\\_de\\_remodelación\\_en\\_25](https://www.gba.gob.ar/saludprovincia/noticias/la_provincia_finalizó_guardias_y_realizó_obras_de_remodelación_en_25)
- Organización Panamericana de la Salud. (2018). *Herramienta para Hospitales Inteligentes* (1era ed.). [https://www.paho.org/disasters/index.php?option=com\\_docman&view=download&alias=2692-herramienta-para-hospitales-inteligentes&category\\_slug=smart-hospitals-toolkit&Itemid=1179&lang=en](https://www.paho.org/disasters/index.php?option=com_docman&view=download&alias=2692-herramienta-para-hospitales-inteligentes&category_slug=smart-hospitals-toolkit&Itemid=1179&lang=en)
- Seltzer, M. (2024). Desarrollo de estrategias metodológicas orientadas a la implementación de un programa de etiquetado energético edilicio en el sector salud. *Encuentro de Becarios de Grado y Posgrado de La UNLP (EBEC)*. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/173446>
- Urtenèche, E. (2024). *Estrategias tecnológico-constructivas para el mejoramiento de la eficiencia energética de la envolvente edilicia del sector salud* [Universidad Nacional de La Plata]. <https://doi.org/10.35537/10915/173724>

## SURVEY TOOL FOR THE ELABORATION OF AN ENERGY DIAGNOSIS IN INPATIENT AREAS

**ABSTRACT:** Inpatient areas are potential spaces for energy rehabilitation, which is explained by their demand for air conditioning and by their surface area. There has not been an in-depth study of inpatient areas at the network level, where their services may be contrasting in terms of energy consumption. The objective of this work is to develop a tool to survey the parameters that influence the energy performance of services in inpatient areas. By means of its application in a network of facilities, a diagnosis would be obtained to verify differences in consumption, both for their hygrothermal and aseptic requirements, as well as for the actual use in different hospitals. A form structured in six points (Presentation of the form, Data of the auditor and the institution, Inpatient Service, Air Conditioning, Equipment and Lighting, and Sanitary Hot Water) was elaborated. The result is a tool consisting of an online access form, which allows centralizing and managing responses, as well as facilitating an audit from a desktop or on the road. It is considered that, as it consists of thirty-three questions, it can be completed in one working day, which is positive for the user.

**Keywords:** energy audit, hospital areas, hospitals, health sector

## **DISEÑO DEL ESPACIO URBANO PARA LA GESTIÓN SUSTENTABLE DE AGUAS PLUVIALES.**

**Caso de estudio: “BARRIO 126 VIVIENDAS” DE YERBA BUENA, TUCUMÁN.**

**Marta S. Cisterna<sup>1</sup>, Sandra G. Márquez Vega<sup>1</sup>, Luciano M. Garbero<sup>1</sup>,  
Cintya Villa<sup>1</sup>, Sebastián Atencia Gualda<sup>1</sup>.**

<sup>1</sup>Centro de Estudios Energía, Habitabilidad y Arquitectura Sustentable (CEEHAS). Instituto de Acondicionamiento Ambiental (IAA). Facultad de Arquitectura y Urbanismo – Universidad Nacional de Tucumán. Av. Roca 1900, S.M. de Tucumán, CP 4000, Tucumán. [www.ceehas.org.ar](http://www.ceehas.org.ar)  
Tel. (54) (381) 4364093, interno 114.

Email [mcisterna@herrera.unt.edu.ar](mailto:mcisterna@herrera.unt.edu.ar) - [sgmarquezvega@herrera.unt.edu.ar](mailto:sgmarquezvega@herrera.unt.edu.ar)

**RESUMEN:** En un contexto global cada vez más urbanizado, es urgente producir marcos conceptuales y conocimiento empírico sobre el entorno construido para su adecuación sustentable con el ecosistema. En concordancia, se presentan estrategias de diseño para dar respuesta a problemas detectados en el Barrio 126 Viviendas, elegido como caso de estudio. Construido por el Instituto Provincial de Vivienda y Desarrollo Urbano IPVDU-Tucumán, se encuentra en el municipio de Yerba Buena, en el sector adyacente al cerro San Javier, en una zona caracterizada por el crecimiento urbano, con obras de infraestructura y viales, lo cual ha modificado los ecosistemas y el paisaje natural. A partir de relevamientos, entrevistas y del análisis de documentos planimétricos, se detectaron problemas por la inadecuada gestión del agua de lluvia que ocasiona inundaciones en el barrio y en zonas adyacentes. Se proponen estrategias de diseño que consideran los ecosistemas del piedemonte e integran los espacios verdes, arbolado, caminerías, calzadas y veredas del barrio, con un sistema urbano de drenaje sustentable SUDS. Se verifica que la propuesta constituye una solución adecuada, con importantes beneficios para la comunidad y el medio ambiente. Se recomienda su incorporación como estrategia de prevención primaria en las normativas, tanto municipales como del IPVDU.

**Palabras clave:** drenajes urbanos sustentables, infraestructura verde, estrategias de diseño.

## **INTRODUCCIÓN**

El actual desarrollo urbano impulsa múltiples cambios ambientales globales que causan perturbaciones en la vida urbana y los ecosistemas y nos enfrenta a nuevos desafíos (Frantzeskaki et al., 2019). El modelo tradicional de desarrollo urbano no integra la naturaleza, como consecuencia, crea ciudades que retienen el calor, aumentan el riesgo de inundaciones y desplazan a las comunidades ecológicas. Ante este escenario, se plantea el desafío de pensar nuevos modelos, eficientes y sustentables, que integren la naturaleza y funcionen en armonía con los ecosistemas. En este sentido, los sistemas de infraestructura urbana basados en la naturaleza ofrecen soluciones innovadoras para adecuar las ciudades y contribuir a la sostenibilidad, a la equidad y al bienestar humano (McPhearson et al., 2022). Su diseño integra elementos ecológicos, como suelos, agua, vegetación, comunidades microbianas, etc. Los suelos proporcionan o facilitan un conjunto de procesos físicos, químicos y biológicos que influyen en la el desarrollo de especies vegetales, de comunidades de aves, de insectos, y en la cantidad y calidad del agua. La vegetación desempeña múltiples funciones: influye en la temperatura urbana mediante el sombreado y la evapotranspiración, retiene el agua, sus raíces brindan cohesión, refuerzan la estructura del suelo y reducen su erosión en la capa superficial (Coutts et al., 2013). También presenta otros beneficios debido a que influye en la hidráulica del agua absorbida o transportada al reducir la velocidad del flujo y el potencial erosivo asociado, facilita la sedimentación y la captura de partículas arrastradas



(Sabokrouhiyeh et al., 2020), absorbe nutrientes y otros contaminantes de las aguas subterráneas (Berland et al., 2017). El diseño urbano basado en considerar los ecosistemas busca fomentar la resiliencia y brindar beneficios sociales y económicos. La restauración y el mantenimiento de los ecosistemas promueve la biodiversidad, las interacciones entre los seres humanos y la naturaleza, y amortigua los efectos del cambio climático (Gann et al., 2019).

En la investigación propone la incorporación de estrategias de diseño para la implementación de un sistema urbano de drenaje sustentable SUDS en un barrio ubicado en el piedemonte tucumano, zona con un importante reservorio de biodiversidad. El Área Metropolitana de Tucumán (AMeT), está integrada por el municipio Capital, Tafí Viejo, Yerba Buena, Las Talitas, entre otros. La pendiente general de su territorio determina la interrelación hidráulica entre esas demarcaciones. El agua pluvial caída al oeste del río Salí, proveniente de Tafí Viejo, Las Talitas y Yerba Buena, en líneas generales, escurre en dirección noroeste-sudeste, hacia la Capital, la que está circundada por dos canales protectores de gran magnitud: el Canal Norte y el Canal Sur, y otro menor, el Canal San José. Ambos canales mayores fueron concebidos en su origen como cinturón perimetral protector de la Capital, recibiendo aguas pluviales de cuencas más permeables que las actuales. La expansión urbana y la transformación de suelos agrícolas ocurridas posteriormente a la creación de ambos canales, significaron enormes incrementos de la escorrentía. Sumados a problemas de defectos de ingeniería, de construcción, de escaso mantenimiento y la avanzada destrucción, hoy presentan un notorio deterioro e insuficiencia para el escenario actual (Adler, 2014).

El clima de San Miguel de Tucumán, cálido subtropical con estación seca en invierno, posee un régimen de lluvias de tipo monzónico, estacional y torrencial. Hay un período lluvioso y otro seco. Cada uno abarca un semestre. Inviernos y primaveras secas contrastan con veranos y otoños húmedos. Durante los meses de octubre a abril se concentra más del 90% de la precipitación anual, la cual usualmente supera los 1000 mm (Lazarte Sfer y Roger Paz, 2012). En algunas localidades, como San Miguel de Tucumán y Yerba Buena, el día 8 de marzo de 2025, se registraron las lluvias previstas para todo el mes. Según Cristófer Brito (2025) “...en la capital, el promedio histórico de lluvia para todo marzo es de 134 milímetros, sin embargo, en algunas zonas se registraron más de 130 milímetros en cuatro horas...” El volumen de agua caída en un corto periodo de tiempo produjo fuertes corrientes de agua en el ámbito urbano. Lluvias de esta magnitud, frecuentes de octubre a marzo, provocan inundaciones tanto urbanas como rurales. Las mismas se relacionan no solo con la magnitud de las precipitaciones sino también, y muy conexas, con diversos factores humanos, como el mal uso del suelo, las deforestaciones, las urbanizaciones sin planificación y sin previsión de las obras de infraestructura necesarias, la falta de mantenimiento de ellas y el avanzado deterioro en que caen consecuentemente. En la figura 1 se muestran los canales que forman parte del actual sistema de desagüe pluvial del sector oeste de la provincia, y las áreas con amenazas de inundación, que afectan al barrio en estudio.



Figura 1: Mapa de Riesgo Hídrico, Yerba Buena, Tucumán. Fuente:

[https://www.yerbabuena.gob.ar/wp-content/uploads/2024/05/mapa\\_riesgo\\_hidrico.pdf](https://www.yerbabuena.gob.ar/wp-content/uploads/2024/05/mapa_riesgo_hidrico.pdf)

Ante los escenarios de riesgo, se requieren diversas acciones sostenidas en el tiempo, que demandan esfuerzos de organización, planificación y ejecución complejos. Entre las acciones significativas se

plantea la necesidad de establecer zonas de contención temporaria de aguas, que obren como acumuladoras, y retarden la confluencia hacia los colectores de desagüe. En esta dirección, y como respuesta a los problemas detectados en el Barrio 126 Viviendas de Yerba Buena (Cisterna et al., 2024), se proponen estrategias para el diseño del espacio público, con opciones sostenibles para mejorar la gestión del agua de lluvia. Conjuntamente se propone arbolado urbano que aporta valor paisajístico al barrio, en consonancia con los ecosistemas naturales de la zona. Finalmente se plantean recomendaciones para ser incorporadas por el IPVDU en futuros emprendimientos.

### **Metodología**

Para la investigación se eligió como caso de estudio el Barrio 126 Viviendas, de Yerba Buena, Tucumán. Se llevaron a cabo relevamientos de las condiciones físicas del barrio y su entorno: de los espacios verdes, veredas, calzadas, arbolado, y los desagües pluviales urbanos. También se consultaron documentos planimétricos, históricos y periodísticos, y se realizaron entrevistas en la Dirección Provincial del Agua de Tucumán. A partir del análisis de datos, se elaboraron estrategias diseño.

### **Caso de estudio: Barrio 126 Viviendas – Yerba Buena – Tucumán**

El barrio se encuentra en la zona del piedemonte del cerro San Javier, zona de transición entre la sierra y la llanura que presenta suaves pendientes y alberga una gran riqueza biológica. Incluye el 24% del total de especies de aves del país. Entre sus funciones biológicas se encuentra la de proteger la flora y fauna autóctonas y las cuencas hídricas, asegurando el suministro de agua para consumo y actividades agrícolas. Los suelos están constituidos con los sedimentos acarreados por los numerosos ríos, arroyos y torrentes que descienden del área montañosa. La vegetación natural corresponde al piso inferior del bosque montano subtropical conocido como “Las Yungas”. El importante proceso de condensación en las laderas de las sierras ha permitido el desarrollo de numerosos ríos y arroyos que drenan en sentido oeste-este hasta desaguar su caudal en el principal eje colector de la provincia, es decir, el río Salí. La zona de ubicación del barrio presenta mayor nivel topográfico en su lado noroeste (507 m) y menor en el sector sudeste (501 m), con una pendiente aproximada del 2% (0.020 m por metro), como se observa en el mapa topográfico de Tucumán de la figura 2.



Figura 2: Mapa topográfico de Tucumán, altitud, relieve. Fuente: Mapa topográfico Tucumán. Mapa Interactivo: <https://es-ar.topographic-map.com>

En entrevistas personales con la directora de Estudios y Proyectos de la Dirección Provincial del Agua de Tucumán, (F. Nani, comunicación personal, 20 de mayo de 2025) manifestó que, en los barrios adyacentes Bernel I y II se producen inundaciones por el escurrimiento de un gran volumen de agua proveniente de los barrios ubicados en terrenos del sector oeste, zona de mayor altura. Esta situación no ha sido considerada al planificar el barrio, el agua de lluvia desciende por las calles y por otras superficies impermeables, llegando rápidamente a los barrios ubicados en terrenos aguas abajo. Entre los cursos de agua se encuentra el canal Cainzo-Las Piedras que deriva un brazo hacia la calle Roca, al norte del barrio. Esta derivación del canal ha sido cerrada, lo que produce que parte del agua de lluvia se encauce ahora por las calles del barrio. Como una forma de atenuar estos problemas, se proponen



estrategias de diseño del espacio público, con integración de infraestructura verde y superficies absorbentes, que retienen el agua de lluvia para ralentizar la escorrentía hacia las zonas aledañas y evitan así futuras inundaciones. Se propone un sistema urbano de drenajes sostenible (SUDS) que ofrece una alternativa al sistema unitario de colectores, aplicado actualmente con el fin de deshacerse de la escorrentía en forma rápida. La propuesta se basa en recoger, infiltrar, ralentizar, almacenar, transportar y tratar la escorrentía en el sitio, para mantener la hidrología local (Brown et al., 2009). El SUDS propone la integración de la infraestructura verde para retener y gestionar la escorrentía del agua de lluvia proveniente tanto de las zonas verdes como del entorno pavimentado, impermeable. Además de los beneficios directos relacionados con el agua, los SUDS poseen el potencial de proveer vegetación combinada con agua visible, brindar servicios ecosistémicos, protección de la biodiversidad, la regulación del microclima, la recreación, mejorar el paisajismo y la estética del lugar (Hoang y Fenner, 2016; Mak et al., 2017).

### ***Estrategias de diseño para la gestión de aguas pluviales***

Para la gestión sustentable del agua de lluvia se proponen tres estrategias que consisten en:

- 1 - Complementar la red de cañerías de desagüe pluvial con zanjas de drenaje, vegetadas, abiertas, con un sistema de biorretención filtrante y cañerías subterráneas (conductales) perforadas.
- 2 - Incorporar elementos al sistema urbano de desagües sustentables que permitan la retención del agua de lluvia.
- 3 - Maximizar la cantidad de elementos para la retención, filtración y escurrimiento del agua de lluvia.

Las estrategias combinan elementos que pueden aplicarse en diferentes etapas y presentan diferentes beneficios. Se analiza su aplicación en el Barrio 126 Viviendas de YB, el cual se desarrolla en cuatro manzanas rectangulares con orientación Norte-Sur. Cuenta con cuatro espacios verdes, uno de los cuales fue planteado como una superficie para retención de agua de lluvia, pero no ha sido acondicionado para cumplir dicha función. La superficie total de espacio verde público es de 3078m<sup>2</sup>, denota que existe un déficit de aproximadamente 1500m<sup>2</sup> para cumplir con los 9m<sup>2</sup> de espacio verde por habitante, establecido por la Secretaría de Vivienda en los estándares mínimos de calidad para barrios de viviendas de interés social (Plan Nacional de Viviendas, 2019). El espacio urbano no cuenta con tratamiento, carece de arbolado y de equipamiento, además, la falta de tratamiento del espacio exterior impacta negativamente en las condiciones ambientales y en la estética del barrio. Sobre la infraestructura urbana, la escorrentía del agua de lluvia es ineficiente y se producen inundaciones durante y después de las tormentas, principalmente en las calles y en uno de los espacios verdes. Las manzanas del barrio originalmente presentaban en las veredas un porcentaje de superficie verde, permeable y parquizada, superior al 60% del área total de las mismas. Este valor cumple con el Código de Ordenamiento Urbano de Yerba Buena, (1994) que refiere “*Circulaciones peatonales: definiéndose una zona de caminera (40%) y otra zona parquizada (60%). Arbolado: En la zona denominada parquizada de la vereda es obligatorio plantar un árbol cuya especie determinarán los organismos municipales competentes*”. En el barrio el 54,7 % de las viviendas no cuentan con arbolado. También al observar la evolución y desarrollo de los espacios verdes, se registra la tendencia a impermeabilizar las superficies verdes de veredas y jardines, con caminerías de acceso para los vehículos (figuras 3, 4 y 5). Esto genera una pérdida de superficie permeable importante, pasando de un promedio de 67,7% de superficie verde original, a un promedio de 35,3% de superficie verde actual, lo que representa una reducción del 52%.



*Figuras 3, 4 y 5: Vereda original y veredas con las reformas realizada por los vecinos del barrio.  
Fuente: Google Earth.*

## Estrategias para mejorar la gestión del agua pluvial en el Barrio 126 Viviendas de YB – Tucumán

El suelo de la zona del piedemonte es mayormente con textura franco limosa, presenta equilibrio entre retención de agua, drenaje, fertilidad y aireación (Puchulu y Fernández, 2014). El sistema propuesto mejora la calidad de las aguas pluviales al reducir la carga de sedimentos, de minerales no deseados y otros contaminantes que arrastra la escorrentía de superficies impermeables, mejora la capacidad de los SUDS para almacenar y asegurar la disponibilidad de agua para la vegetación y mejora la biodiversidad a través de procesos ecológicos. Ver tabla 1 y figura 6 con estrategias propuestas.

Tabla 1: Sistemas SUDS propuestos y superficie de uso de los mismos.

| Descripción                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Objetivo                                                                                                                                                                                                                                      | Elementos                                                                                                     | Área aprox. (m²)                                |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| 1 - Complementar la red de tuberías por cunetas o zanjas vegetadas abiertas, con un sistema de biorretención filtrante del agua de lluvia urbana.                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                               |                                                 |
| Complemento de la red de desagües existente en calles y en espacios verdes con canales drenante, abiertos.                                                                                                                                                                                              | Retener y desviar el agua del sitio mediante estructuras vegetales superficiales y una red de drenaje de tuberías complementaria. También se proponen jardines de lluvia para promover el tratamiento in situ.                                | Zanjas de biorretención    | 2000 m² de zanja                                |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                               | Jardines de lluvia         | 40% de la sup. de espacio verde.<br>1543.20 m²  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                               | Total                                                                                                         | 3543.20 m²                                      |
| 2 - Incorporar elementos SUDS que permitan la retención del agua de lluvia urbana.                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                               |                                                 |
| Incorporación de elementos que permiten la retención de agua especialmente en espacios verdes públicos. Se sustituye parte caminerías tradicionales por superficies permeable.                                                                                                                          | Incorporar drenajes adicionales con capacidad de retención local, sin comprometer otras funciones urbanas como las conexiones de tránsito y la recreación. El uso de cubiertas verdes se propone para sup. semicubiertas: galerías, cocheras. | Zanjas de biorretención    | 2000 m² de zanja                                |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                               | Jardines de lluvia        | 1543.20 m²                                      |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                               | Techos verdes            | Sup. Aproximada (15 m² por vivienda)<br>1900 m² |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                               | Pavimentos permeables    | 1008 m²                                         |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                               | Total                                                                                                         | 6451.20 m²                                      |
| 3 - Maximizar la cantidad de elementos SUDS para la retención, filtración y escurrimiento del agua de lluvia.                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                               |                                                 |
| Se propone maximizar la cantidad de elementos en función de su capacidad para almacenar e infiltrar aguas pluviales: techos verdes, veredas y calles con superficies permeables, uso de jardines de lluvia extendidos. Los espacios verdes se utilizan íntegramente para la gestión de aguas pluviales. | Maximización de la cantidad de elementos de drenaje sustentable para retener, almacenar, filtrar, absorber y devolver parte del agua de lluvia a napas freáticas naturales.                                                                   | Zanjas de biorretención  | 2000 m² de zanja                                |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                               | Jardines de lluvia       | 1543,20 m²                                      |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                               | Techos verdes            | Sup. Aprox. (15 m² por vivienda)<br>1900 m²     |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                               | Pozos infiltración       | 4 pozos de 10m³ cada uno: total 40m³            |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                               | Pavimentos permeables    | 1008 m²                                         |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                               | Total                                                                                                         | 6451.20 m² y 40m³                               |

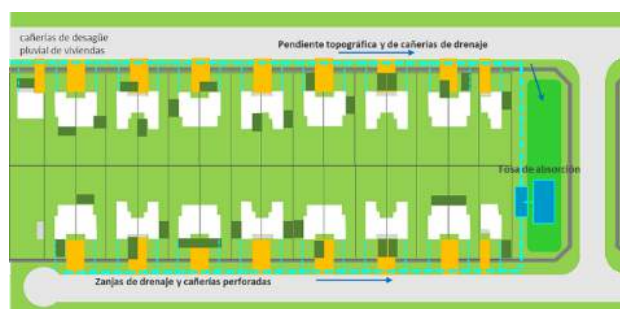


Figura 6: Elementos SUDS propuestos en el estudio. Fuente: elaboración propia.



## ***Sistema de zanjas drenantes vegetadas***

El terreno de emplazamiento del barrio presenta pendientes entre 1,2% y 1,7%, coincidente con los niveles topográficos que brindan un adecuado escurrimiento del agua de lluvia en los sistemas planteados. Se proponen zanjas drenantes de infiltración, que funcionan, en casos de inundaciones menores, para el tratamiento y conducción de las aguas pluviales. El sistema de filtrado se instala en la base de la zanja y proporciona un pretratamiento de las aguas, con la eliminación de sedimentos de grueso o mediano tamaño, la vegetación forma parte del sistema de biorretención que elimina las partículas más finas y los contaminantes asociados. Este sistema se propone para los bordes de las calzadas, en las cuatro manzanas del barrio. Recibe el agua proveniente de las superficies impermeables, también el agua de lluvia excedente de las superficies permeables como los jardines, además del agua de lluvia de las viviendas, de veredas y parte de las calzadas. Se disponen caminerías para el cruce de las zanjas hacia las viviendas, para impedir que el tránsito peatonal y vehicular produzca la compactación y altere el funcionamiento. Cada tramo de zanja conducirá el agua excedente, a través de cañerías, hacia pozos subterráneos de desborde, ubicados en los espacios verdes del barrio. En la figura 7 se muestra la disposición propuesta de las zanjas de biorretención en el barrio. Se plantea la necesidad de la apertura del cordón cuneta en ciertos tramos, para favorecer el vertido de agua de lluvia a las zanjas, cuyo nivel se encuentra por debajo del nivel del mismo. En las figuras 8 y 9 se muestra la situación actual y la propuesta de diseño.

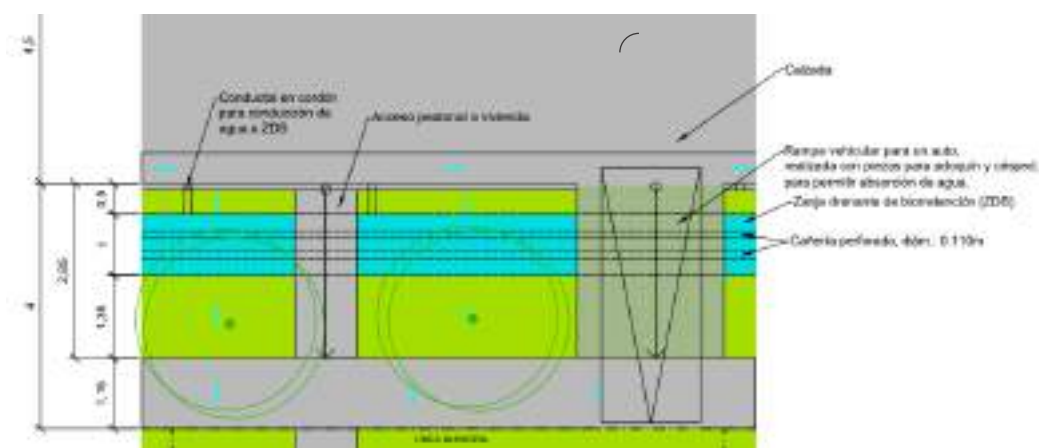


**Figura 7:** Planta del sector frente a las viviendas con la propuesta de zanja drenante de biorretención y caminería de entrada para un vehículo. Fuente: elaboración propia.



**Figuras 8 y 9:** Espacio público actual y fotomontaje con la propuesta. Fuente: Elaboración propia.

Las zanjas constan de un medio filtrante de marga arenosa, que es un suelo fértil, con buen drenaje y capacidad de retención de agua. Luego se requiere una capa de drenaje para transportar el agua tratada a los desagües subterráneos perforados, ésta rodea las tuberías perforadas del desagüe subterráneo y puede ser arena gruesa o grava fina. Si se utiliza grava fina, se recomienda instalar una capa de transición de arena o un geotextil para evitar que el medio filtrante pase a las tuberías perforadas. El sistema funciona filtrando las aguas superficiales a través de la vegetación y luego percolando la escorrentía a

través de medios de filtración fina, de retención prolongada y cierta captación biológica. Estos medios también retardan el flujo en caso de tormentas y son eficientes en la eliminación de contaminantes.

### ***Dimensionado de las cañerías de desagüe de las zanjas de biorretención y los conductales.***

El dimensionado se realiza aplicando el denominado método racional, es una técnica hidrológica utilizada para calcular el caudal máximo de una cuenca (González Del Tánago, 1989). Se basa en una fórmula empírica simple (Ec.1) que relaciona la intensidad de la lluvia típica de la localidad, el área de la cuenca (superficies que vierten agua de lluvia al sistema de desagüe) y un coeficiente de escorrentía de las superficies consideradas, para determinar el caudal máximo que recibe un sistema de desagües:

$$Q = 0.278 CR \times I \times A \quad (1)$$

Donde:

Q: Caudal máximo (m<sup>3</sup>/s)

CR: coeficiente de escorrentía C y CRponderado=  $\Sigma(C \times A)/\Sigma A$  (Tabla 1)

I: Intensidad media máxima de lluvia considerada (mm/h) en función de la duración y la recurrencia (Curvas figura 10)

A: Área de la cuenca (km<sup>2</sup>) (tabla 2)

El método presupone que la lluvia total presenta uniformidad espacial y temporal, siendo su duración igual al tiempo de concentración de la cuenca. Consecuentemente, la lluvia neta también debe presentar tales características y la tasa de infiltración debe ser constante.

***Tabla 2: Coeficientes de escorrentías C de las superficies consideradas.***

| Tipo de superficie (Figura 4)                       | Área (m <sup>2</sup> ) | Coef. de escorrentía   | (C x A)     |
|-----------------------------------------------------|------------------------|------------------------|-------------|
| Techos de las viviendas                             | 960                    | 0.95                   | 912         |
| Terreno libre de viviendas                          | 3132                   | 0.30                   | 939.60      |
| Cubiertas verdes                                    | 240                    | 0.60                   | 144         |
| Senda peatonal pública semipermeable, pend. mínima. | 126                    | 0.35                   | 44.10       |
| Espacio verde en veredas permeable, pend. mínima    | 482                    | 0.15                   | 72.30       |
| Calzada (mitad)                                     | 760.5                  | 0.95                   | 722         |
|                                                     | <b>5700.5</b>          | <b>Cponderado=0.50</b> | <b>2834</b> |

Curvas de intensidad-duración-tiempo de retorno de lluvias máximas de la localidad.

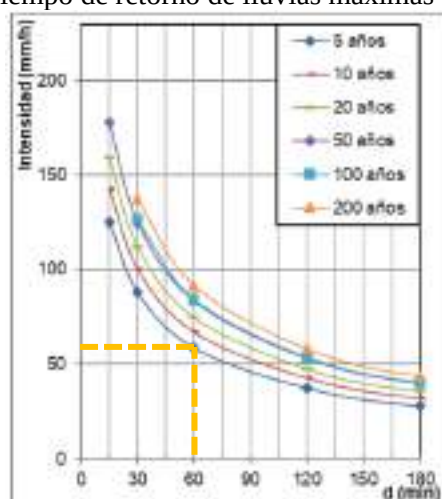


***Figura 10: Función i-d-t para San Miguel de Tucumán. (Bazzano 2019). Intensidad 60 (mm/h) para duración de la lluvia=60min., Tiempo de retorno=5años.***

$$Q = 0.278 CR \times I \times A \quad (1)$$

$$Q = 0.278 * 0.50 * 60 \text{ (mm/h)} * 0.0057 \text{ (km}^2\text{)}$$

$$Q = 0.047 \text{ (m}^3\text{/s)}$$

Considerando que el caudal se determina con el área y la velocidad (Ec. 2):

$$Q = A \times V \quad (2)$$

Donde A: Área de la sección y V: Velocidad del flujo

Para determinar el área de la cañería que se dispondrá en la zanja, consideramos una velocidad de 2 m/s (velocidad del agua en una tubería plástica, como PVC):  $V=2 \text{ m/s}$

$$A = 0.047 \left( \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right) / 2 \text{ m/s}$$

$$A = 0.0235 \text{ m}^2 \text{ (2 cañerías de } \varnothing 0.10\text{m)}$$

Se dispondrán 2 cañerías de diámetro 0.10m cada una, para transportar el caudal máximo estimado  $Q=0.047 \text{ (m}^3\text{/h)}$ . Este desagüe se repite en las manzanas del barrio, y conduce el agua hacia las fosas de infiltración (figura 11).

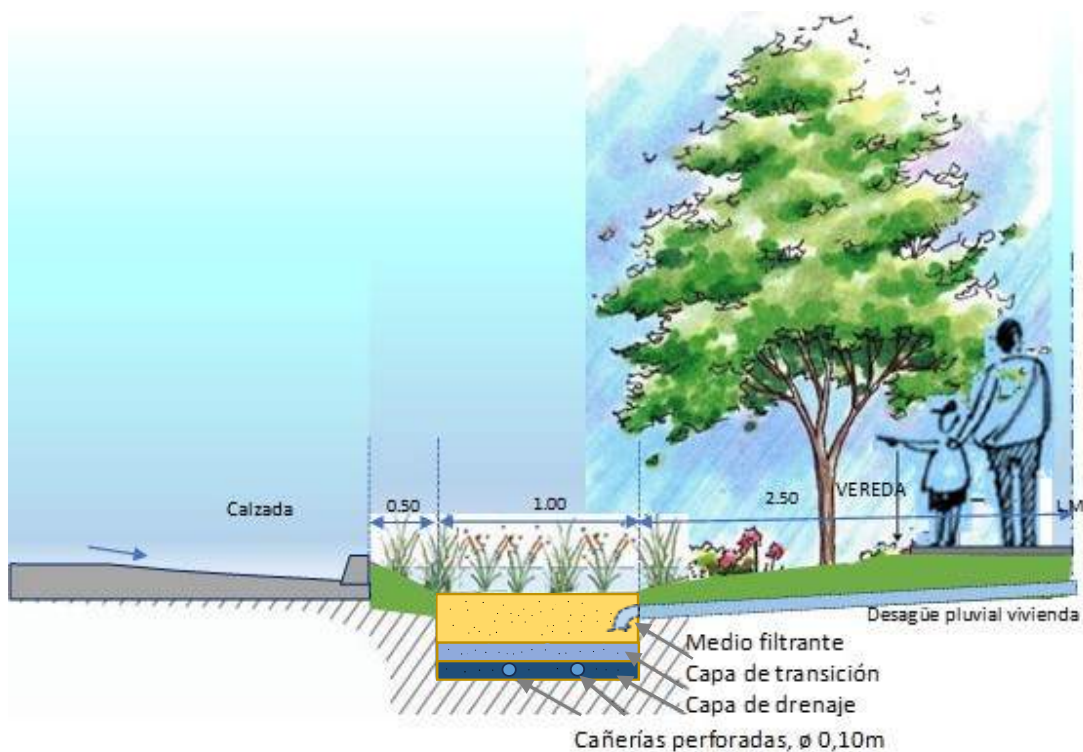


Figura 11: Corte con la zanja de biorretención y conductal. Fuente: elaboración propia.

### Pozos o fosas de infiltración.

Parte del caudal de agua captado por las zanjaz dispuestas en cada manzana es infiltrado y devuelto al suelo. Cada tramo de zanja conducirá el agua excedente hacia fosas subterráneas, instaladas en los espacios verdes del barrio, ubicados aguas abajo, en el borde o lado Este de las manzanas. Allí se descargará el flujo de agua, a través de un sistema de cañerías subterráneas. Este sistema permite la infiltración en los suelos circundantes y la recarga de acuíferos con agua en mejores condiciones. El tipo de suelo de la zona presenta permeabilidad entre buena y pobre, y equilibrio entre retención de agua, drenaje, fertilidad y aireación. Considerando que la infiltración puede ser una estrategia eficaz para la gestión de aguas pluviales de la zona, como así también el almacenamiento de agua, se propone un sistema de infiltración tipo fosa, rellena de grava. Este sistema permite un pretratamiento de las aguas para evitar la obstrucción de los suelos circundantes y para proteger la calidad de las aguas subterráneas del lugar. La implementación resulta en una reducción del volumen de escorrentía y de los caudales máximos de las zonas impermeables (figuras 12 y 13).





Figura 12: Sistema de infiltración tipo fosa de absorción rellena de grava. Fuente: Manual Procedimientos de Ingeniería del WSUD para Aguas Pluviales, Melbourne Water y CSIRO-2005.



Figura 13: Plano del Barrio con el sistema de zanjas de biorretención, conductuales y fosas de infiltración. Fuente: elaboración propia.

### Arbolado urbano, complemento del sistema de drenajes SUDS.

En las zanjas de biorretención, la vegetación mejora la función del medio filtrante al prevenir la erosión del mismo y facilitando la descomponiendo del suelo a través del crecimiento de las plantas, evitando así la obstrucción del sistema. Además, proporciona biopelículas en las raíces de las plantas donde los contaminantes pueden absorberse. El medio filtrante debe equilibrar la conductividad hidráulica (el paso del agua) con la retención, también con la provisión de un medio de cultivo adecuado (con suficiente humedad y contenido orgánico), para el crecimiento de la vegetación. El suelo franco limoso del piedemonte, con el agregado de arena, cumple con estas condiciones y es adecuado para el crecimiento de la vegetación.

Para el arbolado urbano, se propone el uso de especies arbóreas originarias de la región, ya que presentan beneficios: favorecen la biodiversidad ofreciendo alimento y refugio a innumerable cantidad de especies de aves e insectos; tienen valor estético por su floración y follaje; cumplen funciones ambientales, moderan temperaturas y vientos; retardan el escurrimiento superficial; oxigenan el aire reteniendo carbono, retienen polvo atmosférico y amortiguan la contaminación sonora y visual; son de fácil cultivo, adaptados al clima local y resisten plagas y enfermedades (Ochoa de la Torre, 1999). Se proponen

árboles que presentan un crecimiento compatible con ancho de calles, un comportamiento previsible de raíces, y responden a la necesidad de confort térmico de un clima subtropical húmedo.

En las veredas orientadas al norte se recomiendan crespón (*Lagerstroemia indica*), lapachillo (*Handroanthus chrysotrichus*) y pata de vaca (*Bauhinia variegata*), estas especies son caducifolias, lo que permite dar sombra densa durante el verano y deja pasar el sol en invierno cuando pierden el follaje, favoreciendo el calentamiento natural de las fachadas. En veredas con orientación sur, donde el objetivo es atenuar los vientos fríos sin oscurecer en exceso, se pueden combinar especies perennes y caducifolias. Por ello se proponen las mismas especies anteriormente mencionadas, pero se agrega el paraíso (*Melia azedarach* f. *Umbraculifera*), de follaje perenne, funcionando muy bien para las dimensiones de vereda y calzada. Es importante combinar especies para una buena cobertura y atraer fauna nativa (Grau y Kortsarz, 2017).

## CONCLUSIONES

Ante el escenario de cambio climático y frente a los episodios de lluvias que se registran actualmente en nuestra provincia, es necesaria la gestión sustentable de aguas pluviales en contextos urbanos locales. Dadas las características del sistema propuesto, es importante considerar la participación de los vecinos, tanto en la etapa de ejecución como de mantenimiento. Estas actividades, además de brindar una solución sustentable, ayudan a tomar un rol activo ante los problemas ambientales y fortalecen los vínculos sociales de la comunidad barrial.

En los relevamientos se pudo observar la inadecuada gestión del agua de lluvia en el barrio, con la presencia permanente de agua en las calles y en los espacios verdes, el anegamiento de calles durante las tormentas estivales y la obra inconclusa de una laguna de laminación planteada en el proyecto original. En consonancia con lo observado, los vecinos señalaron el impacto negativo que estos problemas tienen en la calidad de vida en el barrio. Como posible solución, se ha propuesto un SUDS, con el fin de reducir el caudal de agua que escurre al actual sistema urbano de desagüe, disminuir y ralentizar la escorrentía hacia los barrios que se ubican aguas abajo. La incorporación de superficie permeable en las veredas y en las cubiertas de las viviendas, logra disminuir un 50% la escorrentía de agua de lluvia en el barrio, y se logra incorporar 6500m<sup>2</sup> de superficie permeable, con un incremento del 65% de superficie verde en el espacio público, frente a cada vivienda. El caudal total estimado para una tormenta característica, puede ser gestionado a través de las zanjas de biorretención y conductales, lo que resulta en una reducción del 50% en el volumen de inundación.

Las estrategias propuestas propician la integración de la naturaleza y la biodiversidad en el barrio. Si bien en la fase de diseño es difícil medir el nivel futuro de biodiversidad ya que depende de factores como el mantenimiento y el proceso gradual, natural de los ecosistemas, hay algunos factores que apoyan el desarrollo de la biodiversidad. La heterogeneidad del hábitat que se crea a través de los componentes abióticos y bióticos del sistema, está asociada con un alto grado de diversidad biológica y puede utilizarse como un indicador de la biodiversidad en la fase de diseño. Las condiciones para la biodiversidad se crean a través de la vegetación y la microbiología de los suelos, de esta manera, el diseño implementado, posteriormente proporciona una plataforma para la diversidad de aves, insectos y especies vegetales. Otro aporte importante se relaciona con las soluciones innovadoras de infraestructura verde que ayudan a crear una identidad, además, el verde urbano aporta importantes servicios de regulación del microclima, la provisión de hábitat y el control de la contaminación.

Es importante señalar la necesidad de incorporar el SUDS en las normativas, tanto municipales como del IPVU, para ser integrado en el diseño del espacio urbano. Su implementación constituye una estrategia de prevención primaria que permitirá mejorar la gestión del agua pluvial, almacenar y asegurar la disponibilidad de agua para la vegetación y mejorar la biodiversidad a través de procesos ecológicos. A su vez, la cantidad y variedad de vegetación mejoran la evaporación y la infiltración, lo que posteriormente afecta positivamente la calidad del agua que recarga los acuíferos de la zona. El aumento de la biodiversidad impacta positivamente en la sustentabilidad, en la calidad paisajística del lugar, y en el micro clima; aspectos importantes para mejorar la calidad de vida de los vecinos.

Para futuros estudios se plantea la necesidad de profundizar el diseño adaptable al proceso hidrológico en los espacios verdes urbanos con el fin de crear su adecuación para diferentes situaciones de lluvia, como así también durante las posibles temporadas secas.

## REFERENCIAS

- Adler, F. (2014). El futuro del agua en Tucumán. 1ª Ed. Yerba Buena. El Autor. Pp 30-43 <https://problemasdelagua.com.ar/el-futuro-del-agua-en-tucuman/>
- Área de Gobierno de Medio Ambiente y Movilidad. Ayuntamiento de Madrid. Dirección General de Gestión del Agua y Zonas Verdes. (2018) “Guía Básica de Diseño de Sistemas de Gestión Sostenible de Aguas Pluviales en Zonas Verdes y otros Espacios Públicos”. Portal Web del Ayuntamiento de Madrid. <https://www.madrid.es/portales/munimadrid/es/Inicio/Medio-ambiente/Agua/SUDS-sistemas-urbanos-de-drenaje-sostenible/> [consulta: 23 de mayo de 2025]
- Bazzano F. (2019). Predicción de lluvias máximas para diseño hidrológico. Desarrollo experimental en la Provincia de Tucumán. [Tesis de Doctorado. Universidad Nacional de Tucumán]. <https://www.facet.unt.edu.ar/posgrado/wp-content/uploads/sites/54/2020/10/BAZZANO-Flavia.pdf>
- Berland, A., Shiflett, S., Shuster, W., Garmestani, A., Goddard, H., Herrmann, D. y Hopton, M. (2017). El papel de los árboles en la gestión de aguas pluviales urbanas. *Paisaje y Planificación Urbana*, vol. 162, pp. 167–177. Accesible en <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.02.017>.
- Brito, C. (2025) En un día, Tucumán registró las lluvias previstas para todo el mes de marzo. *TD Tucumán Digital*. Recuperado de: <https://tucumandigital.com.ar/2025/03/08/tucuman-inundacion-tormentas/> [consulta: 8 de marzo de 2025]
- Brown, R.; Keath, N.; Wong, H. (2009). Gestión del agua urbana en las ciudades: regímenes históricos, actuales y futuros. *Cc. y tecnología del agua* 59. Pp.847–855. <https://doi.org/10.2166/wst.2009.029>
- Cisterna, M.; Márquez Vega, G.; Atencia Gualda, S.; Villa, C.; Garbero, L.; Martínez, F. (2024) Espacio público y calidad de vida en un barrio de Yerba Buena, Tucumán. Evaluación cuali-cuantitativa. *Revista de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente AVERMA*. Vol. 28. Pp. 93-104. <https://asades.org.ar/wp-content/uploads/2025/04/AVERMA-2024-.pdf>
- Código de Ordenamiento Urbano de Yerba Buena (COU), ordenanza 613/94. (2008). Municipalidad de Yerba Buena. Secretaria de obras públicas y dirección de planeamiento. [https://www.catonline.org.ar/documentos/descargas/176/CODIGO\\_DE\\_ORDENAMIENTO\\_URBANO\\_DE\\_YERBA\\_BUENA.pdf](https://www.catonline.org.ar/documentos/descargas/176/CODIGO_DE_ORDENAMIENTO_URBANO_DE_YERBA_BUENA.pdf)
- Coutts, A., Tapper, N., Beringer, J., Loughnan, M. y Demuzere, M. (2013). Riego de nuestras ciudades: La capacidad del diseño urbano sensible al agua para favorecer la refrigeración urbana y mejorar el confort térmico humano en el contexto australiano. *Progreso en Geografía Física: Tierra y Medio Ambiente*, vol. 37, pp. 2–28. <http://dx.doi.org/10.1177/0309133312461032>
- Frantzeskaki, N., McPhearson, T., Collier, M., Kendal, D., Bulkeley, H., Dumitru, A., Walsh, C., Noble, K., Ordóñez, C., Oke, C., Pintér, L. (2019). Soluciones basadas en la naturaleza para la adaptación al cambio climático urbano: vinculando la ciencia, la política y la práctica comunitaria para la toma de decisiones basada en la evidencia. *BioScience*, Vol. 69, N6, pp. 455–466. <https://doi.org/10.1093/biosci/biz042>
- Gann, G., McDonald, T., Walder, B., Aronson, J., Nelson, C., Jonson, J., Dixon, K. (2019). Principios y estándares internacionales para la práctica de la restauración ecológica. *Restaurador Ecológico* 27, pp. 1-46. [https://www.fs.usda.gov/rm/pubs\\_journals/2019/rmrs\\_2019\\_gann\\_g001.pdf](https://www.fs.usda.gov/rm/pubs_journals/2019/rmrs_2019_gann_g001.pdf)
- González Del Tánago, M. (1989). Hidrología de cuencas pequeñas. Fórmula racional. Unidad Docente de Hidráulica e Hidrología. Departamento de Ingeniería Forestal. E.T.S. de Ingenieros de Montes. Universidad Politécnica de Madrid. [https://moodle.upm.es/enabierto/pluginfile.php/847/mod\\_label/intro/Tema11.pdf](https://moodle.upm.es/enabierto/pluginfile.php/847/mod_label/intro/Tema11.pdf)
- Google Earth. (s.f.). [Av. J. Fanzolato y calle A. Tosco. Yerba Buena. Tucumán]. Recuperado de <https://www.google.com/maps/search/Avenica+Juan+L.+Fanzolato+Yerba+Buena.+Tucum%C3%A1n> [consulta: 22 de junio de 2025]
- Grau, A., Kortsarz, A. (ed.) (2012). Guía de Arbolado de Tucumán. Universidad Nacional de Tucumán.
- Hoang, L.; Fenner, R. A. (2015). System interactions of stormwater management using sustainable urban drainage systems and green infrastructure. *Urban Water Journal*, 13, 739–758. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2015.1036083> <https://doi.org/10.2166/wst.2009.029>

- Lazarte Sfer, R. y Roger Paz, H. (2012) Variabilidad de extremos de precipitación puntual por efectos orográficos en el Gran S. M. de Tucumán. 1a ed. Editora. Editorial de la Universidad Nacional de Rosario, pag. 127 a 143.  
[https://www.fceia.unr.edu.ar/tallerpmaxima2011/III Taller Precipitaciones Maximas 2011 DH CURIHAM FCEIA CD.pdf](https://www.fceia.unr.edu.ar/tallerpmaxima2011/III_Taller_Precipitaciones_Maximas_2011_DH_CURIHAM_FCEIA_CD.pdf)
- Mak, C.; Scholz, M.; James, P. (2017) Sustainable drainage system site assessment method using urban ecosystem services. *Urban Ecosyst* 20, 293–307. <http://dx.doi.org/10.1007/s11252-016-0593-6>
- Manual Procedimientos de Ingeniería del WSUD para Aguas Pluviales, Melbourne Water y CSIRO-2005. C753 SuDS Manual. Recuperado de:  
<https://www.stonnington.vic.gov.au/files/assets/public/planning-and-building/planning/strategic-planning/planning-scheme-background-documents/background-docs/wsud-engineering-procedures-stormwater-melbourne-water-and-csiro-2005-part-1.pdf>
- Mapa Topográfico [En Línea]. *Mapa topográfico Tucumán, altitud, relieve*. Mapa Interactivo. <https://es-ar.topographic-map.com>
- McPhearson, T., Cook, E. M., Berbés-Blázquez, M., Cheng, C., Grimm, N. B., Andersson, E., Barbosa, O., Chandler, D. G., Chang, H., Chester, M. V., Childers, D. L., Elser, S. R., Frantzeskaki, N., Grabowski, Z., Groffman, P., Hale, R. L., Iwaniec, D. M., Kabisch, N., Kennedy, C., Troxler, T. (2022). Un marco de sistemas socioecológicos y tecnológicos para los servicios ecosistémicos urbanos. *One Earth*, 5 (5), 505-518. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2022.04.007>
- Municipalidad de Yerba Buena. (2019). Mapa de riesgo hídrico de Tucumán [Mapa]. 1:30.000. Yerba Buena. Municipalidad. Dirección de Planeamiento Urbano. [https://www.yerbabuena.gob.ar/wp-content/uploads/2024/05/mapa\\_riesgo\\_hidrico.pdf](https://www.yerbabuena.gob.ar/wp-content/uploads/2024/05/mapa_riesgo_hidrico.pdf)
- Ochoa de la Torre, J. M. (1999). “La vegetación como instrumento para el control microclimático”. [Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya]. <https://upcommons.upc.edu/server/api/core/bitstreams/07150fff-15d2-429b-9620-a01b8363106d/content>
- Plan Nacional de Viviendas (2019). Estándares mínimos de calidad para viviendas de interés social (Revisión 2019). Sec. de Vivienda. Ministerio del Interior, Obras Públicas y Vivienda. Presidencia de la Nación. <https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/if-2019-72275570-apn-dnasyfmi.pdf>
- Puchulu, M. y Fernández, D. (2014). Características y Distribución Espacial de los Suelos de la Provincia de Tucumán. Geología de Tucumán 2014. Colegio de Graduados en Ciencias Geológicas de Tucumán.
- Sabokrouhiyeh, N., Bottacin-Busolin, A., Tregnaghi, M., Nepf, H. y Marion, A. (2020). Variación en la eficiencia de remoción de contaminantes en humedales superficiales de agua libre con densidad de vegetación heterogénea. *Ingeniería Ecológica*, vol. 143, pp. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.105662>.

## **URBAN SPACES PLANNING FOR SUSTAINABLE RAINWATER MANAGEMENT.**

### **Case study: “126-HOUSING NEIGHBORHOOD” IN YERBA BUENA, TUCUMÁN.**

**ABSTRACT:** In an increasingly urbanized global context, there is an urgent need to develop conceptual frameworks and empirical knowledge on the built environment for its sustainable adaptation to the ecosystem. Design strategies are presented to address the problems identified in the 126 Viviendas neighborhood, chosen as a case study. Built by the Provincial Institute of Housing and Urban Development (IPVDU-Tucumán), it is located in the municipality of Yerba Buena, near San Javier Hill, an area characterized by urban growth marked by infrastructure and road projects that have altered ecosystems and the natural landscape. Surveys, interviews, and analysis of planimetric documents identified problems related to inadequate stormwater management, a source of flooding in the neighborhood and its surroundings. Design strategies are proposed, taking into account the foothill ecosystems and integrating the neighborhood's green spaces, trees, walkways, roads, and sidewalks into a sustainable urban drainage system (SUDS). This proposal is considered an appropriate solution, offering significant benefits for the community and the environment. It is recommended that it be incorporated as a primary prevention strategy in municipal and IPVDU regulations.

**Keywords:** sustainable urban drainage, green infrastructure, design strategies.



## ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA TÉRMICA EN CONSTRUCCIONES LIVIANAS: BASES METODOLÓGICAS PARA UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA

**María Laura Iezzi<sup>1</sup>, María Victoria Mercado<sup>1, 2</sup>, Julieta Balter<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE), Av. Ruiz Leal s/n - Parque Gral. San Martín, CP 5500 - CONICET Mendoza, Argentina

<sup>2</sup>Facultad de Ingeniería (FING), Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza, Argentina  
Tel. 02614168548 E-mail: mliezzi@mendoza-conicet.gob.ar

**RESUMEN:** Este trabajo presenta la metodología diseñada para una revisión sistemática sobre la incorporación de almacenamiento de energía térmica en edificios de construcción liviana, vinculación importante para el ahorro energético en edificios ubicados en climas áridos continentales y caracterizados por una alta amplitud térmica. La estrategia de búsqueda se desarrolló en las plataformas ScienceDirect y Google Scholar, cubriendo un periodo del 2001 al primer trimestre del 2025. Se identificaron 8535 publicaciones sobre Almacenamiento de Energía Térmica en construcciones en general, de las cuales 227 tratan sobre construcciones livianas, representando éstas últimas sólo el 2,7% del total. Se diseñó una tabla con formato de matriz binaria en la que se incorporaron 23 variables con las cuales se analizó cada artículo. Sólo 51 artículos mostraron una aplicación directa a los sistemas constructivos livianos. Estos resultados evidencian la oportunidad de enfocarse en esta temática para futuras investigaciones.

**Palabras clave:** Almacenamiento de energía térmica, sistemas constructivos livianos, masa térmica.

### INTRODUCCIÓN

La Agencia Internacional de Energía ha proyectado un incremento del 75% en la superficie cubierta entre los años 2020 y 2050 (IEA, 2022). Considerando que a nivel mundial el sector de edificios consume cerca del 40% de la energía primaria y producen el 30% de las emisiones de gases de efecto invernadero, resulta urgente la necesidad de una transformación en las formas de construir y habitar.

A nivel nacional, el informe “Tercera Comunicación Nacional del Gobierno de la República Argentina a las Partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático” (2015), indica que las regiones de máximo calentamiento serían la del Centro-Oeste y Nor-Oeste, intensificado por la desertificación (IPCC, 2019). Para climas áridos continentales, caracterizados por importantes amplitudes térmicas diarias y estacionales (como la región de Cuyo), resulta necesario el uso de materiales con alta densidad a través de la cual se puede almacenar energía térmica (Meir y Roaf, 2002; Renato et al, 2008; Esteves 2017). Esto permite estabilizar las temperaturas interiores, mejorar el confort y reducir el consumo energético (Serra y Coch, 2005; Reilly y Kinnane, 2017).

En los últimos 5 años, se ha popularizado el uso de materiales de construcción del tipo industrializados, prefabricados, o sistemas constructivos livianos, promocionados por su rapidez, eficiencia energética y sustentabilidad (Manini, 2022). Particularmente, en la región de Cuyo, se ha observado el reemplazo de los materiales másicos tradicionales por este tipo de sistemas constructivos, de poca densidad y pocos espesores, lo que reduce la capacidad de almacenamiento térmico. Si bien los resultados en estudios de espacios interiores con metodologías de balance estacionario se consideran positivos en cuanto a conservación energética; aquellos con metodologías de monitoreo in-situ y balances dinámicos evidencian una disminución en el confort térmico interior y un aumento en el consumo energético de los edificios (Filippin et al, 2007; Mercado et al, 2010, 2018). En un estudio de prototipos de viviendas



de índole social construidos con sistemas livianos, se realizó el etiquetado de eficiencia energética según el programa de etiquetado de viviendas de la República Argentina (PRONEV, 2018). El resultado de éste fue que la estrategia que logró elevar una letra de la etiqueta (de una E a una D), fue la inclusión de masa térmica. (Ganem y Mercado, 2020).

En este contexto, la rápida expansión de sistemas constructivos livianos en regiones tradicionalmente edificadas con materiales mäsicos plantea interrogantes sobre su capacidad para garantizar confort térmico y eficiencia energética. Se ha demostrado que el Almacenamiento de Energía Térmica (AET) es una estrategia efectiva en climas áridos continentales, en cambio, la evidencia científica sobre los beneficios de utilizar construcciones livianas en estos climas es escasa y dispersa. Esta situación refleja la necesidad de un relevamiento sistemático y actualizado que permita identificar patrones, vacíos y oportunidades de investigación, sirviendo como base para orientar el desarrollo de soluciones constructivas adaptadas a estos entornos.

A partir de lo expuesto, se plantea el objetivo del presente trabajo, diseñar y sistematizar de una metodología para la revisión del estado del arte sobre la incorporación del AET en edificios de construcción liviana, con énfasis en la caracterización de la envolvente y su impacto en el acondicionamiento térmico.

## METODOLOGÍA

La propuesta metodológica contempla criterios de búsqueda, selección y análisis de literatura científica, con el fin de identificar patrones, vacíos de conocimiento y tendencias en estudios que abordan estas intersecciones. Esto llevó al diseño de una metodología basada en 2 etapas, siendo Etapa 1- Estrategia de Búsqueda y Etapa 2- Método de análisis.

A continuación, se presentan las etapas y su desarrollo.

### ***Etapla 1: Estrategia de búsqueda***

Se realizaron 2 tipos de búsquedas. La Figura 1 ilustra los procesos de búsqueda y análisis.

Búsqueda Tipo 1: sirvió como aproximación a los dos temas principales de la investigación troncal, -el AET y su inclusión en edificios de construcción liviana-, se ejecutó en las plataformas Google Scholar y ScienceDirect. La primera plataforma se seleccionó por tratarse de una plataforma que brinda un panorama global de las producciones académicas, la segunda por contener publicaciones indexadas en revistas reconocidas a nivel mundial, su rigor científico y sus estudios actuales. Se utilizaron las siguientes palabras clave relacionadas al estudio: *“Thermal mass”*, *“Thermal energy storage in lightweight buildings”*, *“Lightweight construction”*, *“Building envelope thermal inertia”*, *“Energy storage materials in buildings”*, *“Building envelope and PCM”*, *“thermal comfort in hot continental climates”*, *“energy storage materials in buildings”*.

Este primer acercamiento brindó el marco de referencia para la investigación general y sirvió de base para la formulación de los prompts<sup>1</sup> utilizados en la Etapa 2- Método de análisis.

Búsqueda tipo 2: siguiendo las recomendaciones de Baker (2016) y Siddaway et al. (2019), se llevó a cabo una búsqueda sistemática que incorpora la amplitud y profundidad apropiadas para el abordaje de los temas. Para esto se utilizó específicamente la plataforma ScienceDirect. El periodo temporal considerado abarcó desde 2001 al primer trimestre de 2025, tomando 2001 como año inicial ya que a partir de allí inició la documentación del tema específico en la plataforma. Se diferencian 2 fases dentro de esta búsqueda, para las cuales se utilizó el operador booleano OR para optimizar los resultados relevantes.

---

<sup>1</sup> Un prompt es una instrucción o pregunta textual que se le da a una inteligencia artificial (IA) generativa para que produzca un resultado o realice una tarea específica. (www.google.com)

Fase 1: Se emplearon como términos que aparecieran en todo el artículo las palabras BUILDINGS OR CONSTRUCTIONS. Paralelamente, se restringió la búsqueda a los documentos que incluyan la frase exacta “THERMAL ENERGY STORAGE” en título, resumen, o palabras clave dadas por el autor. El propósito de esta fase fue identificar literatura que vincula AET con edificaciones en general y contabilizar por año.

Fase 2: En esta instancia, se utilizaron las frases exactas “LIGHTWEIGHT BUILDINGS” OR “LIGHTWEIGHT CONSTRUCTIONS” como términos generales, manteniendo el criterio de la frase “THERMAL ENERGY STORAGE” para título, resumen, o palabras clave dadas por el autor. Esta fase tuvo como objetivo cuantificar literatura de AET relacionada a construcciones livianas y a su vez, estimar su proporción en relación con la fase anterior. Los artículos de esta fase son los que posteriormente se analizaron. Como criterio de corte se seleccionaron únicamente los artículos que aportaron datos originales, incluyendo simulaciones, ensayos en laboratorio y monitoreo de edificios construidos. En cambio, se excluyeron revisiones generales, capítulos de libros, y otros documentos sin resultados propios.

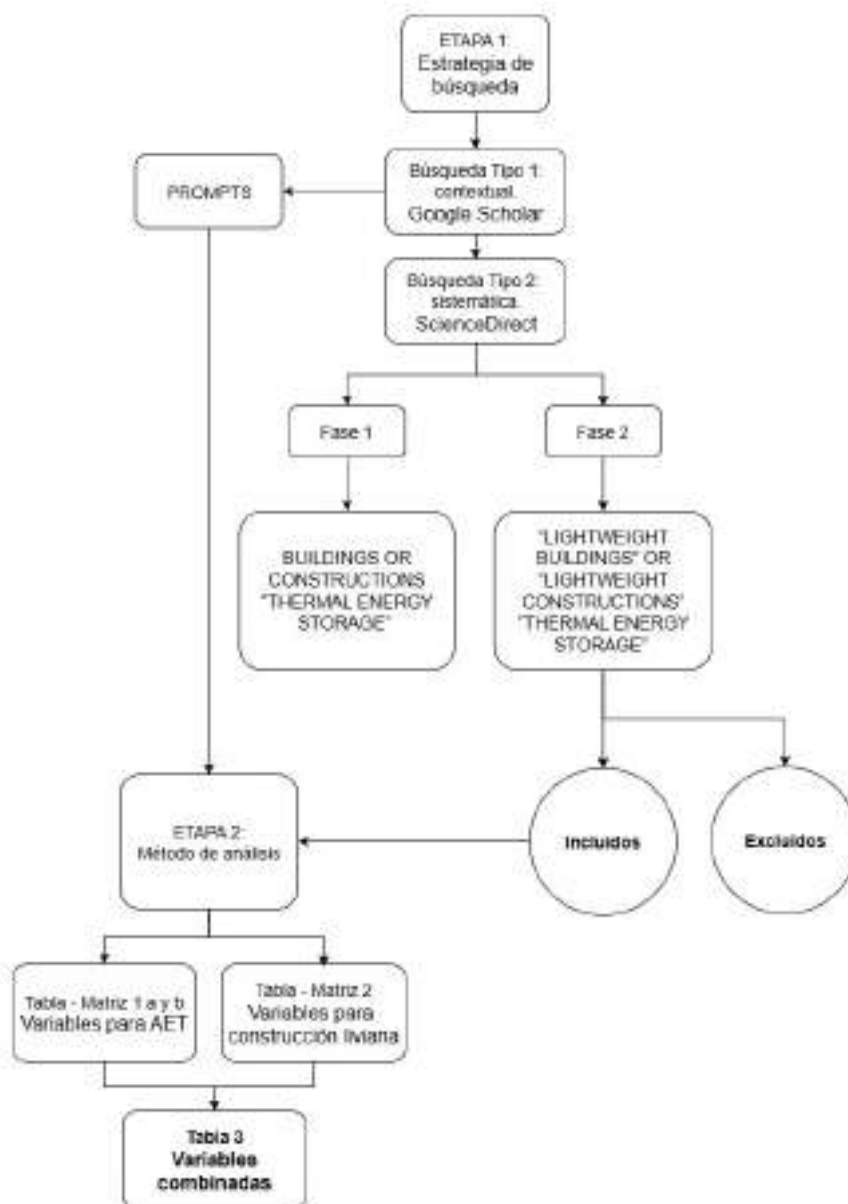


Figura 1: estrategia metodológica

## ***Etapa 2: Método de análisis***

Posteriormente, con los artículos incluidos, se procedió a realizar un análisis individual, para el cual, se empleó la herramienta NotebookML. Esta es una aplicación basada en inteligencia artificial para el procesamiento automatizado de textos académicos. Se especificó el análisis sólo al contenido del documento cargado, sin aportar información externa al mismo, lo que garantizó que los resultados se basen exclusivamente en el material original del artículo. Para evitar sesgos o cruces de información, cada artículo fue cargado y analizado de manera individual.

Los prompts utilizados fueron elaborados a partir de pruebas previas, con el fin de optimizar la identificación de los ítems a estudiar en cada documento. En el caso de que la herramienta arrojará resultados ambiguos, contradictorios o poco concluyentes, se procedió a reformular o realizar más preguntas para alcanzar mayor claridad, como lo señala la Guía para el uso de IA generativa en educación e investigación de la UNESCO (2024). Esta estrategia permitió la sistematización rigurosa del contenido para extraer la información relevante para su posterior análisis y clasificación. Las respuestas obtenidas fueron revisadas y tabuladas mediante registro binario (si / no). La validación final de cada caso se realizó a través de evaluación humana. A continuación, se enumeran los 23 prompts iniciales.

- 1 - Relación con construcción liviana: ¿El documento habla de mejoras directas o indirectas?
- 2 - Evaluación energética: ¿Se analizan costos eléctricos, emisiones de CO<sub>2</sub>, consumo total, cargas energéticas, energía operativa o energía incorporada?
- 3 - Comportamiento térmico: ¿Se evalúa la respuesta interior o de la envolvente ante variaciones de temperatura?
- 4 - Propiedades de materiales: ¿Se analizan propiedades que inciden en AET y en variaciones térmicas?
- 5 - Almacenamiento por calor sensible: ¿Evalúa capacidad de almacenamiento térmico en materiales sin cambio de fase, usando propiedades como calor específico o conductividad?
- 6 - Almacenamiento por calor latente: ¿Se consideran materiales de cambio de fase (PCM)?
- 7 - Simulación: ¿Se realiza modelado computacional para análisis de comportamiento térmico?
- 8 - Monitoreo: ¿Se miden variables en edificios existentes para evaluar desempeño térmico de la envolvente?
- 9 - Análisis experimental: ¿Se construyen prototipos para ensayos controlados en laboratorio?
- 10 - Caracterización física de muestra: ¿Se ensayan prototipos para propiedades físicas?
- 11 - Necesidad de enfriamiento y calefacción: ¿Se estudia una necesidad para clima local, en condiciones constantes o ambas necesidades?
- 12 - Sistemas pasivos adicionales: ¿Se incluyen estrategias bioclimáticas pasivas que refuerzan el AET para favorecerlo?
- 13 - Sistemas activos: ¿Se incorporan equipos mecánicos de acondicionamiento térmico?
- 14 - Integración con renovables: ¿Se combinan sistemas activos/pasivos con energías renovables?
- 15 - Aislamiento térmico: ¿Se analiza su efecto sobre el AET o temperatura interior?
- 16 - Masa térmica adicional: ¿Se evalúa masa térmica de componentes distintos al PCM?
- 17 - Ubicación del AET: ¿Se especifica su ubicación, en relación con otras variables o la envolvente?
- 18 - Estructura: ¿Se estudia el AET en materiales con destino estructural?
- 19 - Forma: ¿Se analiza geometría del contenedor de PCM, o la forma del edificio y como afecta al AET?
- 20 - Tipología edilicia: ¿Se considera la función del edificio?
- 21 - Espesor: ¿Se evalúa y varía el espesor del elemento de AET?
- 22 - Envolvente: ¿Se analiza materialidad y ubicación del AET en la envolvente?
- 23 - Tomando el concepto de sistemas independientes que están formados por componentes tecnológicos autónomos y neutros, compatibles con múltiples entornos, con autonomía estructural, de transporte y de manejo, sin necesidad de acabados ni mantenimiento complejo (Salas, 2012) ¿Se incluyen en la envolvente?

### ***Sistematización de la matriz binaria de variables***

Los resultados del análisis de cada artículo se sistematizaron por medio de tablas tipo matriz. La Tabla - Matriz 1 (1a y 1b) se elaboró para analizar los aspectos relacionados con AET. Las características de

edificios de construcción liviana se estudiaron en la Tabla - Matriz 2. Ésta matriz se realiza con valores binarios, en base a las respuestas de la IA. A cada celda se le asigna 1 si el artículo aborda el ítem correspondiente y 0 si no lo hace.

### **Análisis de variables combinadas**

Como segunda tarea de análisis, se realizó una tabla de contingencia (Tabla 3) basada en las matrices binarias anteriores. Las variables se distribuyen en columnas para los ítems tratados en edificios de construcción liviana, y filas para los estudiados sobre AET. Los valores obtenidos contabilizan la cantidad de artículos que analizan dos variables a la vez. A partir de esa combinación, se calcularon, porcentajes respecto del total de artículos analizados. Este análisis permite identificar la frecuencia con la que son estudiadas distintas variables de manera conjunta, dentro de las dos categorías principales.

## **RESULTADOS**

Los resultados obtenidos para la búsqueda orientada al AET en construcciones en general en el período temporal tomado, muestran un interés cada vez más creciente en el tema del AET relacionada a construcciones en general a través del tiempo. Esto se puede ver en la Figura 2. También se observa que, si bien recientemente se ha incrementado el número de artículos que relacionan este tema con edificios livianos, no es preponderante en comparación a la totalidad de artículos que hablan sobre AET.

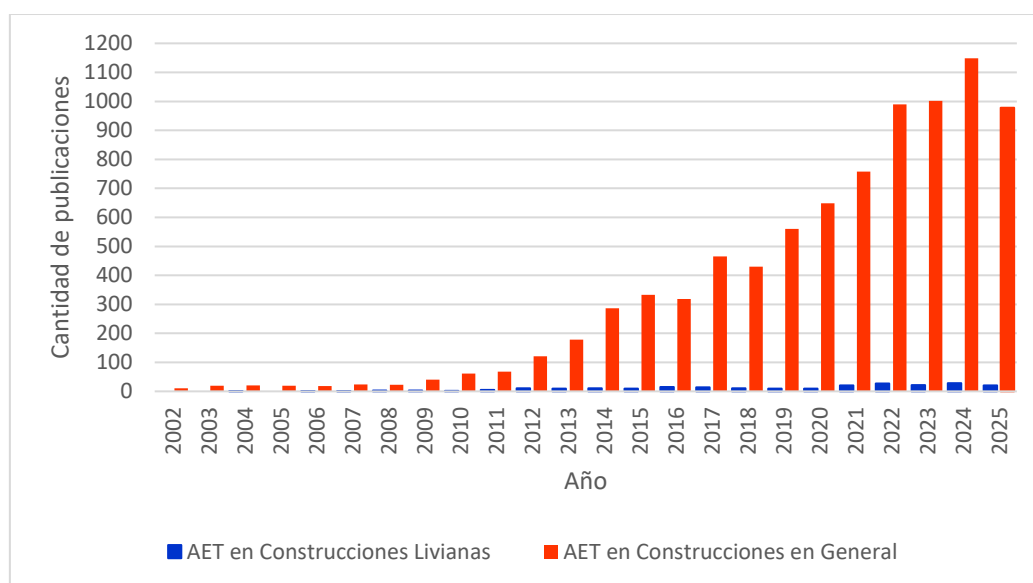


*Figura 2: Publicaciones de AET por año*

La búsqueda Tipo 2, ilustrada en la Figura 3, contó con un total de 8535 artículos. De los cuales, 2,7% (227 artículos) mencionan las palabras “LIGHTWEIGHT BUILDINGS” o “LIGHTWEIGHT CONSTRUCTIONS”. A continuación, se realizó el análisis individual de los 111 artículos clasificados como fuentes primarias. En base a la matriz binaria resultó que, un porcentaje de ellos no estaba directamente vinculado con construcciones livianas, a pesar de que algunos de ellos podrían tener una aplicación futura en dicho contexto. Estos artículos presentan distintas aplicaciones de PCM en edificios mäsicos, sobre elementos arquitectónicos como losas de hormigón o tabiques y en sistemas activos de control de temperatura. En construcciones livianas, los PCM se estudian en morteros, en los métodos de contención de PCM, y en fusiones de distintos materiales con PCM poco aplicados en construcciones livianas. A partir de esto, se llevó a cabo el agrupamiento de los documentos que estudian efectivamente el AET con la aplicación a construcciones livianas. Los resultados fueron que 51 artículos realmente analizan este tipo de sistema constructivo.

Se observa que la construcción liviana abarca una amplia variedad de temáticas vinculadas con: materiales, estructura, paneles, uniones y encastres, puentes térmicos, barreras, terminaciones, resistencia térmica, confort térmico e inercia térmica. Ésta última está dada por la masa térmica y la densidad, propiedades que no son inherentes de los materiales utilizados en este tipo de construcciones

ya que el objetivo principal es otorgar ligereza a todo el conjunto. En consecuencia, la construcción liviana y la masa térmica aparecen como conceptos en tensión, lo que reduce la cantidad de artículos donde abordan ambas temáticas. Los estudios que se enfocan en ambas partes son escasos, con un enfoque experimental hacia la capacidad de almacenamiento mediante calor latente.

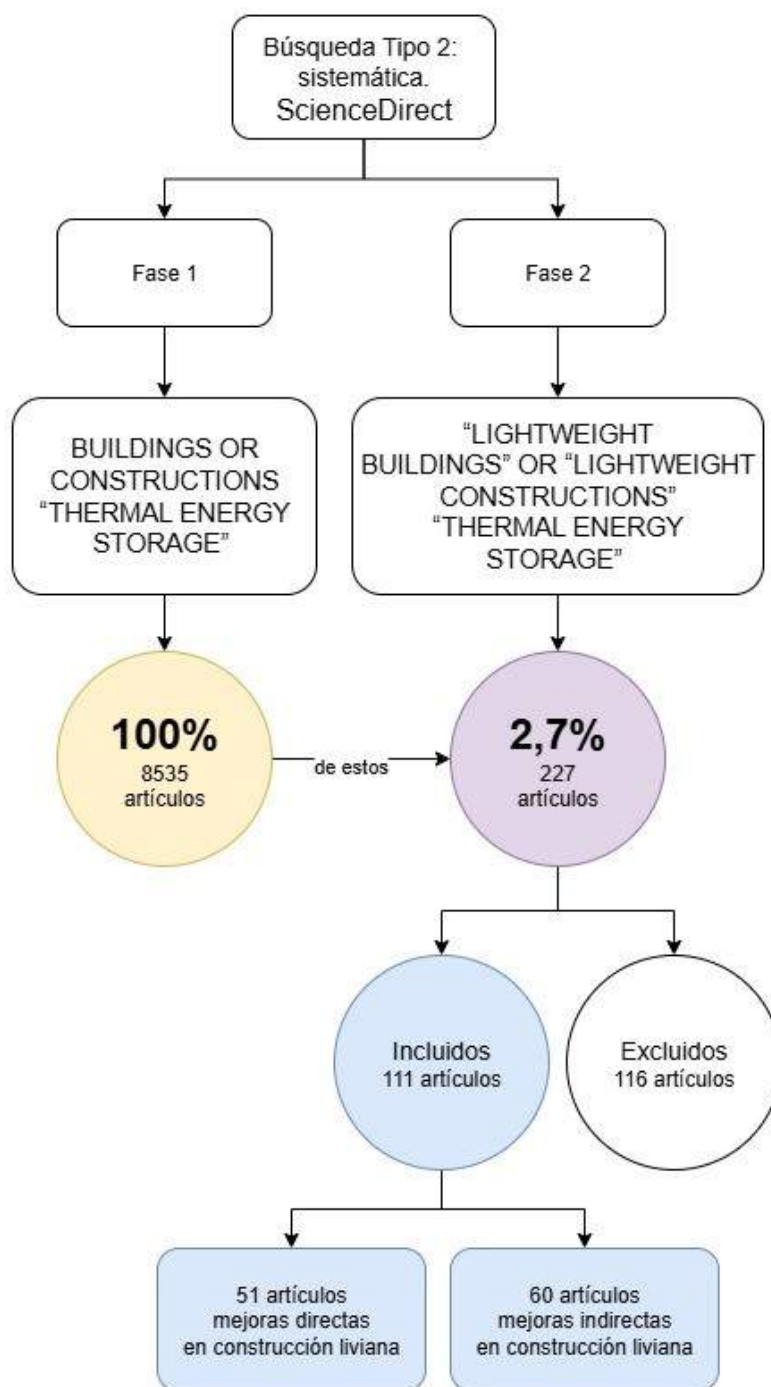


Figura 3: Resultados de búsqueda

A continuación, se presentan los resultados de las Tablas - Matriz 1a, 1b y 2 y su utilización para cada artículo individual a modo ilustrativo, ya que el análisis de los artículos excede los objetivos del presente documento. Los resultados contabilizan la cantidad de artículos que analizan cada variable de forma individual.



*Tabla-matriz 1a: variables para AET*

|                    | Almacenamiento de energía térmica         |                        |                          |                   |           |          |             |
|--------------------|-------------------------------------------|------------------------|--------------------------|-------------------|-----------|----------|-------------|
|                    | Evaluación térmica, energética y material |                        |                          | Método de estudio |           |          |             |
|                    | Evaluación energética                     | comportamiento térmico | Propiedades del material | simulación        | Monitoreo | Muestras | experimento |
| Artículo 1         | 0                                         | 1                      | 0                        | 1                 | 1         | 0        | 0           |
| Artículo 2         | 1                                         | 1                      | 1                        | 0                 | 0         | 1        | 1           |
| Artículo x         | 0                                         | 1                      | 1                        | 1                 | 0         | 0        | 1           |
| Total de artículos | 53                                        | 96                     | 65                       | 61                | 6         | 38       | 47          |

*Tabla-matriz 1b: variables para AET*

|                    | Almacenamiento de energía térmica |         |              |             |                      |         |            |
|--------------------|-----------------------------------|---------|--------------|-------------|----------------------|---------|------------|
|                    | Por calor                         |         | Necesidad    |             | Estrategia: sistemas |         |            |
|                    | sensible                          | latente | Enfriamiento | Calefacción | pasivos              | activos | renovables |
| Artículo 1         | 0                                 | 1       | 0            | 0           | 1                    | 0       | 0          |
| Artículo 2         | 0                                 | 1       | 1            | 1           | 0                    | 0       | 0          |
| Artículo x         | 1                                 | 1       | 0            | 1           | 0                    | 1       | 0          |
| Total de artículos | 39                                | 91      | 62           | 42          | 24                   | 51      | 8          |

*Tabla-matriz 2: variables para características de edificios de construcción liviana*

|                    | Edificios livianos         |              |            |         |              |           |       |                    |             |
|--------------------|----------------------------|--------------|------------|---------|--------------|-----------|-------|--------------------|-------------|
|                    | Configuración constructiva |              |            |         | Aplicación   |           |       |                    |             |
|                    | Aislación                  | Masa térmica | estructura | Espesor | Sist. indep. | Ubicación | Forma | Tipología edilicia | Tipología   |
| Artículo 1         | 0                          | 0            | 0          | 0       | 0            | 1         | 0     | 0                  | -           |
| Artículo 2         | 1                          | 0            | 1          | 1       | 0            | 1         | 0     | 0                  | -           |
| Artículo x         | 0                          | 0            | 0          | 0       | 0            | 1         | 0     | 1                  | residencial |
| Total de artículos | 51                         | 39           | 16         | 38      | 33           | 55        | 17    | 44                 | -           |

Los resultados de las Tablas 1a y 1b muestran que el estudio de AET en construcciones livianas aún se encuentra en etapa de consolidación metodológica. Esto se ve por la marcada preferencia por simulaciones frente a monitoreos en condiciones reales, lo que limita la validación experimental. El énfasis en el calor latente confirma la centralidad de los PCM como estrategia de almacenamiento, centrándose en la presencia de sistemas activos. Esto revela una falta de exploración en soluciones globales que integren estrategias bioclimáticas pasivas y sistemas renovables. En paralelo, la Tabla 2 revela que los estudios se concentran en la ubicación de los elementos de AET dentro del conjunto, y en la aislación, lo que evidencia la preocupación por la envolvente como mediadora del comportamiento térmico. El estudio de inclusión de AET en estructuras se ve limitada por la tensión inherente entre ligereza estructural y capacidad de inercia térmica. Finalmente, la mayoría de las aplicaciones se analiza desde tipologías edilicias específicas.

La Tabla 3 representa el porcentaje de artículos que relacionaron las variables analizadas de AET con las de edificios livianos. Es destacable señalar que los ítems con porcentajes altos son los temas más recurrentes de estudio, mientras que, por el contrario, los que obtuvieron porcentajes bajos son áreas de vacancia para investigación. Es importante aclarar que un mismo artículo puede estar repetido en varios cruces de variables.

Tabla 3: Porcentajes de artículos incluidos en las variables combinadas

|                   |                        | Edificios livianos         |              |            |         |              |           |       |                    |
|-------------------|------------------------|----------------------------|--------------|------------|---------|--------------|-----------|-------|--------------------|
|                   |                        | Configuración constructiva |              |            |         | Aplicación   |           |       |                    |
| AET               |                        | Aislación                  | Masa térmica | estructura | Espesor | Sist. Indep. | Ubicación | Forma | Tipología edilicia |
| Evaluación        | energética             | 19%                        | 16%          | 6%         | 15%     | 13%          | 21%       | 8%    | 24%                |
|                   | térmica                | 29%                        | 26%          | 9%         | 24%     | 20%          | 34%       | 12%   | 32%                |
|                   | Propiedades            | 12%                        | 12%          | 6%         | 13%     | 14%          | 17%       | 8%    | 14%                |
| Método de estudio | simulación             | 24%                        | 20%          | 5%         | 21%     | 13%          | 24%       | 9%    | 26%                |
|                   | monitoreo              | 2%                         | 3%           | 0%         | 0%      | 2%           | 2%        | 1%    | 4%                 |
|                   | Muestras               | 5%                         | 7%           | 6%         | 2%      | 6%           | 6%        | 2%    | 4%                 |
|                   | ensayos                | 7%                         | 9%           | 4%         | 8%      | 11%          | 14%       | 7%    | 11%                |
| calor             | sensible               | 13%                        | 21%          | 4%         | 13%     | 5%           | 13%       | 2%    | 13%                |
|                   | latente                | 23%                        | 19%          | 7%         | 20%     | 20%          | 30%       | 11%   | 26%                |
| Necesidad         | Enfriamiento           | 21%                        | 18%          | 4%         | 20%     | 14%          | 25%       | 10%   | 25%                |
|                   | Calefacción            | 16%                        | 13%          | 5%         | 13%     | 11%          | 17%       | 5%    | 19%                |
| sistemas          | pasivos                | 8%                         | 8%           | 1%         | 7%      | 6%           | 13%       | 5%    | 10%                |
|                   | activos                | 19%                        | 15%          | 5%         | 14%     | 13%          | 18%       | 8%    | 25%                |
|                   | integración renovables | 4%                         | 4%           | 2%         | 3%      | 3%           | 3%        | 1%    | 5%                 |

El cruce de variables de la Tabla 3 refuerza las tendencias detectadas, además de evidenciar vacíos de campo. En primer lugar, las evaluaciones térmicas aparecen en 53 artículos, siendo las centradas en la ubicación del elemento de AET (34%) y la aplicación en distintas tipologías edilicias (32%) las de mayor preponderancia. Por otro lado, la simulación es el método de estudio más utilizado ya que permite abarcar las múltiples variables, tipologías, configuraciones constructivas y aplicaciones. También se destaca la necesidad de enfriamiento investigada en relación a su ubicación en determinadas tipologías edilicias (25%) que prevalece sobre la de calefacción, reforzando la prioridad del estudio para mejorar los sistemas constructivos que tienden al sobrecalentamiento.

Paralelamente, esta tabla permite ver los vacíos en los estudios analizados. Se observa la falta de estudios en condiciones reales de uso a través de la monitorización, faltando principalmente en análisis de espesores de elementos y en estructuras (0%), lo que limita la validación de los modelos. Además, la integración con sistemas renovables y sistemas pasivos es marginal, marcando la ausencia de estrategias de descarbonización. La configuración constructiva y aplicación en porcentajes desiguales afirma la ausencia de una visión integradora de los sistemas constructivos livianos con la AET, aplicando las soluciones fragmentadas y añadidas y no como parte del sistema.

## CONCLUSIONES

El trabajo presentó una metodología sistemática, transparente y replicable para analizar el AET en construcciones livianas. La combinación de búsqueda exhaustiva, clasificación binaria de variables y validación con apoyo de IA permitió estructurar un procedimiento que puede ser transferido a otros campos de estudio.

Los resultados evidenciaron que el 2,7% de la producción científica sobre AET aborda la temática de construcciones livianas, pero sólo 51 estudios aplican específicamente el AET en edificios livianos, lo cual confirma la magnitud de la vacancia. El análisis individual de variables (Tablas 1a, 1b y 2) mostró una fuerte dependencia de simulaciones frente a la escasez de monitoreo en condiciones reales, un énfasis en el almacenamiento por calor latente mediante sistemas activos, y una menor exploración de estrategias pasivas y renovables. Asimismo, en construcciones livianas los estudios se concentran en la

ubicación de los elementos de AET y en la aislación, mientras que aspectos como la estructura y la forma arquitectónica aparecen relegados, y la mayoría de las aplicaciones se limitan a tipologías residenciales.

El análisis cruzado de variables (Tabla 3) confirmó estas tendencias y, al mismo tiempo, visibilizó vacíos críticos: la falta de estudios experimentales de campo que validen modelos, la limitada integración del AET con energías renovables y pasivas, y la ausencia de una visión integradora que articule el sistema constructivo en su conjunto más allá de soluciones fragmentadas.

De este contraste surgen líneas prioritarias de acción: (i) avanzar en investigaciones experimentales y de campo que validen modelos teóricos, (ii) fortalecer la integración del AET con sistemas pasivos y renovables, y (iii) enfocar los desarrollos en climas áridos continentales, donde la expansión de la construcción liviana plantea riesgos de sobrecalentamiento y pérdida de confort térmico.

En síntesis, el aporte de este trabajo radica en ofrecer un marco metodológico sólido y un diagnóstico inicial que orienta futuras investigaciones hacia la incorporación efectiva del AET en edificaciones livianas, con miras a mejorar su desempeño energético y ambiental.

## REFERENCIAS

- Baker J.D. (2016). The Purpose, Process, and Methods of Writing a Literature Review. *AORN Journal*. Vol. 103, pp. 265-269 <https://doi.org/10.1016/j.aorn.2016.01.016>
- Esteves A., Mercado M.V., Ganem C., Gelardi D. (2017). Positioning and Design recommendations for Materials of Efficient Thermal Storage Mass in Passive Buildings. *Architecture Research*, 7(2): 29-40. <http://article.sapub.org/10.5923.j.arch.20170702.01.html>
- Filippín, C., Flores Larsen, S., Flores, L. (2007). Comportamiento energético de verano de una vivienda másica y una liviana en la región central de Argentina. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. Vol. 11, 17-23.
- IEA (2021), Net Zero by 2050, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
- IPCC. (2019). Climate change and land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://www.ipcc.ch/srccl/>
- Manini M. (2022). Los Andes. La construcción no convencional se consolida en Mendoza. <https://www.losandes.com.ar/economia/construccion-no-convencional-por-que-el-sistema-gana-espacio-en-mendoza/>
- Meir, I. A., & Roaf, S. C. (2002). Thermal comfort–thermal mass: housing in hot dry climates. *Indoor Air*
- Mercado M.V., Barea G., Esteves A., Filippín C. (2018). “Efecto de la ventilación natural en el consumo energético de un edificio bioclimático. Análisis y estudio mediante energy plus”. *Revista Hábitat Sustentable* Vol. 8, N°. 1, pp. 54-67.
- Mercado M.V., Esteves A., Filippín C. (2010). Comportamiento térmico-energético de una vivienda social de la ciudad de Mendoza, Argentina. *Ambiente Construido, SciELO Brasil*. Vol 10, PP. 87-100. <https://doi.org/10.1590/S1678-86212010000200006>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación. (2015). Tercera Comunicación Nacional del Gobierno de la República Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Buenos Aires: Gobierno de la República Argentina. [https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/tercera\\_comunicacion\\_nacional\\_cambio\\_climatico.pdf](https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/tercera_comunicacion_nacional_cambio_climatico.pdf)
- Reilly; A., Kinnane, O. (2017). The impact of thermal mass on building energy consumption. *Applied Energy* 198, 108-121. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.04.024>
- Renato D’Alencon Castrillón, Felipe Kramm Toledo (2008). Acondicionamientos Arquitectura y técnica. Serie Arquitectura y Técnica Vol. 2. Ediciones ARQ. Escuela de Arquitectura. Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Salas J., Ferrero A., Lucas P. (2012). Utilización de componentes neutros de construcción en Latinoamérica. *Revista INVI* Vol. 27, pp. 147-175. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-83582012000300005>
- Serra F.R. y Coch Roura H. (2005). *Arquitectura y Energía Natural*. México: Alfaomega.

- Siddaway A.P, Wood A.M., Hedges L.V. (2019). How to Do a Systematic Review: A Best Practice Guide for Conducting and Reporting Narrative Reviews, Meta-Analyses, and Meta-Syntheses. Annual Review of Psychology. Vol. 70, pp. 747-770 <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-010418-102803>
- UNESCO. (2024). Guía para el uso de IA generativa en educación e investigación. Universidad Academia de Humanismo Cristiano. <https://www.academia.cl/wp-content/uploads/2024/10/Guia-para-el-uso-de-IA-generativa-en-educacion-e-investigacion.pdf>

## **THERMAL ENERGY STORAGE IN LIGHTWEIGHT CONSTRUCTION: METHODOLOGICAL BASIS FOR A SYSTEMATIC REVIEW**

**ABSTRACT:** This work presents the methodology designed for a systematic review on the incorporation of thermal energy storage in lightweight building construction, an important link for energy savings in buildings located in arid continental climates characterized by high thermal amplitude. The search strategy was developed on the ScienceDirect and Google Scholar platforms, covering the period from 2001 to 2025. A total of 8,535 publications on thermal energy storage in buildings in general were identified, of which 227 addressed lightweight constructions, representing only 2.7% of the total. A binary matrix table was designed, incorporating 23 variables with which each article was analyzed. Only 51 articles showed a direct application to lightweight construction systems. These results highlight the opportunity to focus on this topic for future research.

**Keywords:** Thermal energy storage, lightweight construction systems, thermal mass.

## **EFICIENCIA ENERGÉTICA EN HOSPITALES: ADAPTACIÓN DE HERRAMIENTAS DE ETIQUETADO PARA SU APLICACIÓN AL SECTOR SALUD**

**Micaela Seltzer, Dante Andrés Barbero, Irene Martini**

Instituto de Investigaciones y Políticas del Ambiente Construido (IIPAC)

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

Facultad de Arquitectura y Urbanismo. Universidad Nacional de La Plata (FAU - UNLP)

Calle 47 N°162, La Plata, CP 1900, Buenos Aires

Tel: +54-221-423-6587/90 int. 250

E-mail: [micaelaseltzer@iipac.laplata-conicet.gob.ar](mailto:micaelaseltzer@iipac.laplata-conicet.gob.ar)

**RESUMEN:** La evaluación de eficiencia energética en edificios de salud requiere herramientas de diagnóstico específicas que contemplen sus particularidades funcionales y operativas. En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo analizar un sistema actualmente aplicado al etiquetado energético de edificios residenciales, identificando sus limitaciones y potencialidades con el fin de evaluar su viabilidad de adaptación a edificios de salud, específicamente sobre la demanda de climatización. Como metodología se propone realizar un análisis exploratorio que permita identificar pautas específicas para el relevamiento de datos que permitan calcular el requerimiento energético de dichos edificios, las cuales se organizan en base a cada área hospitalaria que lo compone. Como caso de aplicación de estas pautas, se realizó un relevamiento de datos de una habitación típica del área de internación, tomando como referencia las exigencias mínimas requeridas por las normativas nacionales vigentes. A partir de esta información, se determina un valor teórico del requerimiento energético para calefacción y refrigeración de 1710 kWh/m<sup>2</sup> anual, y se establecen posibles rangos de categorización de la “A” a la “G” dentro del sistema de etiquetas de certificación energética. Este resultado permite evaluar el desempeño energético de los sistemas de climatización de diferentes habitaciones hospitalarias.

**Palabras clave:** Certificación energética, edificios de salud, requerimiento de energía, consumo energético.

### **INTRODUCCIÓN**

Actualmente, la Eficiencia Energética y la sustitución de fuentes convencionales por renovables son preocupaciones presentes en la agenda de diversos países. En este contexto, resulta necesario implementar acciones orientadas a reducir la demanda energética, con una visión a largo plazo que promueva mejoras sustantivas en el futuro energético de las ciudades (Gómez Cerdeiro, 2021). En este sentido, la investigación en eficiencia energética y sustitución de fuentes convencionales por renovables ha tomado mayor presencia en la agenda nacional. Los edificios de salud suelen estar entre los edificios públicos menos eficientes energéticamente representando el mayor consumo de energía por unidad de superficie. A diferencia de los edificios residenciales y otros edificios comerciales, los hospitales funcionan 24 horas al día, 7 días a la semana (Arocas 2019). Además, las normas de ventilación, aire acondicionado, iluminación, confort térmico, etc., son más exigentes que las correspondientes a otros sectores. Esta situación los convierte en edificios con potencial para reducir costos y para la incorporación de medidas de eficiencia energética.

A nivel internacional y regional se está avanzando en este sector con la incorporación de estrategias de diseño pasivo, con la utilización de sistemas activos, así como en políticas de Estado a través de



normativas, reglamentos y estándares. Este es el caso de la herramienta para el diagnóstico del comportamiento energético de la vivienda que propone el aplicativo informático creado por el Programa Nacional de Etiquetado de Viviendas (PRONEV) basado en la norma IRAM 11900, el cual releva condiciones climáticas, de diseño, materialidad y equipamiento de iluminación, producción de agua caliente sanitaria y climatización de una vivienda para cada zona bioclimática del país, con la intención de realizar una evaluación que concluya en un único valor que represente el consumo de energía primaria por metro cuadrado de superficie durante un año (IPE), el cual establece intervalos para cada categoría según zona bioclimática para finalmente llegar a una etiqueta final que refleja el comportamiento energético de la vivienda.

Con el fin de sistematizar el cálculo, el sistema de etiquetado de vivienda establece tres hipótesis de trabajo: el modelo adoptado es estacionario con corrección dinámica, asumiendo para cada mes valores constantes (promedios) de temperatura media e irradiancia solar; la temperatura interior permanece uniforme en todo el volumen y en cada ambiente climatizado; y los flujos térmicos se consideran unidireccionales y perpendiculares a las superficies analizadas. Teniendo en cuenta las hipótesis mencionadas se realiza un análisis del objeto de estudio (denominado sistema de estudio en el aplicativo informático) en el cual se deben definir cada uno de los elementos de la envolvente y equipamiento a relevar que influya sobre el comportamiento energético de la vivienda. Los pasos para realizarlo son los siguientes:

- Identificar ambientes y espacios generales.
- Definir los límites de cada zona térmica, en el caso de tener más de una.
- Reconocer e identificar elementos de la envolvente vertical y horizontal y sus respectivas condiciones de adyacencia.
- Identificar elementos internos de la zona térmica (capacidad térmica interna).

Una vez recolectados todos estos datos en planillas de relevamiento se realiza el cálculo de las características técnicas de la vivienda en cuanto a intercambio de temperatura, y posteriormente un balance térmico para cada estación (invierno y verano) en los cuales se estudian las pérdidas y ganancias térmicas respectivamente para llegar al valor del requerimiento energético de la vivienda para mantener la temperatura de confort en el interior durante todo el año. Al cálculo anterior se le suma el requerimiento de energía para los sistemas de iluminación (por mes y por cada ambiente) y producción de agua caliente sanitaria (por superficie). El resultado de este estudio consiste en un valor que pertenece a una de las categorías conformadas por letras, de la “A” a la “G”, las cuales corresponden a un rango de Índice de Prestaciones Energéticas (IPE) midiendo el grado de eficiencia.

Las herramientas que permiten obtener una certificación energética tienen como objetivo medir y evaluar la eficiencia y las emisiones de CO<sub>2</sub> para adoptar medidas que reduzcan las mismas (López, 2011). Como se explicó anteriormente, los edificios de salud pueden catalogarse como energo-intensivos por sus niveles de demanda por unidad de superficie, si se analizan sus porcentajes de consumo de energía en cada una de sus áreas hospitalarias se observa una mayor demanda en el área de internación, particularmente en la energía destinada a climatización (Fondoso Ossola, 2025). Por este motivo este trabajo se concentra en el diagnóstico de eficiencia energética de una habitación tipo del área hospitalaria de internación dentro de un establecimiento de salud.

## **METODOLOGÍA**

Este trabajo adopta un enfoque analítico, en el cual el estudio del comportamiento energético de cada establecimiento de salud se calcula a partir del comportamiento energético de cada una de las áreas hospitalarias que lo componen. Esta estrategia de descomponer un problema en subproblemas más simples, resolver cada uno, y luego integrar los resultados obtenidos para dar respuesta al problema original es lo que caracteriza a un enfoque analítico. Asimismo, para adaptar el sistema utilizado para etiquetado de viviendas a edificios del sector salud se realiza un análisis exploratorio con el objetivo de identificar las diferentes variables y seleccionar las que sean compatibles y/o que puedan ser adaptadas a los mismos y sumar otras en caso de ser necesario. Para el proceso de adaptación se propone la siguiente serie de pasos:



### 1. Definir el área hospitalaria objeto de análisis dentro de la totalidad del edificio:

Un edificio de salud típico está compuesto por 7 áreas hospitalarias: Atención ambulatoria, internación, área quirúrgica, diagnóstico y tratamiento, administración, servicios auxiliares y de apoyo, y circulaciones y baños. Estas áreas pueden conformar diferentes morfologías/tipologías y depender entre sí en cuanto al uso o funcionar de manera independiente. Por este motivo, y por la diferencia de cada programa en términos de escala, se opta por la desagregación en áreas para el análisis de sus requerimientos energéticos específicos, en vez de considerar zonas térmicas basadas en criterios de diseño o de configuración espacial como utiliza el aplicativo informático de vivienda. Por otro lado, es necesario ubicar geográficamente el objeto de estudio para extraer datos climáticos de la zona a la que pertenezca, utilizando la clasificación bioambiental IRAM (11603).

### 2. Identificar el programa de necesidades dentro del área seleccionada:

Cada área hospitalaria se compone a su vez por unidades funcionales (UF), las cuales conforman unidades mínimas de funcionamiento de la prestación y representan los requerimientos energéticos mínimos representativos de un determinado sector del establecimiento (Martini, 2010). Son ejemplos para la red de salud: UF de Internación, UF de Consultorios Externos, UF de administración, etc. La integral de Unidades Funcionales de un mismo tipo conforma los servicios de prestación para cada cada área.

Se plantea un estudio detallado para identificar la superficie y la configuración espacial de los ambientes que componen a la UF analizada y si se requiere, separar entre ambientes climatizados (AC), no climatizados (ANC), no habitables (ANH) o exteriores (EXT).

### 3. Reconocer y detallar los elementos de la envolvente horizontal y vertical especificando adyacencias para calcular características técnicas:

Para ello se realiza una planilla de relevamiento para cada uno de los elementos de la envolvente (muros, aberturas, cubierta y solado) especificando dimensiones, resolución constructiva, adyacencia y para el caso de aberturas, se suma la longitud de juntas. A partir de esta recolección de datos se calculan las características técnicas de los elementos de la envolvente que tienen intercambio térmico con el exterior.

### 4. Realizar un balance térmico estacional para determinar $Q_I$ y $Q_V$ :

Para determinar  $Q_I$  y  $Q_V$  es necesario realizar un balance térmico estacional para determinar el requerimiento de energía necesario para mantener la temperatura y condiciones de confort exigidas por las normativas vigentes en el interior de cada área hospitalaria.



Figura 1: Requerimiento mensual de energía térmica.  
Fuente: Programa Nacional de Etiquetado de Viviendas

La Figura 1 muestra el requerimiento mensual de energía correspondiente a un mes de verano y un mes de invierno, utilizando los valores medios de las Normas IRAM para la zona bioclimática correspondiente. En un segundo paso se suman los meses correspondientes a cada estación para llegar al balance térmico estacional mencionado anteriormente, y como resultado de esta etapa se obtiene el Requerimiento de Energía Térmica para invierno ( $Q_I$ ) y para verano ( $Q_V$ ).

### 5. Cálculo del Requerimiento Específico de Energía Primaria para climatización (EP<sub>C</sub>):

El valor de EP<sub>C</sub>, junto con los requerimientos de iluminación (EP<sub>IL</sub>) y agua caliente sanitaria (EP<sub>ACS</sub>) son componentes que conforman el Índice de Prestaciones Energéticas, el cual se utiliza para etiquetar de manera global a las viviendas, que pueden contar o no con la contribución de energías renovables, como queda detallado en la Figura 2. Para ello se calculan los dos primeros parámetros (EP<sub>I</sub> e EP<sub>V</sub>) que se ven en la Figura 2, ya que la climatización es la que tiene un mayor peso en el requerimiento de energía de un hospital y puede alcanzar hasta un 74,6% del total del establecimiento (Urteneche 2024).

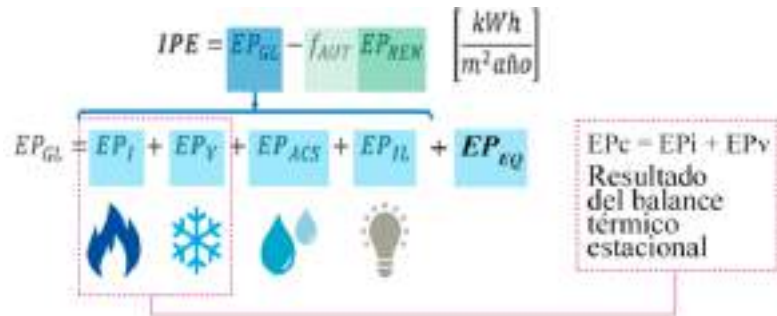


Figura 2: Conformación del IPE en viviendas.

Fuente: Elaboración propia con base en el PRONEV.

Una posible adaptación a la complejidad que presentan los edificios de salud sería añadir un nuevo parámetro a esta ecuación que represente el Requerimiento de Energía Primaria de los equipos utilizados, ya que estos también representan, junto con iluminación, un porcentaje que en el caso del área de internación llega hasta un 17,5% del consumo total del área y hasta un 35,5% para la totalidad del edificio (Urteneche, 2024 op. cit).

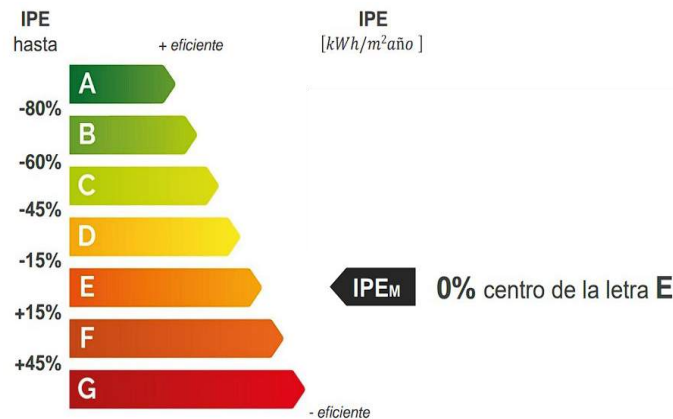


Figura 3: Rangos de valores relativos de IPE.

Fuente: Programa Nacional de Etiquetado de Viviendas

Como resultado se espera que pueda identificarse al valor calculado como EP medio (0%) y ubicarlo en la escala de etiquetado en el centro de la letra “E”, como puede verse en la Figura 3. Esto permite establecer los rangos pertenecientes a cada una de las categorías, de la “A” a la “G”, utilizando los mismos porcentajes entre intervalos que el sistema de vivienda.

### APLICACIÓN AL CASO DE ESTUDIO

Para la aplicación al caso de estudio, se trabajó sobre una habitación de internación basada en las condiciones mínimas recomendadas por la normativa vigente (Resolución 2547) y normas IRAM, por lo que se obtiene un resultado de requerimiento de energía teórico, el cual es el que se utilizará posteriormente para la elaboración de posibles niveles de demanda.

### 1. Definir el área hospitalaria objeto de análisis dentro del edificio de salud:

La habitación analizada se encuentra dentro del área hospitalaria de internación, la cual representa generalmente un porcentaje de consumo energético en climatización mayor a otras áreas hospitalarias (Urteneche, E. 2021). Al no haber una normativa que especifique ubicación o condicionantes a cumplir en relación con la ubicación dentro del edificio o al entorno, se toma al área con una configuración de pabellón con circulación central, ubicando habitaciones y servicios de apoyo a ambos lados, y en un piso intermedio del mismo. En cuanto a la ubicación geográfica, se toman los datos de la zona bioclimática IIIb, (IRAM 11603) particularmente en la ciudad de La Plata, a fines de poder calcular posteriormente el balance térmico.

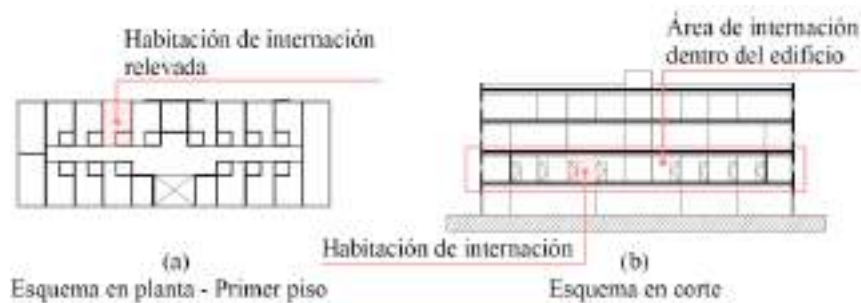


Figura 4. Esquemas de ubicación de la habitación. Elaboración propia.

Resulta necesario realizar esta especificación del área hospitalaria dentro del objeto construido (Figura 4) para definir correctamente las adyacencias de cada elemento de la envolvente, las cuales determinan las condiciones de los espacios que rodean al mismo.

### 2. Identificar el programa de necesidades dentro del área seleccionada:

Para este trabajo, se plantea analizar una habitación que conforma el programa de UF internación, que ocupa una superficie de 26m<sup>2</sup> como indica el Ministerio de Salud (Resolución 2547) y tiene la capacidad de albergar hasta 2 camas y un baño adaptado para personas con movilidad reducida.

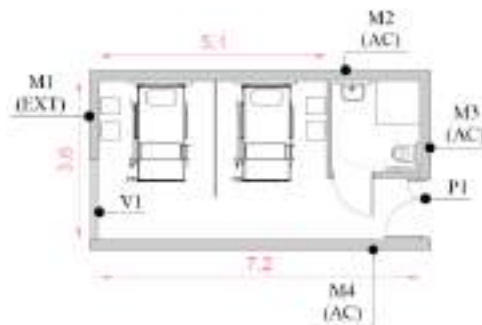


Figura 5: Habitación en planta.

Elaboración propia con base en la Resolución 2547 del Ministerio de Salud.

Se toma la decisión de trabajar sobre una habitación de internación (Figura 5) porque supone una parte del programa de la UF a la que pertenece, y que a su vez se repite en distintas medidas en cada edificio de salud cumpliendo obligatoriamente con la normativa, por lo que resulta un ejemplo sencillo que incluye todos los parámetros que se deben analizar en la búsqueda de adaptar el sistema de etiquetado.

### 3. Reconocer y detallar los elementos de la envolvente horizontal y vertical especificando adyacencias para calcular características técnicas:

Para el reconocimiento de los elementos de la envolvente se realiza un relevamiento de la documentación técnica de la habitación a estudiar y, dentro de la misma, se debe especificar la denominación de cada elemento con sus adyacencias, como puede verse en la Figura 5.

Para este caso, no se tendrá en cuenta la transmitancia térmica de los elementos de la envolvente que sean adyacentes a otro ambiente climatizado (AC), ya que no se da intercambio térmico a través de ellos, es decir, que se considerarán únicamente los elementos de la envolvente que tengan adyacencia al exterior (M1 y V1), como se especifica en la Figura 5, y se los analiza constructivamente en las Tablas 1 y 2.

*Tabla 1: Relevamiento de elementos de la envolvente con adyacencia al exterior.  
Elaboración propia con base en la norma IRAM 11605.*

| Envolvente                                                |               |                   |            |
|-----------------------------------------------------------|---------------|-------------------|------------|
| Muro M1 (22cm)                                            |               |                   |            |
| Descripción de la solución constructiva                   | K             | Medidas generales | Adyacencia |
| Ri 1,5cm + Ladrillo hueco cerámico 12x18x33 +<br>Re 2,5cm | 1,39<br>W/m²K | 3,6m x 3,1m       | Exterior   |

La elección de la resolución constructiva se debe a que este tipo de muro cumple con el valor máximo de transmitancia permitido para la zona bioclimática IIIb según la norma IRAM 11605 (Urteche, 2024 op. cit). Dentro del elemento M1 se encuentra la Ventana V1, por lo que se la incluye a las planillas de relevamiento al tener intercambio térmico con el exterior (Tabla 2).

*Tabla 2: Relevamiento de carpinterías. Elaboración propia con base en Urteche, E. et al. (2021)*

| Ventana V1            |               |                                                                                                     |
|-----------------------|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tipo de accionamiento | Corrediza     | Materialidad del marco:<br>Chapa doblada con vidrio<br>simple incoloro 6mm sin<br>protección solar. |
| Dimensiones generales | 1,80 x 1,20 m |                                                                                                     |
| Área transparente     | 1,45 m²       |                                                                                                     |
| Longitud de juntas    | 6,60 m        |                                                                                                     |

Con toda la información recolectada en este relevamiento puede calcularse el *coeficiente global de intercambio térmico* (H) de la envolvente, detallado a continuación en la Ec. 1:

$$H = H_{tr} + H_{ve} + H_g \quad (1)$$

Donde:

$H_{tr}$  = Coeficiente de intercambio térmico por transmisión (W/K)

$H_{ve}$  = Coeficiente de intercambio térmico por ventilación (W/K)

$H_g$  = Coeficiente de intercambio térmico a través del terreno en régimen estacionario (W/K)

- *Coeficiente de intercambio térmico por transmisión ( $H_{tr}$ ):* Define la propiedad de transferir calor de los elementos de la envolvente y determina la calidad de aislación de los mismos (Ver Ec. 1.1).

$$H_{tr} = A_e * K_e * b_{tr} \quad (1.1)$$

Donde:

$A_e$  = Área de la envolvente (m²)

$K_e$  = Transmitancia térmica de la envolvente (W/m²K)

$b_{tr}$  = Factor de corrección de intercambio térmico (igual a 1 cuando el elemento es adyacente al exterior)

A partir de la información obtenida de la Tabla 1 se calcula el coeficiente de intercambio térmico por transmisión con la Ec. 1.1, cuyo resultado se presenta a continuación:

$$H_{tr} = 9m^2 * 1,39 W/m^2K * 1 = 12,51 W/K$$

- *Coeficiente de intercambio térmico por ventilación ( $H_{ve}$ ):* Es el resultado del producto entre la capacidad volumétrica del aire (1200 J/m³K) y el caudal de aire ( $Q_{ve}$ ) que ingresa a la habitación debido a infiltraciones en invierno e infiltraciones y ventilación en verano en W/K (Ver 1.2).

$$Hve = paca * Qve \quad (1.2)$$

Donde:

$paca$  = Capacidad volumétrica del año ( $J/m^2K$ )

$Qve$  = Caudal de aire que ingresa por ventilación e infiltraciones ( $W/m^2K$ )

Antes de calcular  $Hve$  se necesita averiguar  $Qve$  (para invierno y para verano), los cuales se calculan a partir de los valores señalados en el relevamiento en la Tabla 2

$$Qve;i = 0,17 \text{ m}^3/s$$

$$Qve;v = 0,13 \text{ m}^3/s$$

Luego, a partir de los valores de  $Qve;i$  y  $Qve;v$  se procede a calcular los  $Hve;i$  y  $Hve;v$  utilizando la Ec. 1.2

$$Hve;i = 1200 J/m^3K * 0,17 \text{ m}^3/s = 204 W/K$$

$$Hve;v = 1200 J/m^3K * 0,13 \text{ m}^3/s = 156 W/K$$

- *Coefficiente de intercambio térmico a través del terreno en régimen estacionario ( $Hg$ ):* En este caso la habitación se encuentra en un piso intermedio del edificio, por lo que el coeficiente de intercambio con el suelo es = 0.

Al resolver la Ec. 1, se calculan dos valores de intercambio diferentes, uno para invierno y otro para verano ( $Hi$  y  $Hv$ ) obteniendo los siguientes valores:

$$Hi = 12,51 W/K + 204 W/K + 0 = 168,51 W/K$$

$$Hv = 12,51 W/K + 156 W/K + 0 = 216,51 W/K$$

Con estos resultados se procede a realizar el cálculo de balance térmico para los meses de invierno y verano.

#### **4. Realizar un balance térmico estacional para determinar $Qi$ y $Qv$ .**

Para determinar el requerimiento de Energía Primaria (EP) tanto para calefacción como para refrigeración, es necesario realizar previamente un balance térmico para medir el requerimiento de energía térmica para los meses de invierno y verano.

#### **Requerimiento mensual de energía térmica para calefacción en invierno ( $Qi$ ):**

$$Qi = Qtr;rad;ve - Ngr * Qgr \quad (2)$$

Donde:

$Qtr;rad;ve$  = Energía térmica intercambiada por transmisión, radiación y ventilación (kWk)

$Ngr$  = Factor de utilización de los aportes térmicos gratuitos

$Qgr$  = Aportes térmicos gratuitos totales (kWk)

- *Energía térmica intercambiada por transmisión, radiación y ventilación ( $Qtr;rad;ve$ ):* Se considera como pérdidas de energía térmica durante los meses de invierno. Se calcula a partir del intercambio térmico obtenido, junto con los datos de irradiancia solar (obtenido del mapa de irradiancia del Ministerio de Economía, 2014) de la zona bioclimática y ventilación natural.

$$Qtr;rad;ve = 1637,5 \text{ kWh}$$

- *Factor de utilización de los aportes térmicos gratuitos (Ngr)*: Es un factor que ayuda a delimitar cuál es el porcentaje aprovechable de los aportes térmicos exteriores que entran en la habitación.

$$Ngr = 0,19$$

- *Aportes térmicos gratuitos totales (Qgr)*: Para este caso de estudio sólo se tendrán en cuenta los aportes térmicos de origen solar.

$$Qgr = 1266,22 \text{ kWh}$$

Al reemplazar los valores obtenidos en la Ec. 2, se llega al siguiente resultado:

$$Qi = 1635,5 \text{ kWh} - 0,19 * 1266,22 \text{ kWh} = 1397 \text{ kWh}$$

**Requerimiento mensual de energía térmica para refrigeración en verano (Qv):**

Para el cálculo de requerimiento mensual de energía térmica en los meses de verano se utiliza la Ec .3:

$$Qv = Qgr - Ndisp * Qtr;rad;ve \quad (3)$$

Donde:

$Qgr$  = Aportes térmicos gratuitos totales (kWK)

$Ndisp$  = Factor de utilización de las dispersiones térmicas

$Qtr;rad;ve$  = Energía térmica intercambiada por transmisión, radiación y ventilación (kWK)

- *Aportes térmicos gratuitos totales (Qgr)*: Para este caso de estudio sólo se tendrán en cuenta los aportes térmicos de origen solar.

$$Qgr = 1433,5 \text{ kWh}$$

- *Factor de utilización de las dispersiones térmicas (Ndisp)*: Es un factor que ayuda a delimitar cuál es el porcentaje de pérdidas de energía térmica con el exterior.

$$Ndisp = 0,38$$

- *Energía térmica intercambiada por transmisión, radiación y ventilación (Qtr;rad;ve)*: Se considera como pérdidas de energía térmica durante los meses de verano. Se calcula con los mismos parámetros utilizados para los meses de invierno, pero con los datos climáticos que corresponden al verano:

$$Qtr;rad;ve = 357,67 \text{ kWh}$$

Al reemplazar cada variable en la Ec. 3, se llega al siguiente resultado:

$$Qv = 1433,5 \text{ kWh} - 0,38 * 357,67 \text{ kWh} = 1297,58 \text{ kWh}$$

Una vez calculados ambos valores de requerimiento mensual de energía térmica para un mes de invierno y uno de verano se procede a averiguar el requerimiento estacional de Energía Primaria (PE).

**5. Cálculo del Requerimiento de Energía Primaria para climatización (EPc):**

Utilizando ambos valores de requerimiento mensual de energía térmica para un mes de invierno y uno de verano se calcula el requerimiento estacional de Energía Primaria (ver Ec. 4).

$$EPc = EPi + EPv \quad (4)$$

Donde:

$EPi$  = Requerimiento específico de energía primaria para calefacción (kWh/m<sup>2</sup>año)

$EPv$  = Requerimiento específico de energía primaria para refrigeración (kWh/m<sup>2</sup>año)

**Requerimiento de energía primaria para calefacción ( $EPi$ ):**

Primero se calcula el requerimiento total de energía térmica útil para los meses de invierno ( $Eu;i$ ) los cuales incluyen los meses de mayo, junio, julio, agosto y septiembre.

$$Eu;i = Qi * 5 \quad (4.1)$$

$$Eu;i = 1297,58 \text{ kWh} * 5 = 6985 \text{ kWh}$$

Teniendo en cuenta este valor (Ec. 4.1), se convierte la unidad de *Energía Útil* ( $Eu$ ) a *Energía Secundaria* ( $Es$ ) al dividir este resultado por el coeficiente de eficiencia del sistema de climatización adoptado, que al ser un caso de estudio teórico es igual a 1, por lo que  $Eu;i = Es;i$

En el siguiente paso se convierte la unidad de *Energía Secundaria* ( $Es$ ) a *Energía Primaria* ( $EP$ ), teniendo en cuenta el valor de conversión de energía primaria del vector energético que en este caso es electricidad (ver Ec. 4.2).

$$Ep;i = Eu;i * 3,30 \quad (4.2)$$

$$Ep;i = 6985 \text{ kWh} * 3,30 = 23050,5 \text{ kWh}$$

Por último, este valor que hasta ahora representa el requerimiento de la habitación en general, necesita dividirse por el área útil de la habitación para definir el valor por m<sup>2</sup>, este resultado se presenta en la Ec. 4.3.

$$EPi = \frac{Ep;i}{26 \text{ m}^2} \quad (4.3)$$

$$EPi = \frac{Ep;i}{26 \text{ m}^2} = 886,5 \text{ kWh/m}^2 \text{ año}$$

Con la misma metodología, se repite el procedimiento para los valores de requerimiento de energía primaria para los meses de verano.

**Requerimiento de energía primaria para refrigeración ( $EPv$ ):**

Se calcula el requerimiento total de energía térmica útil para los meses de verano ( $Eu;v$ ) los cuales incluyen los meses de noviembre, diciembre, enero, febrero y marzo.

- *Requerimiento total de energía térmica útil ( $Eu;v$ ):*

$$Eu;v = Qv * 5 \quad (4.1)$$

$$Eu;v = 1297,58 \text{ kWh} * 5 = 6488 \text{ kWh}$$

- *Requerimiento total de energía primaria ( $Ep;v$ ):*

$$Ep;v = Eu;v * 3,30 \quad (4.2)$$

$$Ep;v = 6488 \text{ kWh} * 3,30 = 21410,4 \text{ kWh}$$



- Requerimiento total de energía primaria por  $m^2$  (EPv):

$$EPv = \frac{Ep;v}{26 m^2} \quad (4.3)$$

$$EPv = \frac{21410,4 kWh}{26 m^2} = 823,4 kWh/m^2 año$$

Utilizando ambos valores de requerimiento estacional de energía primaria específica (EPi y EPv) se obtiene el requerimiento específico medio de energía primaria anual (EPc) para climatizar la habitación de internación (ver Ec. 4)

$$EPc = 886,5 kWh/m^2 año + 823,4 kWh/m^2 año = 1710 kWh/m^2 año$$

Este valor permite definir los intervalos de EP para cada categoría del etiquetado como se muestra en la sección resultados.

## RESULTADOS

Luego de la aplicación de la metodología al caso de estudio, se obtuvieron los valores de las variables consideradas para la habitación de internación con respecto a los elementos de la envolvente y sus características técnicas; el balance térmico estacional y el cálculo de requerimiento de energía primaria para climatización, los cuales se sintetizan en la Tabla 3:

*Tabla 3: Síntesis de los resultados. Elaboración propia.*

|                                                                                                                                             |                 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| Reconocer y detallar los elementos de la envolvente horizontal y vertical especificando adyacencias para calcular características técnicas: |                 |
| <b>H = Htr + Hve + Hg</b>                                                                                                                   |                 |
| Htr = Ae * Ke * btr                                                                                                                         | 12,51W/K        |
| Hve = cap. volumétrica del aire * Qve                                                                                                       | Hve;i = 204 W/K |
|                                                                                                                                             | Hve;v = 156 W/K |
| Hg= 0                                                                                                                                       | 0               |
| <b>Hi = 168,51 W/K</b>                                                                                                                      |                 |
| <b>Hv = 216,51 W/K</b>                                                                                                                      |                 |
| Realizar un balance térmico estacional para determinar Qi y Qv.                                                                             |                 |
| <b>Qi = Qtr;rad;ve - ngr * Qgr</b>                                                                                                          |                 |
| Qtr;rad;ve                                                                                                                                  | 1637,5 kWh      |
| ngr                                                                                                                                         | 0,19            |
| Qgr                                                                                                                                         | 1266,22 kWh     |
| <b>Qi = 1397 kWh</b>                                                                                                                        |                 |
| <b>Qv = Qgr - ηdisp * Qtr;rad;ve</b>                                                                                                        |                 |
| Qgr                                                                                                                                         | 1433,5 kWh      |
| ηdisp                                                                                                                                       | 0,38            |
| Qtr;rad;ve                                                                                                                                  | 357,67 kWh      |
| <b>Qv = 1297,58 kWh</b>                                                                                                                     |                 |
| Cálculo del Requerimiento de Energía Primaria para climatización (EPc):                                                                     |                 |
| <b>EPc = EPi+ EPv</b>                                                                                                                       |                 |
| EPi                                                                                                                                         | 886,5 kWh/m²año |
| EPv                                                                                                                                         | 823,4 kWh/m²año |
| <b>EPc = 1710 kWh/m²año</b>                                                                                                                 |                 |

A partir de este resultado final (EPc) se obtiene el valor central de la letra “E” (EP medio), y a partir de los porcentajes de variación entre cada categoría que utiliza el PRONEV, se pueden estimar todas las categorías de un posible etiquetado para el sistema de climatización de una habitación de internación.

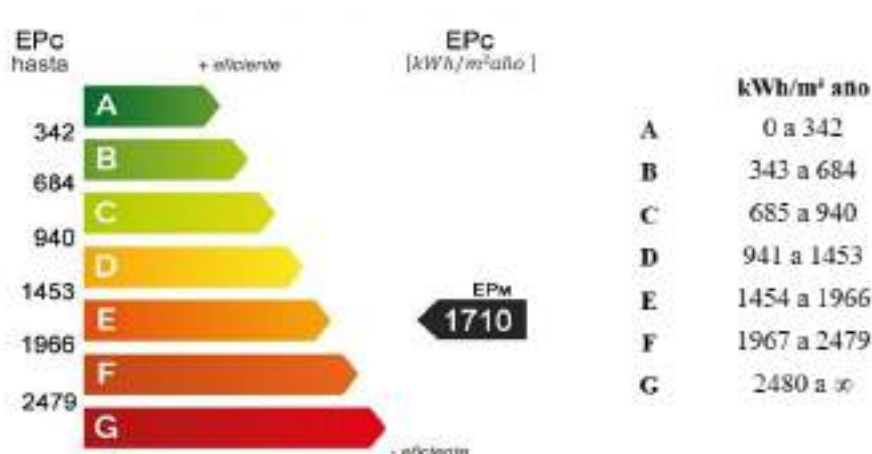


Figura 6: Rangos obtenidos a partir de EPm.  
Elaboración propia con base en los rangos del PRONEV

Los rangos obtenidos que se muestran en la Figura 6 se pueden utilizar para etiquetar el sistema de climatización de cualquier habitación del área hospitalaria de internación de un edificio de salud que pertenezca a la zona bioclimática IIIb de Argentina, según la clasificación IRAM 11603.

## CONCLUSIONES

Este trabajo, de carácter metodológico, permite evaluar la viabilidad del sistema de etiquetado de viviendas, para adaptarlo con las modificaciones necesarias, al nivel de complejidad que integra un edificio de salud tipo. La organización del análisis por áreas hospitalarias y unidades funcionales en torno a un programa arquitectónico, en vez de trabajar a partir de zonas térmicas, permite obtener estimaciones del requerimiento energético que se acercan mejor a la escala de trabajo, especialmente en lo referido a climatización. El caso de aplicación a una habitación de internación tipo permitió mostrar que la metodología propuesta posibilita integrar criterios normativos y parámetros técnicos con el objetivo de elaborar rangos de certificación energética posibles. El resultado se ubica en este caso en la categoría “E” (media) de la escala basada en el sistema de etiquetado a nivel residencial. Se identifica la necesidad de incorporar, además de los parámetros contemplados en el IPE, el requerimiento de energía asociado a equipamiento especializado si se quiere reflejar con mayor precisión la demanda total de estos edificios.

En síntesis, el trabajo desarrollado propone una herramienta de diagnóstico adaptada al sector salud que contribuye a la evaluación del desempeño energético, y pueda ser utilizada para la formulación de estrategias de eficiencia energética. Asimismo, constituye un aporte inicial para la futura implementación de una etiqueta energética, que pueda ser aplicada de manera individual a las distintas áreas hospitalarias y posteriormente al hospital en su conjunto.

## REFERENCIAS

- Gómez Cerdeiro, C. (2021). *Análisis de la importancia de la eficiencia energética en los hospitales*. Escuela Politécnica de Ingeniería de Minas y Energía. Trabajo final de Grado. Universidad de Cantabria. España.
- Arocas, S. M., Coria Hoffman, G., y Bosc, C. (2019). Identificación de indicadores energéticos para el diseño de un programa de ahorro y eficiencia energética en una instalación hospitalaria. *5º Jornadas ITE*, 770–777.
- Ministerio de Economía. (2023). Programa Nacional de Etiquetado de Viviendas. Aplicativo Informático Nacional.

- IRAM. (2017b). *Norma IRAM 11900. Prestaciones energéticas en viviendas. Método de cálculo y etiquetado de eficiencia energética*.
- Fondoso Ossola, S. T. (2025). *Formulación, análisis y evaluación de estrategias energéticas alternativas para el subsector salud, en el marco de la construcción de escenarios*. Tesis de Doctorado. Universidad Nacional de La Plata.
- López Cristià, M. (2011). *Hospitales eficientes: una revisión del consumo energético óptimo*. Tesis de Doctorado. Universidad de Salamanca.
- IRAM. (2012). *Norma IRAM 11603. Acondicionamiento térmico de edificios. Clasificación bioambiental de la República Argentina*.
- Martini, I. (2010). *Diagnóstico y mejoramiento de los procesos de gestión edilicia energética productiva en la red de salud*. Tesis de Doctorado. Universidad Nacional de Salta.
- Ministerio de Salud. (2021). Resolución 2547. *Directrices de Organización y Funcionamiento de Internación - Modelo de Gestión por Cuidados Progresivos*.
- Urteche, E. (2024). *Estrategias tecnológico-constructivas para el mejoramiento de la eficiencia energética de la envolvente edilicia del sector salud*. Tesis de Doctorado. Universidad Nacional de La Plata.
- IRAM. (1996). *Norma IRAM 11605. Acondicionamiento térmico de edificios. Condiciones de habitabilidad en edificios. Valores máximos de transmitancia térmica en cerramientos opacos*.
- Urteche, E. Martini, I. Barbero, D. A. Discoli, C. A. (2021a). *Estado el arte de la envolvente edilicia del subsector salud en la microrregión del Gran La Plata. Su estudio como punto de partida para el mejoramiento de la eficiencia energética a partir del reciclado edilicio*. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 25. pp.49-59.
- Ministerio de Economía. (2014). Información geográfica de Energía. *Mapas de irradiancia solar directa e irradiancia solar horizontal*. Visor SIG: <https://sig.energia.gob.ar/visor/visorsig.php?t=18>
- Urteche, E. Fondoso-Ossola, S. T. Barbero, D. A. Martini, I. (2021b). *Development of a tool for the identification and energy analysis of buildings' envelopes of different hospital areas*. En: RPIC 2021. XIX Reunión de trabajo en procesamiento de la información y control.

## **ENERGY EFFICIENCY IN HOSPITALS: ADAPTING LABELING TOOLS FOR APPLICATION IN THE HEALTHCARE SECTOR.**

**ABSTRACT:** Energy efficiency assessment in healthcare buildings requires specific diagnostic tools that consider their functional and operational specificities. In this context, this paper aims to analyze a system currently applied to energy labeling for residential buildings, identifying its limitations and potentialities in order to assess its feasibility for adaptation to healthcare buildings, specifically with regard to HVAC requirements. The methodology proposed is an exploratory analysis that allows for the identification of specific guidelines for data collection to calculate the energy requirements of these buildings. These guidelines are organized by each hospital area. As a case study of these guidelines, a data collection was conducted on a typical room in the internment area of a hospital, taking as a reference the minimum requirements established by current national regulations. Based on this information, a theoretical value of 1,710 kWh/m<sup>2</sup> of energy requirement for heating and cooling was determined, and possible categorization ranges from "A" to "G" were established within the energy certification label system. This result allows for the evaluation of the energy performance of the air conditioning systems in different hospital rooms.

**Keywords:** Energy labeling, healthcare buildings, energy demand, building energy consumption.

## ANÁLISIS MICROCLIMÁTICO Y SOCIAL DE CENTROS DE MANZANA COMO ESTRATEGIA DE REGENERACIÓN URBANA

Jesica A. Alvarez<sup>1</sup>, María B. Sosa<sup>2</sup>, Erica N. Correa Cantaloube<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Centro Universitario Rosario de Investigaciones Urbanas y Regionales (CURDIUR) Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas - Universidad Nacional de Rosario (CONICET-FAPYD). Riobamba 220 bis C.P. 2000 Rosario, Santa Fe – Argentina. Tel.+54 (0341) 480-8532 e-mail: [alvarez@curdiur-conicet.gob.ar](mailto:alvarez@curdiur-conicet.gob.ar)

<sup>2</sup>Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE) Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Av. Ruiz Leal s/n, Parque General San Martín C.P. 5500 - Mendoza - Argentina. Tel: +54-261-5244310 e-mail: [msosa@mendoza-conicet.gob.ar](mailto:msosa@mendoza-conicet.gob.ar) / [ecorrea@mendoza-conicet.gob.ar](mailto:ecorrea@mendoza-conicet.gob.ar)

**RESUMEN:** El crecimiento de la ciudad de Rosario ha dado lugar a tejidos urbanos diversos, cuyas diferencias morfológicas implican comportamientos térmicos y sociales distintos. Este trabajo diagnostica el comportamiento térmico de los centros de manzana en dos conjuntos de vivienda de gestión estatal con participación público-privada icónicos en Rosario-Santa Fe, durante el período estival. A la vez, analiza la relación de las viviendas con el uso y apropiación de los mismos. Esta información es el insumo que contribuye a evaluar el potencial que presentan como estrategia de regeneración urbana con impacto tanto en el desempeño térmico exterior/interior como en la cohesión social vecinal del mismo. En este sentido, se realiza un análisis que permite identificar relaciones entre los comportamientos térmicos y sociales, a partir del registro de datos relevados *in situ* y de un método de encuestas para determinar la cohesión social vecinal. Este enfoque posibilitará luego, proponer mejoras y evaluar alternativas de forma comparativa, adaptadas a contextos locales específicos. Se propone valorizar a los espacios verdes de uso común como elementos ambientales y sociales activos, capaces de incidir en la sostenibilidad del entorno urbano para finalmente desarrollar un nuevo modelo de aplicación en próximos conjuntos de vivienda.

**Palabras clave:** vivienda pública; espacios de uso común; indicadores urbanos, monitoreo microclimático; cohesión social vecinal.

### INTRODUCCIÓN

A escala global, la urbanización acelerada y la densificación continua han generado ciudades segregadas y sistemas urbanos desequilibrados (Lois González et al., 2022), generando la pérdida de superficies naturales, el deterioro del microclima y el aumento de necesidades energéticas con sus emisiones asociadas (Trepici et al., 2020). Estos procesos han modificado el uso del suelo, promoviendo nuevos patrones de ocupación y desarrollo, generando distintos tipos de tejidos urbanos, incrementando la exposición a riesgos asociados con fenómenos naturales extremos (Aguilar et al., 2006). Se reconocen configuraciones asociadas a modelos de alta y baja densidad y a tipologías mixtas, configuraciones propias tanto de la ciudad compacta como de la ciudad difusa, así como formas híbridas intermedias. Estas formas urbanas, al diferir en su estructura y morfología, también manifiestan comportamientos ambientales y sociales contrastantes.

Tal como señala la literatura internacional, la morfología de la ciudad constituye un factor determinante en la eficiencia de los sistemas urbanos y en su sostenibilidad a largo plazo (Higueras-García & Ezquiaga-Domínguez, 2022). En la misma línea, diversos autores refuerzan la necesidad de profundizar



en este enfoque, evidenciando cómo la estructura física y la densidad urbana influyen de manera directa en el consumo energético, las emisiones y los costos de mantenimiento (UN-Hábitat, 2020). Si bien existen numerosos estudios a escala urbana que abordan los costos derivados del crecimiento de las ciudades, y los impactos ambientales asociados a diferentes modalidades de urbanización, a nivel local existe una brecha de indagación e investigación en torno a los impactos vinculados con la forma urbana. A su vez, el microclima de cada ciudad desempeña un papel crucial para abordar la gestión energética en la planificación ambiental, especialmente en lo que respecta a las demandas y suministros requeridos para el acondicionamiento (Cárdenas Jirón e Higuera, 2015; Marsh, 1998).

Particularmente, los espacios públicos son clave para la salud, el bienestar y el desarrollo de la cohesión social (ONU-HÁBITAT y Ayuntamiento de Madrid, 2016; CEPAL, 2004 y 2022), siendo fundamental que estos espacios aseguren condiciones adecuadas de habitabilidad. El microclima, por lo tanto, puede tener un impacto decisivo, ya sea favoreciendo o restringiendo el uso de estos espacios urbanos (Tumini, 2012).

En las ciudades latinoamericanas, dichos procesos de urbanización descontrolada —marcados por la falta de planificación integral, infraestructuras tardías, escasa conectividad y carencias en equipamiento—, han debilitado significativamente la cohesión social. Esta situación se traduce en una mayor percepción de inseguridad, deterioro del espacio público, escasa convivencia vecinal y baja participación comunitaria, afectando de forma negativa la calidad de vida urbana (Dempsey, 2008; Forrest y Kearns, 2001; Carmona et al., 2004). Frente a ello, iniciativas como el Índice de Cohesión Social Vecinal (ICSV) permiten medir esta dimensión comunitaria para guiar políticas públicas (Betanzo et al., 2015). En esta línea, se han estudiado los interiores de la manzana como espacios de interacción vecinal (Ballester Espigares, 2013), y su valor ambiental (Cantón y de Rosa, 2004). Murcia (2012) propone manzanas comunitarias con pulmones verdes y usos colectivos definidos, priorizando al habitante sobre el vehículo, una postura también respaldada por Maldonado González (2019).

Desde experiencias históricas de vivienda social colectiva como las de Carl Theodor Sørensen (1939) en Dinamarca, se plantea el diseño de jardines comunitarios pensados desde las necesidades de quienes los habitan con énfasis en proporcionar un lugar de esparcimiento y juego para los niños en el entorno próximo a sus casas como función principal del jardín de la vivienda colectiva, destacando su rol como espacios intermedios entre lo público y lo privado donde los habitantes del conjunto forman parte de él, no sólo usando este espacio (Sánchez Moya y Guillén, 2024). Por su parte, Vaquerizo Gómez (2015) refiere a la infraestructura verde como estrategia para disminuir la fragmentación de los ecosistemas producidos por el inminente crecimiento urbanístico en ciudades de Europa. La autora enuncia que la infraestructura verde es concebida como un fin en sí misma, y no se tienen en cuenta otros aspectos como la dimensión social y su capacidad de generar cohesión social. Es decir, espacios verdes comunitarios multifuncionales como oportunidad de resiliencia socio-ecológica y de beneficio al ecosistema urbano. Estudios locales también muestran la necesidad de recuperar centros de manzana como espacios apropiables que fortalezcan los lazos vecinales (Salgado et al., 2017). En años recientes, distintas investigaciones han avanzado en esta recuperación, integrando aspectos físicos, sociales y ambientales (Quiceno-Torres, 2020).

En este marco, el presente trabajo propone abordar e integrar las dimensiones relativas al comportamiento térmico exterior y a la cohesión social vecinal en conjuntos de vivienda estatal con participación público-privada. De manera particular, busca desarrollar las siguientes preguntas de investigación: ¿En qué medida el comportamiento térmico de los espacios públicos comunitarios impacta en la cohesión social? ¿Cuán positiva resulta la retroalimentación entre la mejora del microclima urbano en centros de manzana y el aumento de la apropiación colectiva? El objetivo final es evaluar el fenómeno de reciprocidad e interacción entre la organización morfológica del espacio, el comportamiento térmico del entorno y la apropiación social de los espacios de uso colectivo. Considerando que, a escala urbana, este fenómeno influye en la calidad térmica tanto de los espacios exteriores como interiores, fomenta los hábitos de encuentro entre los vecinos, reduce el consumo energético, y contribuye a la reducción del sobrecalentamiento urbano en la ciudad de Rosario.

## METODOLOGÍA

La metodología de trabajo se divide en tres ejes principales, a saber: (i) selección y caracterización de los casos de estudio, (ii) medición y diagnóstico del comportamiento térmico de los casos de estudio, y (iii) determinación y diagnóstico del ICSV (Índice de Cohesión Social Vecinal). Este abordaje está orientado a dar respuesta al objetivo principal de analizar el vínculo entre la forma urbana y la respuesta térmica estival de los centros de manzana en conjuntos de vivienda estatal en Rosario, y analizar si esta relación incide recíprocamente en su uso social, con el fin de valorarlos como estrategias de regeneración urbana sostenibles.

### Selección y caracterización de los casos de estudio

El proceso de selección y caracterización de los casos de estudio se estructura en tres escalas de análisis —macro, meso y micro— que permiten abordar la complejidad del fenómeno estudiado desde distintas dimensiones y niveles de observación. Este enfoque metodológico responde a la necesidad de comprender las relaciones entre las políticas de vivienda de gestión estatal, las formas urbanas resultantes y las condiciones espaciales, normativas, sociales, ambientales y morfológicas que las configuran.

#### *Macro-escala*

En la macro-escala, se identifican las dinámicas estructurales y contextuales más amplias (nacionales, provinciales y municipales) que enmarcan el fenómeno de estudio. Esta escala permite establecer criterios generales de comparación entre territorios, así como delimitar un universo potencial de casos. Incluye el análisis del modelo urbano del Área Metropolitana de Rosario (AMR), el análisis del marco normativo de planificación y edificación y de proyectos urbanos de gestión estatal con participación público-privada. El AMR se caracteriza por una urbanización continua, con centralidades urbanas diversas surgidas a medida que la ciudad se expandió hacia la periferia. Particularmente, Rosario concentra el 38% de la población de Santa Fe (INDEC, 2025), lo que ha generado una demanda habitacional superior al resto de la provincia teniendo como consecuencia un gran impacto socio-ambiental en el territorio. El crecimiento de la ciudad ha dado lugar a tejidos urbanos diversos, cuyas diferencias morfológicas implican comportamientos térmicos y sociales distintos. En el AMR, la producción de vivienda de gestión estatal ha tenido un papel central en la respuesta a la demanda habitacional. El volumen de hogares construidos bajo esta modalidad, la superficie que ocupan y su distribución en todo el territorio —desde el centro hasta el primer y segundo anillo perimetral, así como en el cordón perimetral norte, noroeste, oeste, sudoeste y sur— resultan particularmente significativos.



*Figura 1. Mapeo realizado por el EPEV-CURDIUR (1928-2001). Fuente: Biblioteca de la Facultad de Arquitectura, Planeamiento y Diseño de la Universidad Nacional de Rosario.*

Aunque la producción de vivienda de gestión estatal para atender esta demanda ha sido considerable, no existen datos oficiales publicados y sistematizados que indiquen la cantidad de unidades construidas — en sus distintos niveles de gestión: nacional, provincial y municipal— ni un registro de la superficie que estas ocupan en la ciudad. Frente a dicha vacante, se impulsó un relevamiento de la producción pública de vivienda desde 1923 —año en que se creó el programa municipal “La Vivienda del Trabajador”— hasta la actualidad, retomando y actualizando estudios previos realizados por el EPEV-CURDIUR (EPEV-CURDIUR, 1991 y 2001). En la Fig. 1 se muestran una secuencia de imágenes donde se visualiza la producción estatal de vivienda por distrito. Esta base bibliográfica presenta un relevamiento de la producción de viviendas construidas en el AMR con financiación pública que tiene como objetivo realizar un análisis comparativo de la acción desarrollada por los organismos públicos en materia de vivienda, tanto en lo que concierne a su producción y los aspectos relativos a la localización de los



conjuntos, como a la cuestión de la normativa de diseño implementada según las distintas operatorias de gestión. La etapa futura de esta investigación lleva adelante un relevamiento que tiene como objetivo la incorporación de los proyectos de vivienda desde el año 1999 hasta la actualidad sumando nuevos indicadores y métricas urbanas vinculadas de forma directa con los aspectos de afectación sobre el microclima local.

### ***Meso-escala***

En la meso-escala, se seleccionan unidades intermedias —proyectos urbanos, barrios— que presentan características particulares relevantes para los objetivos de la investigación, en este caso, disponer de espacios de uso común como centro de manzana. Aquí, se consideran variables como la densidad edilicia, la cantidad de viviendas, dimensiones del loteo, servicios e infraestructura, entre otros aspectos; que permiten realizar luego contrastes entre casos de estudio. Se incluye la selección de tramas urbanas, análisis de mosaicos aerofotogramétricos e imágenes satelitales de libre acceso a escala aérea y de cañón urbano. Del universo de conjuntos habitacionales del AMR con sus diversas morfologías urbanas, resultado del crecimiento metropolitano, se seleccionan dos unidades de estudio que conservan el centro de manzana como espacio público de uso común, pero que difieren en: trazado, parcelación, superficie y volumen construido, tipologías de vivienda, sistemas constructivos, materiales, proporción de áreas vegetadas y composición forestal, entre otros aspectos. Estas características configuran tipos de tejido urbano propios de distintos sectores del AMR —centro, primer y segundo anillo perimetral, cordón perimetral norte, noroeste, oeste, sudoeste y sur—, todos con la premisa de incorporar espacios de uso común. El análisis se realiza con la cartografía disponible en Infomapa Rosario, plataforma digital interactiva de la Municipalidad de Rosario que ofrece acceso público a datos georreferenciados de la ciudad (Infomapa, 2025).



*Figura 2. Unidades de estudio. Acindar y Zona Cero. Fuente: Elaboración propia.*

En base a este análisis, se identificaron dos conjuntos de vivienda que conservan sus centros de manzana como ámbitos comunitarios: Acindar (1957) y Zona Cero (2006). A continuación, las Fig. 2, muestran imágenes aéreas de ambos conjuntos de viviendas. Acindar, constituye un ejemplo de conjunto que contempla el uso y apropiación vecinal de los centros de manzana; y Zona Cero denota una desconexión espacio-funcional del centro de manzana con el resto del conjunto. De acuerdo a los planos catastrales, los centros de manzana de Acindar son “espacio verde” a diferencia de los centros de manzana de Zona Cero donde no se define propiedad y uso. Aunque en estos casos existen diferencias en cuanto a la integración de los espacios abiertos comunitarios, ambos ofrecen la superficie abierta para repensar estrategias de diseño que contribuyan a mejorar la calidad térmica de los mismos. Los casos de estudio poseen una estructura de viviendas unifamiliares, que rodean la manzana, en cada caso la trama varía en cuanto a la geometría determinada por la retícula de calles: Acindar orientación de manzanas Este-Oeste, y Zona Cero orientación de manzanas Norte-Sur.

### ***Micro-escala***

En la micro-escala, se realiza un recorte espacial para seleccionar la unidad de manzana dentro de cada barrio. Se incluyen criterios cualitativos: accesibilidad, disponibilidad de información, presencia de actores clave, entre otros. Esta escala permite un abordaje en profundidad, contextualizado dinámicas particulares. Incluye la selección de manzanas, centros de manzana y canales viales urbanos, relevamientos de campo y la caracterización mediante una serie de indicadores morfológicos y métricas urbanas. Un enfoque escalonado permite no solo la selección sistemática y fundamentada de los casos,



sino también asegurar la validez analítica de la comparación entre ellos, reconociendo la multiescalaridad inherente al fenómeno investigado. Además, posibilita articular escalas de análisis estructurales, favoreciendo la comprensión tanto de los condicionantes amplios como de las especificidades territoriales de cada uno de ellos. En particular, se seleccionó una manzana representativa dentro de cada barrio, donde se diferenciaron aspectos como las distintas tipologías de espacios comunes, la morfología edilicia, la cantidad de superficie construida, entre otros. La Fig. 3 muestra una imagen aérea de ambas manzanas, junto con un plano CAD de ambos casos. Las características morfológicas, cuantitativas, de ambos casos son las siguientes: relación H/W o perfil de manzana Acindar 0.24 y Zona Cero 0.37, compacidad Acindar 1.79 y Zona Cero 2.43, cantidad de viviendas Acindar 33 y Zona Cero 50, superficie de centro de manzana Acindar 1263.50m<sup>2</sup> y Zona Cero 894.6m<sup>2</sup>, porcentaje de superficie sellada y edificada en centro de manzana Acindar 36.75% y Zona Cero 27.16%, cantidad de árboles en centro de manzana Acindar 44 y Zona Cero 2, relación canopia de árboles/superficie de centro de manzana Acindar 0.64 y Zona Cero 0.004, por último en Acindar hay diversidad de especies y magnitudes forestales desde *Ficus benjamina*, *Ciprés común*, *Acer negundo*, *Morus alba*, *Cedrus libani*, y en Zona Cero existe un ejemplar de *Ailanthus altissima* y otro *Populus alba*.



Figura 3. Imágenes aéreas y planimetría de las unidades de estudio. Manzana “P”, Acindar y Manzana “2”, Zona Cero. Fuente: Elaboración propia.

Otro aspecto a destacar, es que la definición y elección de cada manzana estuvo directamente vinculada a la posibilidad de colocar el instrumental necesario para realizar la campaña de monitoreo térmico, tanto en el canal vial urbano como en los centros de manzana. Aquí la vinculación con referentes barriales fue sostén de las mediciones y una manera de llegada a los vecinos para luego en la instancia de medición del ICSV, permitiera recolectar una muestra mucho mayor. En un contexto de trabajo en un barrio vulnerable, con elevados niveles de inseguridad, donde la situación dominial en muchos casos es irregular fue un gran desafío para obtener y construir la información primaria. La metodología adoptada es de común implementación en barrios populares donde se realizan relevamientos a través de encuestas a familias y organizaciones, mapeando su existencia y generando datos para la solicitud de determinados trámites. Según el ReNaBaP en algunos municipios se implementan planes de relevamiento catastral que buscan detectar construcciones nuevas o mejoras no declaradas (ReNaBaP, 2025). Este proceso generalmente incluye la recopilación de datos técnicos, legales y sociales, así como la elaboración de planos y documentación gráfica que reflejen fielmente las ampliaciones realizadas. A

su vez, por medio de la toma de imágenes aéreas se identificaron y documentaron de manera detallada las modificaciones realizadas en cada lote, y dentro de los centros de manzana, con el objetivo de actualizar la información catastral disponible y analizar las relaciones entre cada uno de los indicadores propuestos, Fig. 3 —color negro cubiertas originales, escala de grises ampliaciones y superficies selladas—.

#### ***Medición y diagnóstico del comportamiento térmico de los casos de estudio***

Para el monitoreo de las condiciones térmicas exteriores en los centros de manzana y del canal vial urbano seleccionado, se utilizaron data-logger de temperatura del tipo Novus TagTemp durante el periodo de verano. Los dataloggers tomaron mediciones cada 15 minutos, en un período con condiciones típicas y representativas del clima actual de la ciudad de estudio entre los días 7 al 10 de febrero del corriente año. El instrumental de medición fue colocado en el interior de una caja estanca de PVC, perforada en cuatro de sus caras, orientados en sentido Sur-Este, instalados en cuatro puntos representativos de los canales viales urbanos (CVU) y cuatro puntos representativos de cada centro de manzana (CDM), a una altura de 2 m (Oke & Canada, 2006), la Fig. 4 muestra la ubicación de los mismos. Previo al inicio de las mediciones, los dataloggers fueron testeados y calibrados, mediante la exposición de los equipos durante 5 días a condiciones similares de medición, al aire libre y en días claros.



*Figura 4. Fotografías del instrumental utilizado en las campañas de medición, manzana “P”, Barrio Acindar y manzana “2”, Zona Cero. Fuente: Elaboración propia.*

#### ***Determinación y diagnóstico del ICSV***

La cohesión social se ha consolidado como un eje central en los debates sobre seguridad, violencia, vivienda y desarrollo urbano, ya que su debilitamiento se vincula con el deterioro físico de áreas urbanas, la reducción de la participación comunitaria, la desorganización social y el aumento de la violencia y la percepción de inseguridad. Con el fin de medir este fenómeno a escala micro, “Fundación Hogares y México Evalúa” desarrollaron el ICSV (Betanzo et al., 2015), herramienta caracterizada por su aplicabilidad al ámbito vecinal (a diferencia de otros modelos aplicados internacionalmente en escalas nacionales o regionales) y su abordaje multifactorial basado en dimensiones independientes y cuantificables mediante observación empírica. El ICSV es una herramienta para medir el nivel de integración y unión entre los miembros de una comunidad en un nivel micro, reflejando la calidad de las relaciones interpersonales y el sentido de pertenencia a un espacio compartido.

En esta investigación, el ICSV se implementa para evaluar la cohesión social en los dos conjuntos de vivienda seleccionados del AMR. La metodología se replica al ámbito de estudio, y se incorporan cuatro

preguntas vinculadas para adaptarlo a los espacios de uso común. El diagnóstico analiza patrones de ocupación, apropiación y uso —o cambio de uso— de dichos espacios y su relación con las viviendas siendo esta primera instancia una prueba piloto metodológica, orientada a ajustar instrumentos, optimizar la representatividad de la muestra, y definir parámetros para futuras aplicaciones. La unidad de análisis corresponde a la manzana urbana y el criterio de selección se encuentra directamente relacionado a la existencia de espacios comunes. En particular, se añadieron preguntas vinculadas al acceso y uso del centro de manzana, como su delimitación, frecuencia de uso y acceso directo, que, si bien no forman parte del cálculo del ICSV, sirven a la determinación de nuevos indicadores del fenómeno.

El modelo adoptado para medir el ICSV considera la naturaleza multifactorial del fenómeno y agrupa dimensiones independientes, medibles empíricamente, dejando fuera factores exógenos como la desigualdad socioeconómica, o consecuencias derivadas como la inseguridad. La determinación de variables se divide en dos categorías según la naturaleza de los datos a utilizar: subjetivas (actitudes, normas, percepciones) u objetivas (comportamiento observable o auto-reportado). Si bien las variables de la segunda categoría suelen ser un reflejo de las de la primera, se puede esperar que al incorporar ambos tipos de datos se logre una mayor precisión en la medición. Asimismo, se contemplan dos dimensiones: horizontal (vínculos e interacciones que se desarrollan entre vecinos) y vertical (relaciones con instituciones y normativas).

El índice resultante integra cuatro ejes: (i) confianza interpersonal, (ii) sentido de pertenencia, (iii) identidad compartida, y (iv) comportamiento participativo. Estos cuatro ejes son ponderados de forma equitativa y evaluados en una escala de 1 a 5 (5 = máxima cohesión). Para la obtención del ICSV a nivel individual se calcula el valor promedio de los subíndices individuales, asumiendo que cada uno de los cuatro tienen pesos iguales. El ICSV considera la confianza interpersonal como la expectativa positiva y certera respecto del comportamiento de los demás, incluso en contextos de incertidumbre o riesgo. El sentido de pertenencia se entiende como la tendencia natural de las personas a integrarse en un grupo, junto con el temor al rechazo o la exclusión. La identidad compartida alude a la percepción de similitud con la mayoría de los miembros de la comunidad en aspectos como el nivel socioeconómico, la educación y los valores. Finalmente, el comportamiento participativo se refiere a la disposición regular y sistemática de las personas a involucrarse en actividades colectivas desarrolladas en el ámbito social.

La metodología, fundamentada en Dickes (2011), permite comparar resultados entre periodos para identificar cambios en la cohesión social. Se parte de la hipótesis de que la distancia entre la situación actual y un nivel alto de cohesión puede reducirse mediante intervenciones específicas o por la evolución natural de las interacciones comunitarias. Uno de los objetivos centrales es monitorear esta evolución y orientar políticas públicas o acciones focalizadas a escala vecinal. Se realizó el cálculo muestral a escala de barrio para realizar las encuestas definiendo un grado de precisión ( $\pm 5\%$ ), un nivel de confianza (95 %) y una desviación estándar (0,5), utilizando herramientas en línea del tipo Qualtrics, que garantiza la representatividad estadística de los resultados. Para Acindar se incluyó el casco histórico, con un total de 369 viviendas (1133 habitantes aproximadamente). En Zona Cero, se consideró el polígono del Plan N°6142, con 203 viviendas (660 habitantes aproximadamente). Los datos se obtuvieron de fuentes oficiales, catastros y relevamientos *in situ*.

## RESULTADOS

Se presentan a continuación los resultados de la investigación, basados en cada aspecto desarrollado en la metodología.

### ***Diagnóstico del comportamiento térmico de los casos de estudio***

Se presentan en la Tabla 1 los comportamientos térmicos del día seleccionado por ser el de mayor estabilidad meteorológica dentro del periodo monitoreado, correspondiente al día 09/02/2025. Los resultados se muestran de acuerdo a la escala de abordaje, en primer lugar, se contrastan los comportamientos del CVU, luego del centro de manzana vegetado (CDMv), y por último del centro de manzana no vegetado (CDMnv). Al analizar la información se detecta que:

- Contraste comportamiento CVU: La temperatura máxima del aire en el CVU de Zona Cero es 0.5°C más elevada que en Acindar, las mínimas son iguales, y con respecto a la temperatura promedio esta se mantiene más fresca 0.3°C en Zona Cero.
- Contraste comportamiento CDMv: La temperatura máxima del aire en Zona Cero es 1.0°C más fresca que en Acindar, con respecto a la temperatura mínima y promedio esta se mantiene más fresca en Acindar, 2.6 y 1.0°C respectivamente.
- Contraste comportamiento CDMnv: La temperatura máxima del aire de Zona Cero es 0.2°C más fresca que en Acindar, con respecto a la temperatura mínima y promedio esta se mantiene más fresca en Acindar, 4.3 y 1.3°C respectivamente.

*Tabla 1. Comportamiento térmico de las manzanas monitoreadas, y diferencias térmicas*

| Temp (°C) | Zona Cero CVU | Barrio Acindar CVU | $\Delta$ | Zona Cero CDMv | Barrio Acindar CDMv | $\Delta$ | Zona Cero CDMnv | Barrio Acindar CDMnv | $\Delta$ |
|-----------|---------------|--------------------|----------|----------------|---------------------|----------|-----------------|----------------------|----------|
| Máx.      | 43.7          | 43.2               | 0.5      | 38.0           | 39.0                | -1.0     | 36.5            | 36.7                 | -0.2     |
| Mín.      | 24.9          | 24.9               | 0.0      | 26.1           | 23.5                | 2.6      | 27.2            | 22.9                 | 4.3      |
| Prom.     | 31.7          | 32.0               | -0.3     | 31.3           | 30.3                | 1.0      | 30.9            | 29.6                 | 1.3      |

En términos generales, se visualiza que en los CVU el comportamiento es similar, las diferencias más significativas se observan en las temperaturas máxima y promedio. Al comparar los comportamientos de los CDM; se detecta que en las máximas Zona Cero se mantiene más fresco, lo que se explica por la mayor superficie de CVU y exposición, lo que causa que la inercia térmica de los materiales que absorben la radiación retrasen la elevación de la temperatura del aire, pero en las mínimas y promedios el caso Acindar es más fresco, lo que pone de relevancia el efecto del encajonamiento del CVU, y el menor sellamiento de suelo vinculado a su materialidad, que promueve los procesos de enfriamiento debido a la menor acumulación de calor.

### ***Determinación del ICSV***

A continuación, la tabla 2 muestra los valores obtenidos del ICSV hasta la fecha de envío de este trabajo (11/08/2025). Es importante aclarar que la construcción de este índice aún se encuentra en proceso, y que el tamaño de la muestra obtenida hasta el momento seguirá en aumento -121 respuestas en Acindar y 28 en Zona Cero-. Se puede observar que el ICSV es mayor a 6 en ambos conjuntos habitacionales (6.74 en Acindar y 6.49 en Zona Cero). Este dato implica que el tejido social de las comunidades se encuentra en construcción, y que denota un margen considerable para fortalecerse. El mayor reto está en propiciar un comportamiento participativo de la comunidad, siendo éste el componente del índice que registra los menores niveles en ambos conjuntos de vivienda. El registro del eje “participación” en Acindar es menor (4.52), lo cual puede estar vinculado al hecho de que en Zona Cero (5.68), al momento de la adjudicación de las viviendas se les invita a los vecinos de la tipología triplex -a quienes les corresponden las cocheras del centro de manzana- a un curso de capacitación para consorcistas de barrios sociales, de manera que en un inicio se habían conformado consorcios y los vecinos comenzaron a “autoorganizarse” sin intervención de las oficinas de vivienda. Con el tiempo estos consorcios fueron desapareciendo debido a diferencias en los intereses particulares entre los habitantes, donde a la actualidad solo quedan algunos grupos de vecinos auto-organizados ante la necesidad de resolver inconvenientes y conflictos derivados de la ausencia de los entes de gestión en el seguimiento pos-ocupacional de las viviendas entregadas.

*Tabla 2. Determinación del ICSV en Acindar y Zona Cero*

| Ubicación | Índice general | Confianza | Pertenencia | Identidad | Participación |
|-----------|----------------|-----------|-------------|-----------|---------------|
| Acindar   | 6.74           | 7.56      | 8.27        | 7.67      | 4.52          |
| Zona Cero | 6.49           | 6.68      | 7.68        | 5.76      | 5.68          |

Si bien se observa en la Tabla 2 que el eje más bajo corresponde a la “participación” en ambos conjuntos, según la encuesta realizada, un 90% (Acindar) y un 87% (Zona Cero) de los vecinos manifestó estar dispuesto a trabajar en beneficio de su comunidad y un 92.5% (Acindar) y un 60.8% (Zona Cero) de las personas respondió que sus vecinos lo auxiliarían en caso de peligro. En contraste con los resultados observados sobre el eje “participación”, el sentido de “pertenencia” es uno de los indicadores más elevados dentro del ICSV de ambos casos (8.27 versus 7.68, Acindar y Zona Cero).

A partir de los datos relevados en las entrevistas se puede inferir que la percepción de seguridad y la calidad de los espacios públicos influyen en el nivel de cohesión social que caracteriza a una comunidad, y viceversa. Los vecinos que habitan en el conjunto de viviendas que muestran los niveles más altos de cohesión social manifiestan sentirse más seguros y tener una mejor percepción de la calidad de los espacios públicos de su comunidad, en comparación con aquellos que forman parte de comunidades menos cohesionadas. En cuanto a la percepción de seguridad, un 42.2% (Acindar) y un 21.7% (Zona Cero) de los vecinos que habitan en los conjuntos habitacionales estudiados manifiesta que le confiaría el cuidado de menores a alguno de sus vecinos o el cuidado de la casa, 76% (Acindar) y 47.8% (Zona Cero). Sólo el 43.5% dice que confía en sus vecinos en Zona Cero mientras que en Acindar el número sube a un 90%. En relación a aquellos que tienen acceso al centro de manzana en Acindar un 75.7% menciona utilizarlo “siempre” o “de manera regular”, y en un 60% en Zona Cero. Finalmente, un 92.5% de los vecinos de Acindar lo consideran un buen lugar para vivir, y en Zona Cero un 73.9%.

### ***Análisis cualitativo de la interrelación entre morfología del conjunto de viviendas, comportamiento térmico exterior, e ICSV***

A continuación, se mencionan algunas observaciones y análisis de los resultados obtenidos:

- La relación entre la morfología del conjunto de viviendas y el ICSV muestra que cuando los espacios físicos se reducen impactan sobre el eje “participación” ya que propician posibles conflictos. Es decir, a menor superficie de uso común, mayores son las percepciones de conflictos dentro de la manzana. En este caso se verifica que Acindar tiene un 30% más de espacio común y su eje “participación” es menor, poniendo en relevancia que en espacios de mayor superficie los conflictos de disputa del dominio sobre el escaso territorio disponible son menores propiciando los ejes de “identidad”, “confianza” y “pertenencia”.
- La relación entre el ICSV y la mixtura del perfil social de los habitantes se refleja en los ejes de “identidad”, “confianza” y “pertenencia” (7.67–5.76, 7.56–6.68, 8.27–7.68 en Acindar versus Zona Cero, respectivamente). Se observa que existe una diferencia en la gestión, específicamente en lo que respecta al destino y adjudicación de viviendas, donde uno de los casos presenta un grupo social heterogéneo vinculado a una diferencia de origen y el otro un grupo social homogéneo, hecho que favorece en aumentar los ejes descritos. Zona Cero fue desarrollado como parte de programas provinciales de vivienda y las unidades se han adjudicado a distintos colectivos —miembros de fuerzas de seguridad, trabajadores del ámbito de salud, educación, realojamiento de asentamientos irregulares, etc.— en sucesivas entregas, y con una mayor rotación por venta o alquiler. Este proceso favorece el desconocimiento entre vecinos y reduce la sensación de pertenencia por manzana, fenómeno que se ve acrecentado por ser un conjunto de mayor número de unidades habitacionales, de mayor densidad, y de desconexión espacial respecto al espacio público. En Acindar, en cambio, las viviendas fueron originalmente construidas y asignadas por la empresa para sus obreros y empleados, generando un perfil social homogéneo. Aunque con el tiempo muchas de las viviendas pasaron por sucesión familiar y algunos adjudicatarios originales ya no viven, la transmisión intergeneracional y la escasez de alquileres han contribuido a consolidar la identidad y la confianza comunitaria en el barrio, aún más por manzana.
- La relación entre la organización espacial o las soluciones tipológicas —como en el caso del triplex— y el ICSV condiciona las formas de expansión, apropiación y vínculo social con el exterior de la vivienda, incidiendo en el eje de la “confianza”. En Zona Cero, ninguna vivienda cuenta con acceso directo al centro de manzana, lo que dificulta la apropiación y genera una pérdida de pertenencia respecto a ese espacio común. En cambio, en Acindar, todas las unidades se vinculan al área compartida, salvo las ubicadas en las esquinas, que carecen de acceso directo.

- La relación entre las condiciones térmicas, estado del centro de manzana, e ICSV; permite inferir que existe un detrimento en las posibilidades de enfriamiento nocturno en el caso de Zona Cero (2.6°C más cálido que Acindar) debido a la poca cantidad de forestación existente, a la diferencia en la compacidad, a pesar de la orientación más favorable en Zona Cero. En este último caso sólo existen 2 forestales en el espacio de uso común —lo que produce una mayor acumulación térmica diurna, disminuyendo las posibilidades de intercambio radiativo nocturno—; a diferencia de Acindar que cuenta con 44 ejemplares en buen estado fitosanitario. En términos de compacidad Acindar mantiene una estructura más abierta de viviendas unifamiliares de un nivel, lo que favorece los procesos de enfriamiento radiativo y convectivos nocturnos, y disminuye la acumulación de calor durante el día. Por otra parte, durante el periodo diurno Acindar denota un sobrecalentamiento en el punto monitoreado del CDMv (1°C más cálido que Zona Cero), esto en relación a que la morfología del conjunto sufrió alteraciones por medio de ampliaciones, aumento de las superficies selladas, y ocupación de los vacíos en cada lote (36.75% versus 27.16%). Sumado a la exposición del Este-Oeste del espacio abierto que aumenta su cantidad de radiación solar recibida. Estas condicionantes no solo se manifiestan en los comportamientos térmicos, sino también en la implicancia social al alterar las condiciones originales donde los límites de la propiedad privada eran setos verdes bajos. Otro factor que se denota es el comportamiento del punto monitoreado en CDMv que resulta en temperaturas mínimas de 4.3°C más cálidas en Zona Cero que en Acindar, por la falta de infraestructuras de servicios, como por ejemplo suministro de agua, que permitan enveredecer esta área. Siendo esta situación un reflejo directo en los ejes “pertenencia” e “identidad”.

## CONCLUSIONES

La morfología de la ciudad constituye un factor determinante en la eficiencia de los sistemas urbanos y en su sostenibilidad a largo plazo. El AMR presenta un modelo de ciudad fragmentada y sellada, se propone entonces avanzar hacia un enfoque integral e inter-escalar del hábitat popular que considere la interacción entre morfología urbana, imaginarios sociales, pactos vecinales y sostenibilidad ambiental, con el objetivo de construir entornos que no solo alojen, sino que sostengan y dignifiquen la vida cotidiana. En Argentina, las políticas habitacionales centradas en la cantidad de unidades construidas han descuidado aspectos fundamentales como, la eficiencia energética, la calidad ambiental y la sostenibilidad del hábitat. Esta mirada parcial ha dado lugar a conjuntos habitacionales vulnerables frente al cambio climático, con escasa integración urbana y una débil apropiación comunitaria. En este sentido, los centros de manzana de uso vecinal se presentan como un soporte espacial de carácter simbólico, social y ambiental ya que, a partir de su correcta configuración y gestión, resultan estratégicos para disminuir los efectos del sobrecalentamiento urbano, reconstruir vínculos comunitarios y revalorizar la vida en común. En este marco, el trabajo abordó e integró las dimensiones relativas al comportamiento térmico exterior y a la cohesión social vecinal en conjuntos de vivienda estatal con participación público-privada. Los primeros hallazgos encontrados demuestran que existen interrelaciones entre la morfología del conjunto de viviendas y el ICSV, entre el ICSV y la mixtura del perfil social de los habitantes de cada manzana analizada, entre la organización espacial y el ICSV, y entre las condiciones térmicas, estado del centro de manzana, e ICSV. De manera particular se destaca que: (i) a menor superficie de uso común, mayores son las percepciones de conflictos dentro de la manzana, (ii) la mixtura del perfil social de los habitantes en cada barrio se refleja en los ejes de “identidad”, “confianza” y “pertenencia”, (iii) la organización espacial condiciona las formas de expansión, apropiación y vínculo social con el exterior de la vivienda, incidiendo en el eje de la “confianza”, (iv) un mal estado de conservación y mantenimiento del centro de manzana —sellado, ampliaciones, pocas especies forestales, y falta de infraestructuras de servicios— disminuyen las posibilidades de enfriamiento nocturno y producen sobrecalentamiento diurno, esta situación también impacta en lo social en los ejes “pertenencia” e “identidad”, al alterar las condiciones originales de los límites de la propiedad privada con el espacio de uso común que eran setos verdes o mallas metálicas que facilitaban la interacción.

**Limitaciones de trabajo presentado:** Los resultados reportados en lo social corresponden a un recorte temporal que ha permitido analizar 149 encuestas, en la medida en que la muestra aumente posiblemente se fortalezcan los procesos de análisis; en lo térmico es necesario ampliar el número de monitoreos en periodos y en estaciones para fortalecer los hallazgos y las interrelaciones entre estos aspectos.



## AGRADECIMIENTOS

El equipo desea expresar su agradecimiento a la Dra. Rita Abalone, directora del Laboratorio de Eficiencia Energética de la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura de la UNR, por su generosa disposición y valioso aporte tanto por el instrumental como así también por la vinculación con personal del IFIR-CONICET y de la Universidad Nacional de Rosario, como herramientas fundamentales para el avance de la investigación.

## REFERENCIAS

- Acket, S., Borsenberger, M., Dickes, P. y Sarracino, F. (2011). Measuring and validating social cohesion: a bottom-up approach. Recuperado en: [https://www.researchgate.net/publication/254424735\\_Measuring\\_and\\_validating\\_social\\_cohesion\\_a\\_bottom-up\\_approach](https://www.researchgate.net/publication/254424735_Measuring_and_validating_social_cohesion_a_bottom-up_approach)
- Aguilar, J.P., Carlos Añó, V.A., y Sánchez, J. (2006). Urban growth dynamics (1956-1998) In mediterranean coastal regions. The case of Alicante, Spain. Recuperado en: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/1-4020-3760-0\\_14](https://link.springer.com/chapter/10.1007/1-4020-3760-0_14)
- Ballester Espigares, R. (2013). Calle e Interior de manzana. Mecanismos de transición en la ciudad consolidada: Manzana 13, Rue des Suisses, Londres-Villarroel. Tesis (Master), E.T.S. Arquitectura.
- Betanzo, A., Alcalá, E. y Aldana, L. (2015). Bases para la Construcción de un Índice de Cohesión Social Vecinal. Fundación Hogares y México Evalúa; Michoacán, México. Recuperado en <https://www.mexicoevalua.org/bases-para-la-construccion-de-un-indice-de-cohesion-social-vecinal>
- Cantón, M. A. y C. de Rosa (2004). Centros libres de manzana en el área metropolitana de Mendoza. Análisis y diagnóstico de la condición del espacio abierto. Recuperado en [https://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/81685/Documento\\_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1](https://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/81685/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1)
- Cárdenas Jirón, L. e Higuera García, E. (2015). El barrio solar: reflexiones y aplicaciones en doce ciudades iberoamericanas. Recuperado en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/139678>
- Carmona, M., Freeman, J. y Woolley, H. (2004). The Value of Public Space: How High Quality Parks and Public Spaces Create Economic, Social and Environmental Value.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) y Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID) (2022). Metodología de medición de la cohesión social en América Latina y el Caribe. Recuperado en <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/9eb8da83-7d61-4a91-9fba-143a4a54d6ca/content>.
- Dempsey, N. (2008). Quality of the Built Environment in Urban Neighbourhoods. Recuperado en [https://www.researchgate.net/publication/233137101\\_Quality\\_of\\_the\\_Built\\_Environment\\_in\\_Urban\\_Neighbourhoods](https://www.researchgate.net/publication/233137101_Quality_of_the_Built_Environment_in_Urban_Neighbourhoods)
- EPEV-CURDIUR (1991 y 2001). Vivienda financiada por el estado en Rosario 1928 / 1988 y 1989 / 1999. Recuperado en la Biblioteca de la Facultad de Arquitectura, Planeamiento y Diseño, Universidad Nacional de Rosario.
- Forrest, R. y Kearns, A. (2001). Social cohesión, social capital and the neighborhood. Recuperado en: [https://www.academia.edu/2893042/Social\\_cohesion\\_social\\_capital\\_and\\_the\\_neighbourhood](https://www.academia.edu/2893042/Social_cohesion_social_capital_and_the_neighbourhood)
- Higuera-García, E., & Ezquiaga-Domínguez, J. M. (2022). Barrios saludables, desde la renovación y el diseño de su espacio público. Recuperado en: <https://recyt.fecyt.es/index.php/CyTET/article/view/93409>
- Infomapa (2025). Recuperado en <https://infomapa.rosario.gov.ar/emapamapa.htm#>
- INDEC (2025). Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2022. Recuperado en: <https://www.indec.gob.ar/indec/web/Nivel4-Tema-2-41-165>
- Lois González, R.C., González Pérez, J.M. y Irazábal, C. (2022). The Study of Latin American and Caribbean Cities in the 21st Century. The Routledge Handbook of Urban Studies in Latin America and the Caribbean. Cities, Urban Processes, and Policies, pág. 3-12.
- Maldonado González, F. M. (2019). Efecto de la morfología urbana sobre el fenómeno isla de calor en el espacio público, caso de estudio centro de manzana del barrio Solanda en el Sur de la ciudad de Quito. Recuperado en <https://repositorio.puce.edu.ec/items/75648fc5-d1c5-4708-bc52-f54e7f8ce406/full>



- Marsh, W. M. (1998). Landscape Planning: Environmental Applications. Recuperado en <https://archive.org/details/landscapeplannin03edmars>
- Murcia, M. E. (2012). Las Manzanas Comunitarias, hacia un cambio de paradigma. Caso de Estudio: Corrientes Capital, Argentina. Recuperado en [https://bdigital.uncuyo.edu.ar/objetos\\_digitales/13423/09murcia-proyeccion13.pdf](https://bdigital.uncuyo.edu.ar/objetos_digitales/13423/09murcia-proyeccion13.pdf)
- Naciones Unidas CEPAL, Agencia Española de Cooperación Internacional, Secretaría General Iberoamericana, 2004. Cohesión social: inclusión y sentido de pertenencia en América Latina y El Caribe. Recuperado en <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/1e3b997b-2ec9-49be-903a-0ef9b797d5a8/content>
- Oke, T. & Canada (2006). Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites. Recuperado en: [https://www.researchgate.net/publication/265347633\\_Initial\\_guidance\\_to\\_obtain\\_representative\\_meteorological\\_observations\\_at\\_urban\\_sites](https://www.researchgate.net/publication/265347633_Initial_guidance_to_obtain_representative_meteorological_observations_at_urban_sites)
- ONU-Habitat, & Ayuntamiento de Madrid. (2016). Jornadas de trabajo: Regeneración urbana. [https://unhabitat.org/sites/default/files/documents/2019-06/urban\\_regeneration.pdf](https://unhabitat.org/sites/default/files/documents/2019-06/urban_regeneration.pdf)
- Quiceno-Torres, C. (2020). Centros de manzana como integradores del espacio público. Universidad Católica de Colombia. Recuperado en: <https://hdl.handle.net/10983/25032>
- ReNaBaP (2025). Recuperado en <https://www.argentina.gob.ar/obras-publicas/sisu/renabap>
- Salgado, M; Cáceres, S.; Gurría, L; Gancedo, N; Basuino, M.; Solari, C.; Báncora, C.; Hanow, R.; Re, J. (2017). Estudio del uso y apropiación de espacios colectivos de la vivienda social en un área de reciente urbanización: Parque Habitacional Ibarlucea. Recuperado en <https://rephip.unr.edu.ar/server/api/core/bitstreams/9c918a96-6774-44c4-853f-4c8493537ace/content>
- Sánchez Moya, M. y Guillén, A. (2024). No house without a garden: C. Th. Sørensen's collective housing landscape. Recuperado en [https://www.researchgate.net/publication/381185690\\_No\\_house\\_without\\_a\\_garden\\_C\\_Th\\_Sorensen%27s\\_collective\\_housing\\_landscape/fulltext/66690b7ba54c5f0b945ffdf/381185690\\_No\\_house\\_without\\_a\\_garden\\_C\\_Th\\_Sorensen%27s\\_collective\\_housing\\_landscape.pdf](https://www.researchgate.net/publication/381185690_No_house_without_a_garden_C_Th_Sorensen%27s_collective_housing_landscape/fulltext/66690b7ba54c5f0b945ffdf/381185690_No_house_without_a_garden_C_Th_Sorensen%27s_collective_housing_landscape.pdf)
- Sørensen, C. TH. (1939). Om haver. Copenhagen: Emil Wienes Bogforlag, 1939. p. 146
- Trepici, E., Maghelal, P. y Azar, E. (2020). Effect of densification and compactness on urban building energy consumption: Case of a Transit-Oriented Development in Dallas, TX. Sustainable Cities and Society, pág. 56.
- Tumini, I. (2012). El microclima urbano en los espacios abiertos. Estudio casos en Madrid. Recuperado en [https://oa.upm.es/14893/1/IRINA\\_TUMINI.pdf](https://oa.upm.es/14893/1/IRINA_TUMINI.pdf)
- UN-Habitat (2020). Informe Mundial de Ciudades 2020: El valor de la urbanización sostenible. Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos. Recuperado en: <https://unhabitat.org/world-cities-report-2020-the-value-of-sustainable-urbanization>
- Vaquerizo Gómez, A. (2015). Espacios verdes comunitarios. Cómo potenciar la resiliencia urbana. Recuperado en <https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag-56050>

## **MICROCLIMATIC AND SOCIAL ANALYSIS OF CITY BLOCKS AS AN URBAN REGENERATION STRATEGY**

**ABSTRACT:** The growth of the city of Rosario has given rise to diverse urban fabrics, whose morphological differences imply completely different thermal and social behaviors. This work diagnoses the thermal behavior of block centers in iconic state-run housing complexes with public-private partnerships in the city of Rosario-Santa Fe during the summer. It also analyzes the relationship between housing and its use and appropriation. This information contributes to assessing their potential as an urban regeneration strategy, impacting both exterior/interior thermal performance and neighborhood social cohesion. In this regard, an analysis is conducted to identify correlations between urban form and thermal and social impacts, based on the recording of urban indicators and their comparison with data collected on-site. This approach makes it possible to propose improvements and comparatively evaluate alternatives, adapted to specific local contexts. The proposal is to enhance shared green spaces as active environmental and social elements, capable of impacting the sustainability of the urban environment, ultimately developing a new application model for future housing developments.

**Keywords:** public housing; common spaces; urban indicators; microclimate monitoring; neighborhood social cohesion.

## DESEMPEÑO ACÚSTICO DE MANTOS DE LANA GRUESA DE OVEJA PARA APLICACIONES EN ARQUITECTURA SOSTENIBLE

Alejandra Núñez Berte<sup>1</sup>, Nilda Vechiatti<sup>2</sup>, Federico Iasi<sup>2</sup>, Germán Galarza<sup>2</sup>, Daniel Tomeo<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Maestría SAU - FADU - UBA, Buenos Aires,

e-mail: [anunezberte@gmail.com](mailto:anunezberte@gmail.com)

<sup>2</sup> Laboratorio de Acústica y Luminotecnia de la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires

e-mail: [ciclal@gba.gob.ar](mailto:ciclal@gba.gob.ar)

**RESUMEN:** En el marco de la transición hacia la construcción sostenible y la descarbonización del sector, la valorización de materiales de origen natural y baja huella de carbono se presenta como una estrategia clave. Este trabajo analiza el desempeño acústico de mantos de lana gruesa de oveja producidos en la provincia de Buenos Aires, aprovechando un subproducto sin valor textil y contribuyendo tanto a la reducción de residuos como al desarrollo socioeconómico local. Se realizaron ensayos en laboratorio para caracterizar sus propiedades como material fonoabsorbente y su capacidad de mejorar el aislamiento acústico a ruido aéreo en tabiques de construcción en seco, siguiendo normas nacionales e internacionales. Los resultados muestran que la lana de oveja presenta un comportamiento típico de absorbentes fibrosos tradicionales, con valores del coeficiente de absorción sonora ponderado  $\alpha_w$  de 0,45 y 0,65 según el espesor del manto. En aislamiento acústico, la incorporación de estos mantos mejoró de forma significativa el desempeño acústico de los tabiques, aumentando su índice de reducción sonora ponderado  $R_w$  de 36 dB a 41 dB para el manto de 35 mm, y a 42 dB para el manto de 70 mm. Algunos de estos valores son compatibles con las recomendaciones de la norma IRAM 4044 para aislamiento a ruido aéreo, evidenciando su potencial como alternativa sustentable en comparación con otros fonoabsorbentes convencionales, con beneficios adicionales en términos ambientales y de salud.

**Palabras clave:** construcción sostenible, lana de oveja, aislamiento acústico, fonoabsorción, economía circular.

### INTRODUCCIÓN

La crisis climática exige soluciones sostenibles que se alineen con los principios de la economía circular y consideren el impacto ambiental a lo largo de todo el ciclo de vida de los productos y procesos. El sector de la construcción, por su alto peso en el consumo global de recursos y energía, es uno de los ámbitos donde estas acciones resultan más urgentes.

En un comunicado de prensa, United Nations Environment Programme (UNEP, 2025) señaló que el año 2023 marcó un hito: por primera vez, el sector de la construcción logró reducir sus emisiones. Este avance se atribuye, entre otros factores, a la adopción de códigos energéticos obligatorios para edificios alineados con el objetivo de emisiones netas cero, la implementación de estándares de rendimiento vinculantes y el aprovechamiento de inversiones en eficiencia energética. Gracias a ello, la intensidad energética del sector disminuyó casi un 10% y la proporción de energías renovables en la demanda final aumentó cerca de un 5%.

En el Informe Anual 2024–2025 del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA/UNEP, 2025), se destaca que otras estrategias, como la construcción circular, los contratos de arrendamiento verde, la modernización y rehabilitación energética de edificios existentes, y el uso prioritario de materiales con baja huella de carbono, pueden contribuir a reducir aún más el consumo



energético, optimizar la gestión de residuos y disminuir las emisiones globales. A pesar de estos avances, el sector sigue siendo un factor clave en la crisis climática, ya que consume el 32% de la energía mundial y contribuye al 34% de las emisiones mundiales de CO<sub>2</sub>. Además, depende de materiales como el cemento y el acero, responsables del 18% de las emisiones mundiales de CO<sub>2</sub> y una fuente importante de residuos de la construcción (UNEP, 2025).

En la Cumbre de Acción Climática de la ONU (United Nations Climate Action Summit, UNCAS), celebrada el 23 de septiembre de 2019 en Nueva York, se presentó la iniciativa Zero Carbon Buildings for All, cuyo objetivo es lograr que todos los edificios nuevos operen con emisiones netas de carbono cero para 2030 y que los existentes alcancen esta meta en 2050. Ese mismo año, se publicó el documento “Bringing embodied carbon upfront” (Adams et al., 2019), en el que se subraya la urgencia de abordar no solamente el carbono operacional de los edificios, sino también el carbono incorporado en los materiales de construcción, considerando así su huella total.

En esta línea, están emergiendo nuevos modelos e innovaciones orientados a la descarbonización en la producción de materiales para la construcción. Ejemplos de ello son los materiales biobasados provenientes de la tierra, la silvicultura o los desechos agrícolas, así como aquellos de producción local con baja huella de carbono. Además de reducir emisiones, estos materiales pueden secuestrar carbono, transformando a los edificios en verdaderos sumideros de carbono, lo que constituye uno de los enfoques biogénicos más prometedores para incrementar el almacenamiento de carbono en el medio construido (Bjånesøy et al., 2023).

El sector de la construcción es el principal consumidor de energía y uno de los mayores responsables de las emisiones de carbono asociadas. Además, es el mayor consumidor global de recursos y materias primas, utilizando más del 50 % de la materia extraída del planeta cada año, según la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (Organisation for Economic Co-operation and Development, OECD, 2018). Dentro de estos recursos, los minerales no metálicos —como arena, grava, piedra caliza y roca triturada— representan más de la mitad del volumen total de materiales consumidos, y su extracción y procesamiento generan gigatoneladas de emisiones de CO<sub>2</sub> anualmente.

Se estima que el 70 % de las emisiones asociadas a los materiales de construcción podrían reducirse si se utilizaran materiales reciclados en lugar de aquellos producidos a partir de materia prima virgen. De hecho, la economía circular tiene el potencial de disminuir las emisiones globales en un 38 % para 2050, al reducir la demanda de acero, aluminio, cemento y plástico. Según la Ellen MacArthur Foundation, en el informe *Cities and the Circular Economy: Deep Dive* (2019), esta transición no solamente contribuiría a la mitigación climática, sino que también fomentaría áreas urbanas más habitables, productivas y sostenibles.

Por otra parte, los residuos sólidos de la construcción y demolición (Construction and Demolition Waste, CDW) representan aproximadamente entre el 30 % y el 40 % del total de residuos sólidos generados a nivel mundial (Petrović et al., 2024; Soto-Paz, 2023). En la Unión Europea, estos residuos constituyen el flujo de desechos más voluminoso, y la legislación establece que al menos el 70 % de los residuos no peligrosos de construcción y demolición deben ser reutilizados, reciclados u objeto de otras formas de valorización material (European Commission, 2018; European Environment Agency, 2020).

En este contexto, la innovación en materiales y sistemas constructivos reutilizables se presenta como una alternativa clave para reducir residuos y descarbonizar la producción en la construcción. Actualmente, existen diversas soluciones industrializadas que cuentan con ensayos y certificaciones equivalentes a las de los materiales convencionales. De hecho, hace años que algunos de estos materiales innovadores ya están contemplados y caracterizados en normativas reconocidas, como es el caso de los *Cuadernos de Rehabilitación, P1 Productos y Materiales*, del Instituto Valenciano de Edificación (2019). Este documento establece valores de referencia para materiales tradicionales y biológicos, incluyendo aislantes térmicos como cáñamo, corcho, lana de oveja, algodón, fibras de coco, lino y virutas de madera, facilitando así su incorporación segura y eficiente en la rehabilitación energética.

Los materiales aislantes dentro de las construcciones cumplen diversas funciones: térmicas, fonoabsorbentes, transmisión área de ruido, comportamiento al fuego, higroscopicidad, etc., y la caracterización de las mismas bajo ensayos que cumplen normativas es lo que permite compararlos.

El confort acústico del hábitat y su impacto en la salud de los habitantes, tanto ruido interior como exterior, para viviendas en altura en la ciudad de San Miguel de Tucumán, es analizado por Cazón Narváez et al (2024) y los resultados muestran niveles de ruido superiores a los recomendados por la OMS, indicando la necesidad de mejorar el diseño y aislamiento acústico en estas construcciones para asegurar el bienestar de los habitantes.

La ausencia de un adecuado acondicionamiento acústico, ya sea por deficiencia en la capacidad de fonoabsorción de un espacio o por la transmisión no controlada del sonido entre recintos adyacentes, genera impactos significativos en el bienestar humano. Entre sus principales consecuencias se encuentran la disminución de la inteligibilidad del habla y las dificultades en la comunicación, que conllevan a malentendidos y aumento del esfuerzo vocal. Asimismo, se observa una afectación directa en los procesos de atención, concentración y aprendizaje, reduciendo el rendimiento académico y laboral.

En Argentina la norma IRAM 4044/2015: *Acústica - Protección contra el ruido en edificios. Requisitos de aislamiento acústico mínimo. Método de medición y clasificación. Cerramientos y aberturas, verticales y horizontales*, establece exigencias mínimas de aislamiento acústico para reducir las molestias entre recintos contiguos, considerando transmisión por vía aérea y por vía estructural. No es de cumplimiento obligatorio, pero puede ser tenida en cuenta como criterio de diseño. Esta norma define dos niveles de aislamiento acústico: la Escala I, que asegura protección básica de la salud, aunque el ruido externo o vecino sea perceptible; y la Escala II, que brinda mayor confort, favoreciendo descanso, privacidad y actividades intelectuales, aunque ciertos sonidos (p. ej., instrumentos musicales) puedan oírse. El uso de equipos del edificio no debe afectar a terceros si están bien instalados y mantenidos.

Se destaca que, desde el punto de vista de la salud, la exposición prolongada a entornos acústicamente inadecuados puede provocar cefaleas, fatiga auditiva, estrés fisiológico y, en casos extremos, pérdida auditiva. En el ámbito psicológico y emocional, el ruido excesivo o mal controlado se asocia con irritabilidad, ansiedad, sensación de falta de privacidad y disminución de la satisfacción con el entorno, repercutiendo negativamente en la calidad de vida y en las relaciones interpersonales.

Numerosas investigaciones analizan los problemas de comunicación y aprendizaje por deficiente acondicionamiento acústico de las construcciones, como señala el estudio de Durán Urón et al (2021) “Condiciones acústicas en las aulas de clase: una revisión de la literatura” sobre normas y criterios utilizados en la acústica de los salones para clases y las variables de estudio: tiempo de reverberación, inteligibilidad de la palabra y ruido de fondo, y concluye que el 37,8% de las causas de discomfort acústico en las aulas estuvieron asociadas a la ausencia de materiales fonoabsorbentes. La cantidad de estudios en calidad acústica de los recintos educativos es significativa, y éstos muestran la necesidad de mejoras en los aspectos constructivos de las instituciones.

Nuevos parámetros se incorporan para propiciar una arquitectura ambientalmente consciente y conformar un hábitat con alineado con la meta Net Zero, entre ellos la búsqueda de materiales alternativos y sistemas constructivos que alcancen o superen las propiedades y características de los convencionales considerando su huella de carbono y ciclo de vida.

Dentro de las alternativas de materiales fibrosos de origen natural, diversos estudios demuestran las capacidades de la lana de oveja para aplicaciones no textiles, especialmente como aislante térmico y como material fonoabsorbente. El interés en los materiales de construcción sustentables se incrementó en los últimos años, para la lana de oveja en particular hay numerosas investigaciones acerca de usos de la lana gruesa, por ejemplo ya en el año 2012, Zach et al. (2012) recopiló investigaciones y desarrolló un trabajo acerca de las excelentes propiedades térmicas y acústicas de la lana de oveja con distintas densidades, comparables con aislantes térmicos convencionales y bio-aislantes, demostrando buenos resultados con un material más natural y sin aspectos perjudiciales para la salud.

En la provincia de Buenos Aires los productores de ovejas destinadas al consumo de carne enfrentan el problema de la necesidad de esquila a los animales por cuestiones sanitarias y de gestionar el residuo que constituye esa lana sin valor para la industria textil (Núñez Berté, et al., 2022). El presente estudio analiza el comportamiento acústico de los mantos de lana de oveja producidos en dicha provincia, donde ese residuo ahora es utilizado como materia prima, contribuyendo no solamente desde el aspecto ambiental sino también con el consiguiente impacto socio económico.

## EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD FONOABSORBENTE

Con el objeto de caracterizar sus propiedades acústicas, se realizaron ensayos a mantos de lana gruesa de oveja, de 28 micrones a 30 micrones de grosor de pelo, de color variado, con tratamiento de sales minerales y proceso textil mecánico, de dos espesores promedio: 35 mm y 70 mm. A través de ensayos en las instalaciones del Laboratorio de Acústica y Luminotecnia de la Comisión de Investigaciones Científicas de la provincia de Buenos Aires, LAL-CIC, se les evaluó la capacidad de absorber energía sonora y la capacidad de reducir la transmisión sonora a través de tabiques de construcción en seco.

Para evaluar la propiedad de absorción sonora se realizaron ensayos normalizados en cámara reverberante, siguiendo el procedimiento de la norma IRAM 4065/2019 (equivalente a ISO 354/2003).

La sala reverberante utilizada posee un volumen de 189 m<sup>3</sup>, una superficie total interior de 208 m<sup>2</sup>, y tiene forma de poliedro irregular de 7 caras de base trapezoidal con techo de doble pendiente y planos enfrentados no paralelos. Además, cuenta con 10 difusores sonoros colgados del techo aleatoriamente distribuidos: 5 placas acrílicas de forma rectangular, ligeramente curvadas, de 8 mm de espesor y 1,4 m<sup>2</sup> de superficie, y 5 esferas de poliestireno expandido de 30 mm de espesor y 0,94 m de diámetro.

Se utilizó el método del ruido interrumpido para medir tiempos de reverberación, a partir de los cuales se calculó el coeficiente de absorción sonora  $\alpha_s$  para bandas de tercios de octava. Con estos valores se calcularon los correspondientes coeficientes en bandas de octavas y los parámetros globales según:

- a) Norma ISO 11654:
  - Coeficiente de absorción sonora práctico ( $\alpha_p$ )
  - Coeficiente de absorción sonora ponderado ( $\alpha_w$ )
  - Clase de absorción acústica
- b) Norma ASTM C423-02a:
  - Noise Reduction Coefficient (NRC)
  - Sound Absorption Average (SAA)

De acuerdo con lo establecido en la norma IRAM 4065 cada material fue colocado sobre el piso de la cámara formando un rectángulo de aproximadamente 10 m<sup>2</sup>. En la Figura 1 se puede apreciar la disposición de ensayo del manto de 35 mm de espesor.



*Figura 1: Ensayo en cámara reverberante del Laboratorio LAL-CIC de mantos de lana de oveja*

En la Figura 2 se presentan los valores calculados del coeficiente de absorción sonora práctico para bandas de octavas,  $\alpha_p$  (adimensional), para bandas de octavas comprendidas entre 125 Hz y 4 000 Hz, correspondientes a los dos espesores de mantos ensayados. Además, en la Tabla 1 se pueden apreciar los valores calculados de los parámetros globales:  $\alpha_w$ , Clase de Absorción Acústica, NRC y SAA.

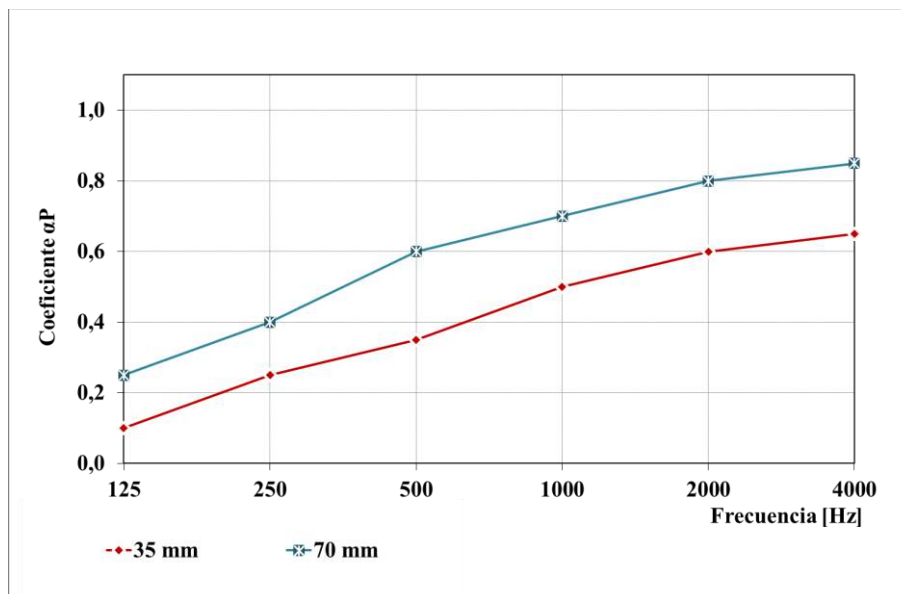


Figura 2: Valores de absorción sonora – Coeficiente  $\alpha_p$  (adimensional)

Tabla 1: Parámetros globales de absorción sonora para dos espesores de mantos de lana

| Parámetros globales       | 35 mm | 70 mm |
|---------------------------|-------|-------|
| $\alpha_w$                | 0,45  | 0,65  |
| Clase de absorción sonora | D     | C     |
| NRC                       | 0,40  | 0,60  |
| SAA                       | 0,42  | 0,63  |

## EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD FONOAISLANTE

Habiéndose verificado su comportamiento como materiales fonoabsorbentes, los mantos de lana gruesa de oveja fueron empleados como relleno en tabiques de construcción en seco, conformando lo que se conoce como “sistema masa-resorte-masa”. Estos tabiques fueron sometidos a ensayos de aislamiento acústico a ruido aéreo, con el fin de evaluar el aporte de dichos mantos fibrosos en la reducción de la transmisión sonora, producto de la absorción de energía acústica dentro de la estructura.

Las pruebas de laboratorio para aislamiento permiten determinar la transmisión de sonido por vía aérea a través de elementos constructivos, obteniendo los valores del Índice de Reducción Sonora R (según la norma IRAM ISO 10140), y los valores de Pérdidas de Transmisión Sonora TL (de acuerdo con la norma ASTM E90). A partir de los valores de R y de TL dependientes de la frecuencia, se calcularon magnitudes globales que describen el desempeño acústico de cada tabique:

- $R_w$  (C; Ctr): índice ponderado de reducción sonora y sus coeficientes de adaptación espectral (Norma IRAM-ISO 717-1)
- STC: Sound Transmission Class (Norma ASTM E413)

Los tabiques ensayados, de 10,3 m<sup>2</sup> de área, se construyeron con una estructura metálica de perfiles de acero galvanizado normalizados (norma IRAM-IAS U 500 243), de 70 mm de ancho, separados 400 mm entre ejes, con banda autoadhesiva de espuma de polietileno en los perfiles perimetrales. En cada cara se fijaron placas de yeso de 12,5 mm de espesor, cuyas uniones fueron tratadas con cinta de papel y



masilla. El perímetro de ambas caras, en el contacto con el marco de ensayo, se selló con silicona. En la Figura 3 se muestran detalles constructivos de uno de los tabiques instalados en las cámaras de transmisión horizontal inferiores del laboratorio.



Figura 3: Ensayo en cámaras de transmisión del Laboratorio LAL-CIC

Se ensayaron 5 tabiques:

- Tabique 1: 1 capa de placas de yeso en cada cara, cámara vacía
- Tabique 2: 1 capa de placas de yeso en cada cara, lana de 35 mm en la cámara
- Tabique 3: 1 capa de placas de yeso en cada cara, lana de 70 mm en la cámara
- Tabique 4: 2 capas de placas de yeso en cada cara, lana de 35 mm en la cámara
- Tabique 5: 2 capas de placas de yeso en cada cara, lana de 70 mm en la cámara

En la Figura 4 se presentan los valores del índice R, en dB, para bandas de octava, obtenidos según IRAM-ISO 10140 (coincidentes con los valores de TL según ASTM E90). Además, en la Tabla 2 se muestran las magnitudes globales.

Tabla 2: Parámetros globales de aislamiento acústico (en dB)

| Parámetros globales (en dB)          | Tabique 1 (simple yeso, vacío) | Tabique 2 (simple yeso, lana 35 mm) | Tabique 3 (simple yeso, lana 70 mm) | Tabique 4 (doble yeso, lana 35 mm) | Tabique 5 (doble yeso, lana 70 mm) |
|--------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| R <sub>w</sub> (C; C <sub>tr</sub> ) | 36 (-3; -8)                    | 41 (-3; -9)                         | 42 (-3; -9)                         | 48 (-4; -10)                       | 49 (-4; -10)                       |
| STC                                  | 36                             | 42                                  | 43                                  | 49                                 | 50                                 |

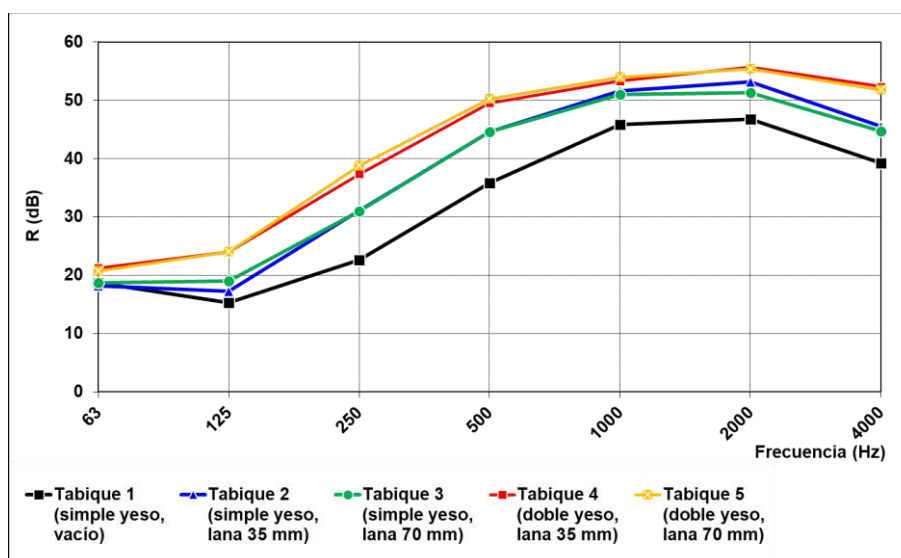


Figura 4: Valores de aislamiento acústico – Índice de reducción sonora (R, en dB)

## RESULTADOS

Los resultados de los ensayos de absorción sonora muestran que el material tiene un comportamiento fonoabsorbente típico de absorbentes disipativos fibrosos tradicionales, con una curva de absorción con forma sigmoidea, con mejor desempeño para frecuencias medias y altas que para frecuencias bajas, y que aumenta al aumentar el espesor del material.

En cuanto a la contribución de los mantos de lana de oveja a la mejora de aislamiento acústico, de la comparación entre tabiques rellenos y vacío, se concluye que la incorporación de mantos fibrosos mejora de forma evidente el aislamiento acústico a ruido aéreo. No se observaron diferencias significativas entre el uso de mantos de 35 mm y de 70 mm de espesor.

A modo de referencia, se pueden tener en cuenta los valores mínimos de aislamiento acústico a ruido aéreo recomendados en la norma IRAM 4044 (ver Tabla 3).

Cabe aclarar que los requisitos de la mencionada norma están expresados en términos del Índice Global de Reducción Sonora Aparente ( $R'_w$ , en dB), que caracteriza el aislamiento logrado entre espacios de edificaciones. Esto se debe a que debe verificarse su cumplimiento mediante la realización de mediciones “in situ” (condiciones en las que hay transmisión directa y por flanco). Mientras que los valores de aislamiento medidos en condiciones de laboratorio son para caracterizar elementos de construcción (tabiques, muros, aberturas, entre otros), pues las mediciones se realizan en instalaciones que permiten despreciar la transmisión por flanco.

De todos los tabiques ensayados, aquellos que tuvieron relleno de lana de oveja podrían utilizarse para cumplir con las recomendaciones de aislamiento de la IRAM 4044, mientras que el que tuvo la cámara vacía, no sería apto.

Tabla 3: Valores mínimos de aislamiento a ruido aéreo recomendados

| DESCRIPCIÓN                                                                                                   | ESCALA I    | ESCALA II   |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-------------|
| VIVIENDAS UNIFAMILIARES y MULTIFAMILIARES                                                                     | $R'_w$ (dB) | $R'_w$ (dB) |
| Entre habitaciones de una misma vivienda o unidad funcional (sin puertas ni ventanas en el tabique divisorio) | 42          | 48          |
| Entre habitaciones de una misma vivienda o unidad funcional (con puertas o ventanas en el tabique divisorio)  | 35          | 41          |
| HOSPEDAJE                                                                                                     |             |             |
| Entre habitaciones                                                                                            | 47          | 53          |
| Entre habitaciones y circulaciones                                                                            | 40          | 46          |
| SALUD                                                                                                         |             |             |
| Entre habitaciones o consultorios, y circulaciones                                                            | 40          | 46          |
| EDUCACIÓN                                                                                                     |             |             |
| Entre aulas y salas similares                                                                                 | 47          | 53          |
| Entre aulas y circulaciones                                                                                   | 47          | 53          |

## CONCLUSIONES

La caracterización acústica de los mantos aislantes de lana de oveja mediante ensayos normalizados permite su comparación con otros materiales tanto para ensamblajes de tabiques como así también para la construcción de paneles para controlar las reflexiones de ruido.

Con respecto a la fonoabsorción, con valores del coeficiente  $\alpha_w$  de 0,45 y 0,65 (para el manto de 35 mm y de 70 mm de espesor, respectivamente), estos materiales pueden ser utilizados para el control de la reverberación de recintos en ensamblajes de paneles con la lana expuesta o detrás de revestimientos perforados. Adicionalmente, aportan la capacidad higroscópica de la lana de oveja, que actúa como regulador higrotérmico, mejorando el confort interior.

La incorporación de mantos de lana rústica de oveja en la cavidad interior de tabiques contruidos con placas de yeso ha dado como resultado un aumento del aislamiento acústico global de dichos tabiques de 5 dB como mínimo. Por ejemplo, el agregado de un manto de 35 mm de espesor produjo un aumento del índice de reducción sonora ponderado  $R_w$  de 36 dB a 41 dB, mientras que cuando el manto fue de 70 mm, el mismo índice aumentó a 42 dB.

Por otra parte, los mantos de lana gruesa de oveja contribuyen a mitigar los impactos ambientales desde el origen hasta su fin de ciclo como así también a mejorar calidad ambiental en el interior de los edificios, y promueven la economía regional.

Con el objetivo de construir edificios sustentables es necesario desarrollar nuevos materiales y sistemas constructivos con bajo impacto en el ambiente y que utilicen materias primas locales. Por este motivo, la presente investigación muestra el potencial de lana gruesa de oveja, un material renovable y disponible en casi todos los climas, para contribuir a la meta Net Zero y crear un hábitat construido natural e inteligente en carbono.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Comisión de Investigaciones Científicas de la provincia de Buenos Aires por el apoyo económico que ha brindado para la realización de este trabajo a través del subsidio Ideas-Proyectos de Investigación, Desarrollo y Transferencia de Soluciones Científico-Tecnológicas para Áreas de Gobierno Provincial (EX – 2022 – 13372056 – GDEBA – DSTYADCIC - Convocatoria 2022). Así como también a la firma KNAUF por la donación de las placas de yeso con las que se construyeron los tabiques ensayados.

## REFERENCIAS

- Adams, M., Burrows, V., & Richardson, S. (2019). *Bringing embodied carbon upfront*. [www.worldgbc.org/embodied-carbon](http://www.worldgbc.org/embodied-carbon)
- Bjånesøy, S., Kinnunen, A., Einarsdóttir, H., y Heinonen, J. (2023). Carbon storage in the built environment: a review. In *Environmental Research: Infrastructure and Sustainability* (Vol. 3, Issue 4). Institute of Physics. <https://doi.org/10.1088/2634-4505/ad139f>
- Cazón Narvaez, A., Juárez, I. del V., Garzón, B. S., y Cancino, V. L. A. (2024). Envolverte Acústica de las Viviendas en Edificios en Altura. *Estudios Del Hábitat*, 22(2), e140. <https://doi.org/10.24215/24226483e140>
- Durán Urón, A. E., Jimeno Martínez, M. G., Rodríguez Barraza, D. S., Meléndez Serrano, A. I., Palacios Alvarado, W., y Mendoza Cáceres, D. A. (2021). *Condiciones acústicas en las aulas de clase: Una revisión de la literatura*. *Investigación e Innovación En Ingenierías*, 9(2), 79–90. <https://doi.org/10.17081/invinno.9.2.4908>
- Ellen MacArthur Foundation. (2019, September 16). Cities and the circular economy: Deep dive. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/cities-and-the-circular-economy-deep-dive>
- European Commission. (2018). *Construction and demolition waste* (CDW). European Commission. Recuperado el 14 de septiembre de 2025, de [https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/construction-and-demolition-waste\\_en](https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/construction-and-demolition-waste_en)
- European Environment Agency. (2020, enero 16). *Construction and demolition waste: Challenges and opportunities in a circular economy*. EEA. Recuperado el 14 de septiembre de 2025, de

- <https://www.eea.europa.eu/publications/construction-and-demolition-waste-challenges/construction-and-demolition-waste-challenges>
- Instituto Valenciano de Edificación (2019). *Cuadernos de rehabilitación. P1 Productos y Materiales. Propiedades de aislantes térmicos para la rehabilitación energética.*  
[https://descargas.five.es/archivos/p1\\_portada.pdf](https://descargas.five.es/archivos/p1_portada.pdf)
- Norma ASTM C423-02a: *Standard test method for sound absorption and sound absorption coefficients by the reverberation room method.*
- Norma ASTM E90: *Standard test method for laboratory measurement of airborne sound transmission loss of building partitions and elements.*
- Norma ASTM E413: *Classification for Rating Sound Insulation.*
- Norma IRAM 4065/2019: *Medición de absorción sonora en una cámara reverberante.*
- Norma IRAM 4044/2015: *Acústica - Protección contra el ruido en edificios. Requisitos de aislamiento acústico mínimo. Método de medición y clasificación. Cerramientos y aberturas, verticales y horizontales.*
- Norma IRAM-IAS U 500 243: *Perfiles abiertos de chapa de acero cincada o revestida de aleación aluminio-cinc, conformados en frío, para uso en interior de edificios en estructuras de sistemas de construcción en seco. Requisitos generales.*
- Norma IRAM-ISO 717-1: *Acústica. Evaluación del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 1 - Aislamiento al ruido aéreo (ISO 717-1:2020, IDT)*
- Norma IRAM-ISO 10140: *Acústica. Medición en laboratorio del aislamiento acústico de los elementos de construcción.*  
Parte 1: *Reglas de aplicación para productos específicos (ISO 10140-1:2016, IDT)*  
Parte 2: *Medición del aislamiento acústico a ruido aéreo (ISO 10140:2010, IDT)*  
Parte 4: *Procedimientos y requisitos de medición (ISO 10140-3:2010, IDT)*  
Parte 5: *Requisitos para instalaciones y equipos de ensayo (ISO 10140-5:2010 + AMD1:2014, IDT)*
- Norma ISO 354/2003: *Acoustics. Measurement of sound absorption in a reverberation room.*
- Norma ISO 11654/1997: *Sound absorbers for use in buildings. Rating of sound absorption.*
- Núñez Berté, A., Martin Evans, J., Fernández Luco, L. Bio aislación termo-acústica de lana de oveja de descarte y su contribución a los objetivos de desarrollo sostenible. MACDES 2022.  
[https://www.researchgate.net/publication/371868725\\_bio\\_aislacion\\_termo-acustica\\_de\\_lana\\_de\\_oveja\\_de\\_descarte\\_y\\_su\\_contribucion\\_a\\_los\\_objetivos\\_de\\_desarrollo\\_sostenible#fulltextfilecontent](https://www.researchgate.net/publication/371868725_bio_aislacion_termo-acustica_de_lana_de_oveja_de_descarte_y_su_contribucion_a_los_objetivos_de_desarrollo_sostenible#fulltextfilecontent)
- OECD (2018). *Global material resources outlook to 2060. Economic drivers and environmental consequences. Highlights.* <https://www.oecd.org/environment/waste/highlights-global-material-resources-outlook-to-2060.pdf>
- Petrović, E. K., et al. (2024). *Global patterns in construction and demolition waste. Sustainability.*  
<https://www.mdpi.com/2071-1050/16/4/1561>
- Soto-Paz, J. (2023). *The circular economy in the construction and demolition sector. Resources, Conservation & Recycling Advances.* Recuperado el 14 de septiembre de 2025, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352710223019046>
- United Nations Environment Programme (UNEP, 2025). *Emissions from building sector stopped rising for the first time since 2020, UN finds* [Press release]. United Nations Environment Programme.  
<https://www.unep.org/news-and-stories/press-release/emissions-building-sector-stopped-rising-first-time-2020-un-finds>
- United Nations Environment Programme, & Global Alliance for Buildings and Construction [PNUMA/UNEP, & GlobalABC, 2025). *Global status report for buildings and construction 2024/2025: Not just another brick in the wall.* United Nations Environment Programme.  
[https://globalabc.org/sites/default/files/2025-03/Global-Status-Report-2024\\_2025.pdf](https://globalabc.org/sites/default/files/2025-03/Global-Status-Report-2024_2025.pdf)
- Zach, J., Korjenic, A., Petráněk, V., Hroudová, J., y Bednar, T. (2012). *Performance evaluation and research of alternative thermal insulations based on sheep wool. Energy and Buildings*, 49.  
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.02.014>
- United Nations Climate Action Summit (UNCAS, 2019). *Zero Carbon Buildings for All Initiative Launched at UN Climate Action Summit.* <https://worldgbc.org/article/zero-carbon-buildings-for-all-initiative-launched-at-un-climate-action-summit/>

## ACOUSTIC PERFORMANCE OF THICK SHEEP WOOL BLANKETS FOR APPLICATIONS IN SUSTAINABLE ARCHITECTURE

**ABSTRACT:** Within the framework of the transition toward sustainable construction and the decarbonization of the sector, the valorization of natural materials with a low carbon footprint is presented as a key strategy. This work analyzes the acoustic performance of thick sheep wool blankets produced in the province of Buenos Aires, utilizing a byproduct with no textile value and contributing to both waste reduction and local socioeconomic development. Laboratory tests were conducted to characterize its properties as a sound-absorbing material and its ability to improve airborne sound insulation in drywall partitions, following national and international standards. The results show that sheep wool exhibits behavior typical of traditional fibrous absorbers, with weighted sound absorption coefficient ( $\alpha_W$ ) values of 0.45 and 0.65 depending on the blanket thickness. In terms of sound insulation, the addition of these mats significantly improved the acoustic performance of the partitions, increasing their weighted sound reduction index ( $R_w$ ) from 36 dB to 41 dB for the 35 mm mat, and to 42 dB for the 70 mm mat. Some of these values are compatible with the recommendations of the IRAM 4044 standard for airborne noise insulation, demonstrating their potential as a sustainable alternative to other conventional sound absorbers, with additional environmental and health benefits.

**Keywords:** sustainable construction, sheep wool, sound insulation, sound absorption, circular economy.

## INTERVENCIONES EN CASAS-MUSEO EN SAN MIGUEL DE TUCUMÁN: SIMULACIÓN ENERGÉTICA Y ANÁLISIS COMPARATIVO

**María del Milagro Rougès Forcada<sup>1,2</sup>, Raúl Fernando Ajmat<sup>1,2</sup>, María Silvana Zamora<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Instituto de Investigación en Luz, Ambiente y Visión (ILAV) - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) – Universidad Nacional de Tucumán (UNT) - Av. Independencia 1701 – San Miguel de Tucumán – C.P. 4000 – Tucumán.

<sup>2</sup>Facultad de Arquitectura y Urbanismo – Universidad Nacional de Tucumán (FAU – UNT) – Av. Néstor Kirchner 1800 – San Miguel de Tucumán - C.P. 4000 – Tucumán  
Tel. 0381 436-1936 – e-mail: mmrougesforcada@herrera.unt.edu.ar

**RESUMEN:** La rehabilitación energética de casas-museos plantea desafíos particulares para conservar su integridad material y garantizar condiciones ambientales adecuadas para las colecciones. Este trabajo evalúa el impacto de intervenciones pasivas, reversibles y de gestión sobre el comportamiento térmico de dos salas de exposición en casas-museo ubicadas en San Miguel de Tucumán, Argentina: el Museo Arquidiocesano de Arte Sacro (MAS) y la Casa Histórica de la Independencia (CHI). Se realizaron mediciones in situ de temperatura y humedad relativa que permitieron validar los modelos de simulación energética dinámica en OpenStudio–EnergyPlus. Se analizaron escenarios como la incorporación de aislantes térmicos en cubiertas y en carpinterías, y el control de ganancias térmicas internas. El desempeño se evaluó con indicadores como el porcentaje de tiempo fuera del rango recomendado para conservación ( $T=15\text{--}25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), el índice de riesgo microclimático (HMR-T) y las fluctuaciones diarias de temperatura. Los resultados muestran reducciones de hasta un 80% en las fluctuaciones de verano en CHI y un 75% en el tiempo fuera de rango en MAS, con mejoras acumuladas cuando las estrategias se aplican de forma combinada para ambos casos. Se concluye que, en contextos de recursos limitados, estas medidas deben priorizarse por su viabilidad técnica, aplicabilidad y compatibilidad con la conservación preventiva del patrimonio.

**Palabras clave:** casas-museo, conservación preventiva, simulación energética, rehabilitación energética.

## INTRODUCCIÓN

Los museos son espacios de gran valor cultural, donde la preservación de las colecciones y del propio edificio posee un rol sustancial. En particular, las denominadas casas-museo ubicadas en el Noroeste Argentino, ocupan inmuebles históricos de alto valor simbólico y arquitectónico, no concebidos originalmente para este uso. Por ello, los conservadores deben adaptar las colecciones a las condiciones higrotérmicas de sus salas para minimizar posibles daños (Zamora y O'Donnell, 2020). Esta situación plantea desafíos significativos en términos de control ambiental interior, afectando directamente las condiciones de conservación preventiva y de confort térmico para los visitantes.

Esta condición particular de las casas-museo trae como consecuencia condiciones interiores que se ven altamente influenciadas por las fluctuaciones climáticas externas generando escenarios de riesgo para los objetos expuestos. Entre los desafíos que derivan de las características edilicias propias de estos casos de estudio, se identifican diversos agentes de deterioro, como las fluctuaciones de temperatura y humedad relativa que favorecen procesos de deformación, fisuración, oxidación y biodeterioro en materiales como madera, textiles, papel y metal (De Guichen, 1987; Thomson, 1986). En el caso de las casas-museos de Tucumán esto se ve exacerbado por la climatología propia del lugar. A ello se suman las restricciones que impone el patrimonio construido, donde las intervenciones deben ser de carácter



reversible y sostenible. Por estos motivos, resulta indispensable identificar estrategias pasivas y de bajo impacto que puedan aplicarse sin comprometer los valores patrimoniales, pero que al mismo tiempo permitan una mejora efectiva del comportamiento térmico interior

El concepto de conservación preventiva hace referencia a la anticipación del deterioro de las colecciones a través del control de variables ambientales sin intervenir en primera instancia en los objetos (ICCROM, 2016). En este sentido, las condiciones ambientales, como la temperatura y la humedad relativa, resultan de importancia y es por ello que diversas recomendaciones internacionales fijan rangos de valores tanto de temperatura y de humedad relativa como de sus fluctuaciones que deberían considerarse para los interiores de los museos a fin de contribuir a la conservación del patrimonio (ASHRAE, 2019).

Diversos estudios han abordado la problemática del control ambiental en edificios patrimoniales destinados a albergar colecciones culturales, enfatizando la influencia de las condiciones interiores sobre la conservación preventiva. Bonora et al. (2019) propusieron el índice *Heritage Indoor Microclimate Risk* (HMR) para evaluar el riesgo de deterioro de bienes culturales mediante simulaciones. En trabajos posteriores aplicaron este enfoque en el Palacio de Venaria Reale (Italia), comparando escenarios con y sin climatización artificial. Los resultados evidenciaron la importancia de la envolvente edilicia en la estabilidad del microclima interior (Bonora et al, 2021).

En el Museo de Silesia (Polonia), se desarrolló un estudio de monitoreo continuo de temperatura, humedad relativa y CO<sup>2</sup>, destacando la relevancia de la zonificación arquitectónica y el control pasivo como herramientas para preservar las colecciones (Ferdyn, 2016). En la misma línea otros autores propusieron un enfoque multiobjetivo para museos históricos en Pisa, demostrando que ajustes mínimos en los sistemas de climatización permiten mejorar simultáneamente el confort térmico, la eficiencia energética y la conservación (Schito et al., 2018). Otro estudio en Italia, desarrolló una matriz de evaluación para seleccionar materiales aislantes compatibles con edificios patrimoniales, priorizando criterios energéticos y de conservación (Annibaldi et al., 2020).

En el contexto argentino, particularmente en el noroeste del país, se han desarrollado en la última década diversos estudios centrados en casas-museo, con énfasis en el diagnóstico ambiental y el análisis de la envolvente edilicia. En el Museo Casa Histórica de la Independencia, en Tucumán, se identificaron valores higrotérmicos inadecuados tanto en salas de exposición como en espacios de reserva, destacando la necesidad de limitar el ingreso de visitantes y mejorar la gestión de la envolvente (Zamora et al, 2016). Estudios complementarios realizados en el Museo Histórico Nicolás Avellaneda confirmaron estos hallazgos, observando inestabilidad higrotérmica y proponiendo la aplicación de estrategias pasivas de regulación ambiental (Zamora et al, 2020; Bazán, 2020). En el Museo Arquidiocesano de Arte Sacro, se aplicó la metodología ICOM-CC para el análisis de riesgos, reconociendo como principales amenazas las fluctuaciones de temperatura y humedad relativa, los contaminantes y la apertura frecuente de puertas y ventanas (Zamora, 2019).

Estos antecedentes refuerzan la necesidad de considerar intervenciones no invasivas de bajo impacto y compatibles con el valor patrimonial de los inmuebles, como parte de una estrategia integral de conservación preventiva. A su vez, consolidan el valor de la simulación energética como herramienta para predecir el comportamiento ambiental y optimizar el diseño de intervenciones adaptadas a contextos patrimoniales. En este marco, el presente trabajo tiene como objetivo evaluar el impacto de estrategias pasivas sobre el comportamiento térmico interior en salas de exposición permanente de dos casas-museo en San Miguel de Tucumán, mediante simulaciones energéticas dinámicas. Para ello, se analizan las condiciones térmicas interiores actuales mediante simulaciones validadas in situ. Se diseñan y simulan alternativas de mejora de la envolvente edilicia compatibles con los valores patrimoniales. Complementariamente, se incorporan estrategias de gestión museográfica y control de cargas internas. Asimismo, se evalúa el desempeño térmico de cada alternativa mediante la correlación con recomendaciones de conservación, así como medir el efecto combinado de la aplicación de estrategias pasivas en simultáneo.



## MATERIALES Y MÉTODOS

### *Selección de los casos de estudio*

La investigación se desarrolló en dos museos ubicados en San Miguel de Tucumán: el Museo Nacional Casa Histórica de la Independencia (CHI) y el Museo Arquidiocesano de Arte Sacro (MAS) seleccionados por valor histórico y arquitectónico, así como por las particularidades de su envolvente edilicia y exigencias patrimoniales. Esta elección busca garantizar un análisis comparativo que abarque edificios con exigentes restricciones patrimoniales tanto como aquellos con una mayor flexibilidad para mejoras físicas.

El Museo Nacional Casa Histórica de la Independencia, fue sede del Congreso General donde se declaró la Independencia de las Provincias Unidas del Sur el 9 de julio de 1816. Es un edificio de alto valor patrimonial, declarado Monumento Histórico Nacional en 1941. La casa sufrió diversas modificaciones, siendo reconstruida en 1941. Alberga la Sala de la Jura (SJ) que conserva gran parte de su configuración original donde se exhiben pinturas al óleo del siglo XIX y principios del XX. La misma fue seleccionada para esta investigación por su gran valor histórico y simbólico (Figura 1- a).



(a)

(b)

*Figura 1: fotografía interior de Sala de la Jura (CHI) (a), fotografía interior Sala de los Obispos (MAS) (b).*

El Museo Arquidiocesano de Arte Sacro, constituye un caso singular por emplazamiento en un entorno urbano patrimonial. Este edificio sufrió modificaciones, conservando sus muros originales de ladrillo cocido, pero se han reemplazado pisos y cubierta. Dentro de este museo se seleccionó la denominada Sala de los Obispos (SO), por contar con antecedentes de monitoreo y ser la que presenta mayor superficie de envolvente vinculada al exterior. En la misma se exponen textiles, bulas, báculos y otros objetos pertenecientes a Obispos de Tucumán (Figura 1 – b).

### *Campaña de monitoreo in-situ*

El monitoreo de las condiciones interiores de temperatura, humedad relativa e iluminancia se llevó a cabo mediante dataloggers autónomos HOBO Onset U12, previamente calibrados. En el MAS, el período de muestreo comprendió un año calendario (2024). En CHI, la campaña se inició en abril 2025 y se encuentra en curso al momento de la investigación. La frecuencia de registro fue horaria y continua,



Se plantearon tres estrategias de rehabilitación simuladas bajo dos criterios generales: 1. la incorporación de aislantes térmicos en la envolvente edilicia (alternativa 1 y 2) y 2. la gestión del acceso a visitantes (alternativa 3). En la alternativa 1 se propuso la instalación de un “falso cielorraso” desmontable que reproduce visualmente al actual, compuesto por un panel rígido de poliuretano de 25 mm de espesor separado del cielorraso actual por una cámara de aire de 50 mm de espesor. Bajo el panel de poliuretano se incorporan cañizos y falsas vigas secundarias realizadas en WPC (Wood Plastic Composite). La selección de estos materiales responde a su aplicabilidad, bajo peso por m<sup>2</sup> (18kg/m<sup>2</sup>) y baja conductividad térmica (Tabla 1), lo que permite sujetar la nueva estructura mediante grampas sin comprometer la cubierta original (Figura 3). La alternativa 2 plantea la mejora de las carpinterías mediante la instalación de un doble vidrioado hermético (DVH) en el lado exterior, conservando las carpinterías originales. Asimismo, se adiciona una puerta vidriada con apertura automática en el acceso a la sala. La alternativa 3, se centra en la gestión del flujo de visitantes, limitando el ingreso a un máximo de 10 personas en simultáneo (0.1 persona/ m<sup>2</sup>). La propuesta final simula la combinación de las tres estrategias para evaluar su efecto sobre el comportamiento térmico de la sala.

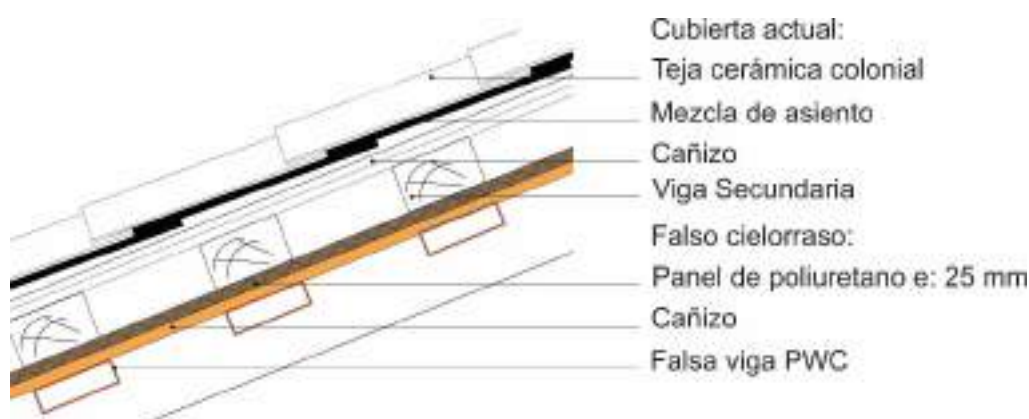


Figura 3: esquema constructivo de cubierta CHI

Tabla 1: CHI Propiedades termo-físicas de la envolvente. Parámetros de simulación

| Elemento constructivo | Caso base (U-value: W/m <sup>2</sup> K) | Alternativa (U-value: W/m <sup>2</sup> K) | Observaciones |
|-----------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------|---------------|
| Cubierta              | 2.65                                    | 0.53                                      | Reducción 80% |
| Carpinterías          | 3.15                                    | 1.47                                      | Reducción 53% |

La Sala de los Obispos (SO - MAS), se sitúa entre un patio y una galería exterior, lo que la expone a intercambios térmicos significativos con el ambiente exterior (Figura 4). Su envolvente está compuesta por muros de ladrillos de tierra cocida de gran espesor (0.80 m), cubierta de chapa con cielorraso suspendido de yeso con aislación térmica (lana de vidrio 2”), carpinterías hacia el exterior cegadas con paneles de MDF de 28 mm y pisos de granito. La iluminación artificial actual combina lámparas de tecnología LED y halógenas. La simulación se configuró bajo los siguientes parámetros:

- Archivo climático: EPW – Tucumán-Matienzo, 2007-2023.
- Perfiles de uso: Horarios abierto al público: de 9 a 19 horas de lunes a viernes y sábados de 9 a 13 hs., con ocupación promedio de 0.53 personas/m<sup>2</sup>. El nivel de actividad fue de 83.9W correspondiente a una caminata suave.
- Iluminación artificial: potencia de 12.59 W/m<sup>2</sup>
- Infiltración: 1 ACH en horarios de funcionamiento y 0.2 ACH mientras permanece cerrado.
- Paso temporal de cálculo: 1 hora
- Sin equipos de climatización artificial activos

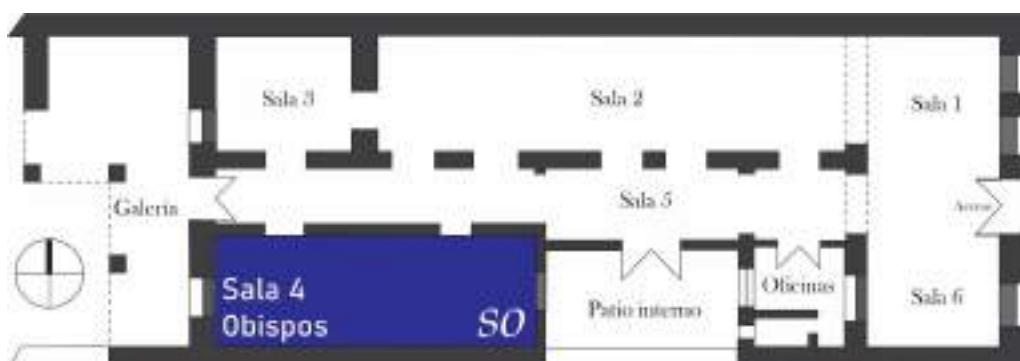


Figura 4: planimetría del Museo de Arte Sacro

Para la simulación se plantearon 3 alternativas. La alternativa 1 consistió en la incorporación de doble material aislante (lana de vidrio de 4”) sobre el cielorraso y bajo la chapa (Tabla 2). La alternativa 2, consiste en la incorporación de aislación térmica en las ventanas cegadas mediante la aplicación de un panel compuesto por 2 placas de MDF y en medio una plancha de poliestireno expandido (EPS) de 50 mm de espesor. Esta intervención no visible, refuerza la función de sellado de vanos reduciendo infiltración y transmitancia térmica (Tabla 2). La alternativa 3 consistió en el control de la iluminación mediante sensores de movimiento a fin de reducir las cargas térmicas interiores por iluminación, configurando un perfil horario representativo según los datos otorgados por el personal del museo. Esta estrategia no solo mejora el comportamiento térmico, sino que además reduce la sobreexposición a la radiación luminosa de las obras allí expuestas, en línea con las recomendaciones del International Commission on Illumination (CIE, 2004). La simulación final combina en simultáneo las alternativas 1, 2 y 3.

Tabla 2: MAS Propiedades termo-físicas de la envolvente. Parámetros de simulación

| Elemento constructivo | Caso base (U-value: W/m <sup>2</sup> K) | Alternativa (U-value: W/m <sup>2</sup> K) | Observaciones |
|-----------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------|---------------|
| Cubierta              | 0.43                                    | 0.18                                      | Reducción 58% |
| Carpinterías          | 2.80                                    | 0.53                                      | Reducción 81% |

### Validación de simulación

Para evaluar la precisión de los valores simulados de temperatura, frente a los datos medidos in situ, se emplearon dos indicadores: el Coeficiente de Variación de Error Cuadrático Medio (CV(RMSE)), donde se establece que valores inferiores al 30% son válidos para simulación; y el coeficiente de correlación de Pearson (r), considerando una correlación buena a valores superiores a 0.7 (ASHRAE, 2014).

Tabla 3: Validación simulación

| Museo /Sala | CV (RMSE) % | R (PEARSON) | VALIDACIÓN                              |
|-------------|-------------|-------------|-----------------------------------------|
| MAS – SO    | 21.34       | 0.75        | < 30% verifica – >0.7 buena correlación |
| CHI - SJ    | 17.88       | 0.43        | < 30% verifica – <0.7 Correlación media |

Para el MAS se verifican ambos parámetros, lo que confirma una adecuada precisión y buena correlación del modelo. En el CHI, con un período de muestreo reducido (tres meses y medio de otoño-invierno 2025), se obtuvo un CV(RMSE) adecuado para simulación, pero un Coeficiente de Pearson de correlación media (r), inferior a lo recomendado (Tabla 3). Esta diferencia es atribuible a la limitada representatividad temporal y a la discrepancia entre el archivo climático de referencia (EPW, Benjamín Matienzo, 2007-2023) y las condiciones puntuales del período de medición (invierno atípico). Si bien no verifica plenamente (r), ello no invalida la utilidad del modelo para el análisis de estrategias de rehabilitación (Tabla 3).

### ***Criterios para el diagnóstico ambiental***

El análisis ambiental de los resultados simulados se organiza en torno a indicadores vinculados a la conservación preventiva. Como referencia se adoptaron los rangos de temperatura (T) recomendados por ASHRAE (2019) para salas de exposición en casas-museos (valores de T entre 15°C y 25°C) y fluctuaciones diarias de temperatura máximas de 5°C. Para evaluar cuantitativamente el desempeño de cada estrategia, se aplicó una adaptación del índice HMR (Heritage Microclimate Risk) propuesto por Bonora et al. (2019). Este indicador permite estimar el riesgo microclimático asociado a una variable ambiental, a partir del tiempo que ésta se encuentra fuera del rango recomendado. En el presente estudio, el HMR se calculó exclusivamente para la variable de temperatura, considerando el porcentaje de horas del período analizado en las que los valores superan los límites recomendados. El índice se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$\text{HMR (T)} = \sum_j^h \frac{(>25^{\circ}\text{C} + h<15^{\circ}\text{C})}{h_{\text{total}}} * 100 \quad (1)$$

donde:

h = horas con T fuera del rango recomendado

h total = horas totales del período de análisis.

Este indicador resulta particularmente útil para comparar el grado de adecuación térmica de las distintas estrategias con respecto al caso base permitiendo integrar en un solo valor la magnitud de las desviaciones térmicas. Además, su uso en contextos patrimoniales facilita la interpretación de las variables relacionadas al riesgo de las colecciones y del propio edificio a las condiciones ambientales.

## **RESULTADOS**

A continuación, se presentan los resultados obtenidos a partir de simulaciones energéticas para ambas salas de exposición, con foco en la variable de temperatura interior. Se analizan los porcentajes por fuera del rango recomendado y las fluctuaciones térmicas diarias, por estación, así como el comportamiento térmico en los días pico (día más cálido y día más frío). Como referencia se adoptan los criterios establecidos por ASHRAE (2019) para conservación preventiva y el HMR(T) para evaluar las diferentes estrategias.

### ***Museo Casa Histórica de la Independencia (CHI)***

La simulación del caso base de la SJ evidenció un comportamiento térmico poco favorable para la conservación preventiva. Se observó un alto porcentaje de horas por encima del límite superior de temperatura (25°C) en períodos de verano (31,07%) y primavera (26,88%), así como una frecuencia considerable de días con fluctuaciones térmicas que superan los 5 °C a lo largo del año, superando el 65% en todas las estaciones (Tablas 4 y 5, gráficos 1 y 2). Según la clasificación cualitativa del índice HMR, las condiciones de microclima interior, bajo la variable de temperatura presenta un riesgo moderado (25%-50%) para los bienes culturales en estaciones cálidas.

La alternativa 1, que incorpora panel aislante de poliuretano en un falso cielorraso, mostró mejoras significativas: redujo el tiempo fuera del rango en todas las estaciones (Tabla 4), situándose según la clasificación de HMR en “riesgo bajo”. Se observa una notable disminución de las fluctuaciones diarias de T, con una reducción del 22% en verano y más del 60% en otoño (Tabla 5).

La alternativa 2 (colocación de DVH sellado, en aberturas al exterior) aportó mejoras más leves especialmente en primavera e invierno. Por su parte la alternativa 3 (control de acceso de visitantes) tuvo un efecto menor sobre el comportamiento térmico (Tablas 4 y 5).

*Tabla 4: Resumen porcentaje de tiempo fuera del rango de T recomendada – CHI*

| HMR - T° >25°C | CHI caso base | CHI Alt. 1 | CHI Alt. 2 | CHI Alt. 3 | CHI 1+2+3 |
|----------------|---------------|------------|------------|------------|-----------|
| VERANO         | 31,07         | 21,89      | 29,85      | 31,00      | 11,76     |
| OTOÑO          | 3,13          | 0,72       | 2,26       | 3,10       | 0,18      |
| INVIERNO       | 2,54          | 0,54       | 2,52       | 2,52       | 0,00      |



|                |               |            |            |            |           |
|----------------|---------------|------------|------------|------------|-----------|
| PRIMAVERA      | 26,88         | 16,39      | 24,40      | 26,82      | 8,97      |
| HMR - T° <15°C | CHI caso base | CHI Alt. 1 | CHI Alt. 2 | CHI Alt. 3 | CHI 1+2+3 |
| OTOÑO          | 1,77          | 0,09       | 1,18       | 1,72       | 0,00      |
| INVIERNO       | 11,46         | 0,27       | 5,57       | 11,40      | 0,00      |

Riesgo moderado  
 Bajo Riesgo

Tabla 5: Resumen de las fluctuaciones de T - CHI

| % días - $\Delta T^\circ > 5^\circ\text{C}$ | CHI caso base | CHI Alt. 1 | CHI Alt. 2 | CHI Alt. 3 | CHI 1+2+3 |
|---------------------------------------------|---------------|------------|------------|------------|-----------|
| VERANO                                      | 73,42         | 56,96      | 69,62      | 73,40      | 8,86      |
| OTOÑO                                       | 53,26         | 19,57      | 51,09      | 53,23      | 0,00      |
| INVIERNO                                    | 77,17         | 46,48      | 77,17      | 77,21      | 14,13     |
| PRIMAVERA                                   | 65,93         | 50,55      | 64,84      | 65,90      | 24,18     |

La combinación de las tres estrategias (Alt 1+2+3) resultó ser la opción más eficiente (Gráfico 1 y 2). En verano, el porcentaje de período de tiempo en condiciones fuera de los rangos recomendados se reduce de 31,07% caso base a 11,76% (una mejora del 62%), suponiendo un riesgo bajo (<25%). En invierno, el porcentaje de tiempo con temperaturas inferiores a los 15°C llega a cero. En cuanto a las fluctuaciones térmicas, las reducciones alcanzaron el 88% en verano, 100% en otoño, 82% en invierno y 63% en primavera (Gráfico 1 y 2).

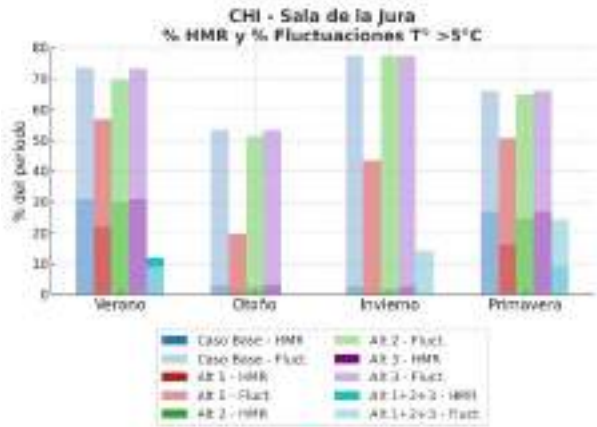


Gráfico 1

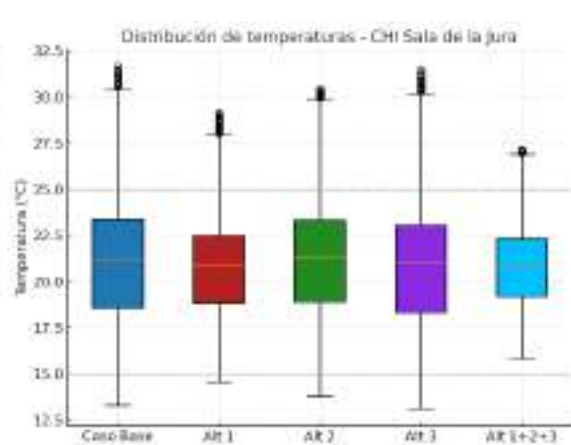


Gráfico 2

El análisis de los días pico (día más frío: 27 de junio, día más cálido: 29 de enero) permitió observar el comportamiento horario en condiciones extremas (Gráfico 3). La alternativa 1 y la combinación de las tres estrategias mostraron un efecto positivo al reducir picos térmicos y suavizar la curva de fluctuación y mantener las temperaturas dentro de rangos más estables.

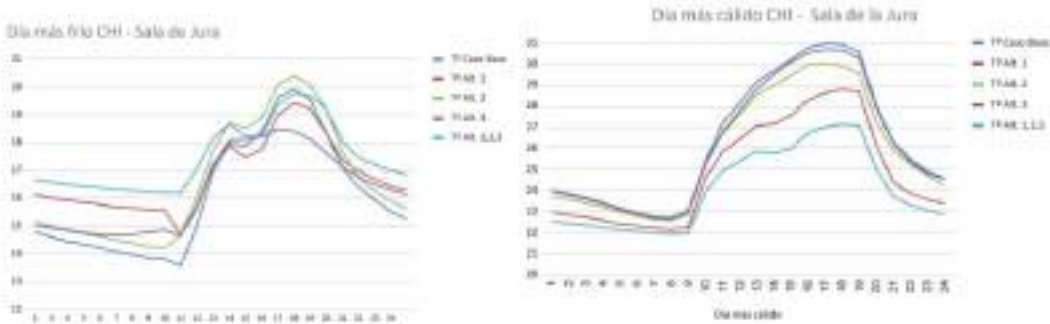


Gráfico 3: CHI - SJ - día más frío, (a) 27 de junio, día más cálido (b) 29 de enero.

### Museo Arquidiocesano de Arte Sacro (MAS)

En la sala de los obispos (SO), la simulación computacional del caso base reveló un índice de riesgo bajo (HMR). Durante el verano, el 22,31% de las horas se ubicaron por encima del umbral de 25°C, y en primavera esta cifra alcanzó el 17,45%. Similar al CHI, se observan en las 4 estaciones un porcentaje elevado que supera el 50% de días con fluctuaciones de T por sobre el valor límite (Tablas 6, 7 y Gráfico 4).

Tabla 6: Resumen porcentaje de tiempo fuera del rango de T recomendada – MAS

| HMR - T° >25°C | MAS caso base | MAS Alt. 1 | MAS Alt. 2 | MAS Alt. 3 | MAS 1+2+3 |
|----------------|---------------|------------|------------|------------|-----------|
| VERANO         | 22,31         | 16,19      | 21,62      | 13,77      | 5,59      |
| OTOÑO          | 1,81          | 0,05       | 1,45       | 0,18       | 0,00      |
| INVIERNO       | 1,00          | 0,36       | 0,41       | 0,00       | 0,00      |
| PRIMAVERA      | 17,45         | 11,45      | 16,30      | 7,19       | 3,53      |

Bajo Riesgo

Tabla 7: Resumen de las fluctuaciones de T - MAS

| % días - $\Delta T^\circ > 5^\circ\text{C}$ | MAS caso base | MAS Alt. 1 | MAS Alt. 2 | MAS Alt. 3 | MAS 1+2+3 |
|---------------------------------------------|---------------|------------|------------|------------|-----------|
| VERANO                                      | 64,56         | 48,10      | 54,43      | 21,52      | 5,06      |
| OTOÑO                                       | 46,74         | 21,74      | 44,57      | 1,09       | 0,00      |
| INVIERNO                                    | 65,22         | 46,74      | 66,30      | 35,87      | 5,43      |
| PRIMAVERA                                   | 54,95         | 48,35      | 56,04      | 21,98      | 3,53      |

La alternativa 1 (aislamiento doble en cubierta) logró los mejores resultados individuales reduciendo significativamente los porcentajes de tiempo fuera de los rangos (Gráfico 5) y disminuyendo las fluctuaciones térmicas en todas las estaciones (Gráfico 4). La alternativa 2 (aislación en carpinterías cegadas), también mostró mejoras, aunque más discretas. La alternativa 3 (control de iluminación por sensores de movimiento), fue especialmente eficaz para reducir las ganancias de calor interno en verano y primavera. Por ejemplo, logró reducir el tiempo fuera del rango en primavera de 17,45% a 7,19% y las fluctuaciones en verano de 64,56% a 21,52% (Gráficos 4 y 5). La combinación de las tres estrategias (Alt 1+2+3) mostró un impacto contundente: en verano, el porcentaje de horas fuera de rango disminuyó un 75% respecto al caso base en verano, y en primavera un 81%. Las fluctuaciones también se redujeron drásticamente alcanzando un 92% de mejora en verano (64,56% caso base, frente a 5,06%) y eliminando completamente las fluctuaciones térmicas en otoño (Tabla 7 y Gráfico 4).

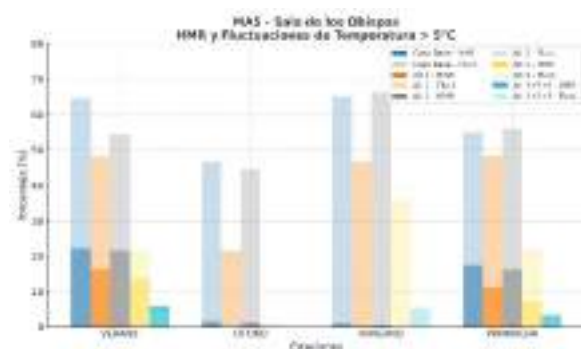


Gráfico 4

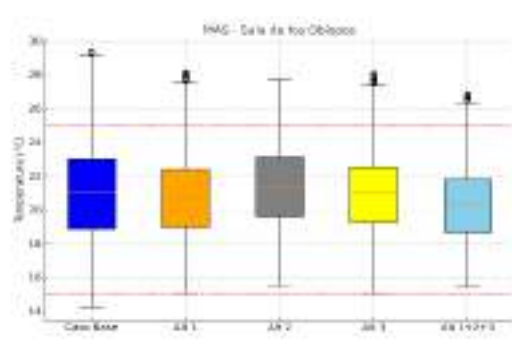
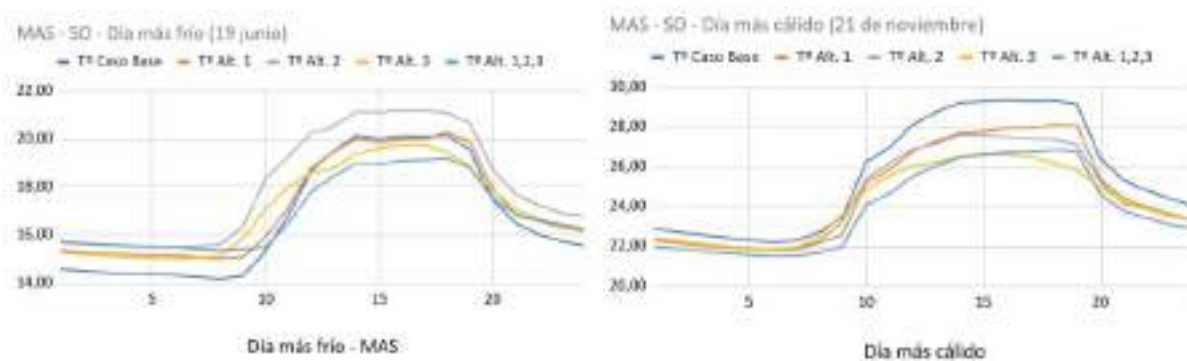


Gráfico 5

El análisis de los días con picos térmicos (día más frío: 19 de junio, día más cálido: 21 de noviembre) evidencia una atenuación de los extremos térmicos gracias a las estrategias pasivas sumadas. La curva térmica se mantiene más plana y controlada en las alternativas 1 y la combinada, consolidando el rol del aislamiento y el control de cargas internas como medidas capaces para mejorar la estabilidad ambiental interior (Gráfico 6).





(a) (b)  
Gráfico 6: MAS - SO - día más frío, (a) 19 de junio, día más cálido (b) 21 de noviembre

## CONCLUSIONES

Las intervenciones propuestas se enmarcan en el enfoque de estrategias pasivas, ya que no requieren consumo energético adicional ni sistemas activos de climatización, sino que actúan sobre el diseño arquitectónico, la materialidad de la envolvente y la gestión interna del uso del espacio. Entre ellas se incluyen mejoras en techos, cielorrasos y carpinterías, así como regulaciones del uso del espacio y de las cargas internas (presencia de visitantes o iluminación artificial). Todas fueron seleccionadas por su bajo impacto visual y constructivo, de modo que resulten compatibles con el valor patrimonial de los edificios.

Como parte del diagnóstico ambiental, se aplicó el índice Heritage Microclimate Risk (HMR), que permitió cuantificar el riesgo horario para las colecciones expuestas en función de los desvíos térmicos respecto de los umbrales recomendados. Esta herramienta se valora como un insumo relevante en el análisis de riesgo y planificación de conservación preventiva, ya que sintetiza el impacto ambiental desde una perspectiva patrimonial.

Los resultados obtenidos mediante la simulación energética evidencian que, en su estado actual, las condiciones térmicas interiores en las salas seleccionadas en las casas-museo de San Miguel de Tucumán presentan un comportamiento poco favorable para la conservación preventiva especialmente por la amplitud térmica diaria interior. Según el indicador HMR(T), la Sala de la Jura se clasifica “riesgo moderado” y la Sala de los Obispos se clasifica en “riesgo bajo”; no obstante, este índice no incorpora las fluctuaciones térmicas diarias que resultaron significativas en ambas salas.

Las estrategias pasivas propuestas, cuidadosamente seleccionadas por su compatibilidad material, la reversibilidad y el bajo impacto con los edificios patrimoniales, demostraron mejoras sustanciales en el comportamiento térmico interior. En CHI, las intervenciones sobre la envolvente edilicia (aislamiento en cubierta y mejoras de carpinterías) fueron más eficaces que aquellas orientadas a la gestión interna (como el control de aforo de visitantes). En MAS, la reducción de cargas internas mediante el control de iluminación por sensores, reflejó un efecto especialmente positivo en las temperaturas interiores en las estaciones cálidas, evidenciando la necesidad de modernizar el sistema de iluminación poco eficiente que aún conservan algunas casas-museo de nuestra región.

Las alternativas combinadas, que integran medidas sobre la envolvente y sobre las cargas internas, lograron la mayor reducción de riesgo. En CHI, esta medida logró eliminar el tiempo con temperaturas inferiores a los 15°C en invierno y redujo hasta un 88% las fluctuaciones térmicas estivales. En MAS, las mejoras acumuladas superan el 75% respecto al caso base. Esto confirma que el aumento de hermeticidad y la mejora de la aislación en cubiertas y carpinterías, cuando se aplican de forma conjunta, incrementan el desacople térmico con el exterior y reducen de manera más efectiva las fluctuaciones diarias que las intervenciones aisladas.

En contextos patrimoniales, estos resultados, refuerzan el valor de las intervenciones pasivas, reversibles y de bajo impacto como parte de una estrategia de conservación preventiva, abordando una doble dimensión: por un lado, con estrategias de gestión del uso del museo y por otro con intervenciones físicas controladas. Además, destacan el potencial de la simulación energética como herramienta de diagnóstico y planificación, permitiendo anticipar escenarios y optimizar decisiones antes de ejecutar obras físicas.

Si bien las estrategias simuladas se enfocaron principalmente en la reducción de transferencia de calor sensible, la evaluación de humedad relativa (HR), no se incluye en esta instancia debido a que las validaciones con datos medidos in situ aún se encuentran en proceso. No obstante, se reconoce que algunas medidas propuestas, como el control de aforo, pueden influir indirectamente con las condiciones de HR (calor latente). Considerando que, según la bibliografía especializada, los daños derivados de valores inadecuados o fluctuaciones bruscas de HR suelen ser más severas que los asociados a la temperatura, se plantea incorporar este análisis en una etapa posterior, una vez completada su validación.

Los resultados de este trabajo se presentan como herramientas potenciales para la toma de decisiones y gestión de diversos museos de la provincia. Contribuyen a fortalecer las estrategias de conservación preventiva y promover la sostenibilidad de los recursos de las instituciones. Este estudio se enmarca en las actas acuerdo celebradas entre nuestros proyectos de investigación y El Museo Arquidiocesano de Arte Sacro, la Dirección de Patrimonio de la Provincia de Tucumán y el Museo Nacional Casa Histórica de la Independencia.

Como futura línea de investigación, se propone el desarrollo de nuevos índices que integren un nuevo marco de análisis, incluyendo la influencia de las diferentes configuraciones de la envolvente y el impacto de las cargas internas derivadas directamente de la gestión museográfica. Esta aproximación podría permitir vincular de manera precisa el desempeño térmico edilicio con estrategias operativas, fortaleciendo la capacidad de predicción y optimizando medidas de conservación preventiva en casas-museo.

## **FUENTES DE FINANCIAMIENTO**

Esta investigación contó con el financiamiento de una beca doctoral del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y del proyecto PIUNT B701 del Consejo de investigación de la Universidad Nacional de Tucumán (CIUNT).

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos especialmente a la Dirección y Secretaría del Museo Nacional Casa Histórica de la Independencia y al Consejo de Administración del Museo Arquidiocesano de Arte Sacro, por su valiosa colaboración y por facilitar el acceso necesario para la realización de los relevamientos y mediciones que sustentan esta investigación.

## **REFERENCIAS**

- Annibaldi, V., Cucchiella, F., De Berardinis, P., Gastaldi, M., y Rotilio, M. (2020). An integrated sustainable and profitable approach of energy efficiency in heritage buildings. *Journal of Cleaner Production*, 247, 119516. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119516>
- ASHRAE. (2014). Measurement of energy, demand, and water savings. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- ASHRAE. (2019). Museums, galleries, archives, and libraries. In Owen M (Ed.), *ASHRAE handbook: HVAC applications* (SI edition). American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers.
- Bazán, L. N. (2020). Influencia de las condiciones ambientales en museos en la satisfacción de los visitantes: Su evaluación (Doctoral dissertation, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)).

- Bonora, A., Fabbri, K., y Pretelli, M. (2019). Environmental microclimate management and risk in the unesco world heritage site of villa barbaro maser (Italy). *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 269-276.
- Bonora, A., Fabbri, K. y Pretelli, M. (2021). Microclima interior histórico: el papel de la climatización en la restauración de edificios patrimoniales: El caso del Palacio de Venaria Reale. En *Journal of Physics: Conference Series* (vol. 2069, nº 1, p. 012078). IOP Publishing.
- CIE. (2004). Control of damage to museum objects by optical radiation. *International Commission on Illumination*.
- De Guichen, G. (1987). *El Clima en los museos*. ICCROM/PNUD/UNESCO.
- Ferdyn-Grygierek, J. (2016). Monitoring of indoor air parameters in large museum exhibition halls with and without air-conditioning systems. *Building and Environment*, 107, 113–126. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.07.024>
- Marinsalda, J. C. (2016). *La casa histórica de la independencia argentina* (Disertación doctoral, Universidad de Sevilla).
- Schito, E., Conti, P., y Testi, D. (2018). Multi-objective optimization of microclimate in museums for concurrent reduction of energy needs, visitors' discomfort and artwork preservation risks. *Applied Energy*, 224, 147-159.
- Thomson, G. (1986). *The Museum Environment*. Amsterdam: Elsevier.
- Zamora, M. S., O'Donell, B. M., Ajmat, R. F., y Sandoval, J. D. (2016). Metodología para evaluar la calidad ambiental y de iluminación en espacios expositivos de casas-museos. *XIII Congreso Panamericano de Iluminación LUXAMÉRICA 2016*, La Serena, Chile.
- Zamora, M. S. (2019). *Museo Arquidiocesano de Arte Sacro de Tucumán: Informe general de condiciones ambientales y evaluación de riesgos – Junio 2019*. ILAV, CONICET–UNT.
- Zamora, M. S., O'Donell, B. M., y Ajmat, R. F. (2020). Development of a methodology for materials selection to control exhibition objects in House Museums. *International Journal of Conservation Science*, 11(3), 689-702.

## **INTERVENTIONS IN HOUSE MUSEUMS IN SAN MIGUEL DE TUCUMÁN: ENERGY SIMULATION AND COMPARATIVE ANALYSIS**

### **ABSTRACT**

The energy rehabilitation of house-museums presents specific challenges in simultaneously preserving their material integrity while ensuring adequate environmental conditions for the collections. This study assesses the impact of passive, reversible, and management-oriented interventions on the thermal behavior of two exhibition rooms in house-museums located in San Miguel de Tucumán, Argentina: the Museo Arquidiocesano de Arte Sacro and the Casa Histórica de la Independencia. In situ measurements of temperature and relative humidity were carried out to validate the energy simulation model developed in OpenStudio–EnergyPlus. Scenarios analyzed included the incorporation of thermal insulation in roofs and window frames, as well as the control of internal heat gains. Performance was assessed through indicators such as the percentage of time within the recommended conservation range ( $T = 15\text{--}25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), the Heritage Microclimate Risk index (HMR, T), and daily temperature fluctuations. Results show reductions of up to 80% in summer fluctuations at CHI and 75% in out-of-range conditions at MAS, with cumulative improvements when strategies are applied in combination for both cases. It is concluded that, in resource-limited contexts, these interventions should be prioritized for their technical feasibility, compatibility with heritage conservation, and ability to integrate into preventive conservation plans.

**Keywords:** house-museum, preventive conservation, energy simulation and energy rehabilitation.

## **DETERMINACIÓN DE LAS PÉRDIDAS ENERGÉTICAS Y PRODUCCIÓN NOCTURNAS PARA UN DESTILADOR SOLAR ASISTIDO CON TANQUE ACUMULADOR**

**Fabián L. Venier, Rodolfo G. Stoll, Javier Marchesi, María I. Pontín, Javier H. Zizzias**

Grupo de Energía Solar – Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de Río Cuarto (UNRC) Ruta Nacional 36 km 601 C.P. 5800 – Córdoba  
Tel. 0358-4676488 email: [fvenier@ing.unrc.edu.ar](mailto:fvenier@ing.unrc.edu.ar)

**RESUMEN:** Este estudio presenta un análisis detallado de un destilador solar asistido por un colector solar de placa plana y un tanque de almacenamiento, con especial énfasis en la cuantificación de las pérdidas energéticas nocturnas del sistema. Mediante un ensayo en condiciones aisladas, se recopilieron datos experimentales para evaluar los factores que influyen en las pérdidas térmicas durante la noche, determinando el coeficiente de pérdidas nocturnas del tanque de almacenamiento. La correlación de este parámetro con los resultados experimentales permite establecer un modelo predictivo del comportamiento del sistema en condiciones de producción nocturna. Adicionalmente, se propone un modelo teórico para estimar la producción de agua destilada durante la noche, lo que constituye un avance para la optimización del diseño de destiladores solares. Este trabajo contribuye al desarrollo de herramientas de simulación más precisas, facilitando la implementación de sistemas sostenibles de desalinización solar con mayor eficiencia energética. Los hallazgos obtenidos representan un aporte significativo hacia soluciones tecnológicas escalables para enfrentar la escasez de agua en regiones áridas y semiáridas.

**Palabras clave:** destilación solar, pérdidas térmicas nocturnas, coeficiente de pérdidas, modelado predictivo, desalinización sostenible.

### **INTRODUCCIÓN**

La demanda de agua potable a nivel global se incrementó por el aumento poblacional, lo que ha impulsado a la búsqueda de soluciones sostenibles tanto para la desalinización y descontaminación del agua dulce disponible. La escasez de agua potable afecta a millones de personas con implicaciones directas sobre la salud y el desarrollo socioeconómico de las poblaciones (Tiwari G.N. et al., 2008).

La destilación solar surge como una alternativa viable, especialmente en regiones áridas y remotas con alta irradiación solar como la de la región centro sur de Córdoba (Galimberti P. et al. 1995), la cual es una región cuya heliofanía favorece las aplicaciones solares (Grossi Gallegos H., Righini R., 2007), ofreciendo una solución de bajo impacto ambiental para potabilización. En Argentina, la alta irradiación solar favorece la aplicación de esta tecnología, con experiencias exitosas en San Luis y Córdoba con destiladores solares asistidos con colectores (Marchesi J. et al., 2006) y con destiladores solares con tanque acumulador (Zizzias J. et al., 2012).

Un destilador solar es un dispositivo que utiliza la energía solar para purificar agua salobre o contaminada. Este sistema consiste de una batea y que tiene adosada una cubierta. La radiación solar que ingresa por la cubierta evapora el agua contenida en una batea; el vapor entra en contacto con la superficie fría de la cubierta, donde se condensa y se recolecta como agua limpia. Los destiladores solares se clasifican en pasivos (que operan sin ayuda externa) y activos (que incorporan sistemas



adicionales, como calentadores o concentradores, para mejorar su eficiencia). Entre las innovaciones en destiladores activos destacan el uso de concentradores cilíndricos parabólicos (CCP) (Panchal et al., 2021), materiales de cambio de fase (Kumar S. et al. 2024), colectores solares (Marchesi et al., 2006) o tanques acumuladores integrados (Zizzias J. et al., 2012). Estudios más recientes (Mevada et al., 2022; Nema et al., 2025) han profundizado en el papel del almacenamiento térmico y las estrategias de retención de calor para mejorar la producción nocturna.

Sin embargo, optimizar estos diseños requiere evaluar múltiples variables, desde parámetros operativos hasta condiciones climáticas. Aquí es donde la simulación emerge como una herramienta indispensable: permite modelar el comportamiento del destilador, predecir su rendimiento y reducir costos de experimentación. Por ejemplo, Cooper (1973) pionero en simular digitalmente el funcionamiento transitorio de destiladores, sentó las bases para estudios posteriores. Más tarde, Voroupulos et al. (2003) desarrollaron ecuaciones lineales que vinculan condiciones climáticas con la producción de agua, adaptables a distintos tipos de destiladores. Estos avances demuestran que el modelado físico-matemático, basado en balances de energía (Tiwari et al., 2008), es clave para diseñar sistemas más eficientes y escalables.

En este sentido, el Grupo de Energía Solar (GES) de la Universidad Nacional de Río Cuarto ha investigado el destilador solar con tanque acumulador integrado y presentando una modificación asistido por dos colectores solares (DS2C), logrando un aumento significativo en la producción de agua destilada (Marchesi J. et al., 2006; Marchesi, J. et al., 2009; Zizzias J. et al.; 2010; Zizzias J. et al.; 2012). No obstante, aún no se ha explorado la optimización del funcionamiento de este dispositivo. El objetivo del estudio es presentar un modelo que permita realizar un análisis de sensibilidad del prototipo durante el período de producción nocturna.

### ***Prototipo experimental***

El prototipo experimental empleado se muestra en la figura 1 fue desarrollado por Marchesi J., et al., (2006), el que consiste en un módulo de destilador con una superficie de batea de 1 m<sup>2</sup> y con cubierta asimétrica desmontable. de vidrio de espesor 0,004 m. Este diseño solo permite una única orientación para su operación, la que corresponde a su eje puesto en la dirección Este-Oeste. En estas condiciones casi toda la radiación solar ingresará al destilador por la placa de vidrio principal. A este destilador se le adosó en su parte inferior un Tanque Acumulador de Acero Inoxidable cuyas medidas son 0,8 m de altura por 0,8 m de diámetro. La batea tiene en su base una abertura circular de igual diámetro que el tanque y es por donde se comunican ambas partes. La alimentación es por la parte superior del tanque, luego de que el agua se precaliente en dos colectores solares, colocados en paralelo, de placa plana de 2 m<sup>2</sup> de superficie cada uno, orientados al Norte con un ángulo de inclinación de 44°.

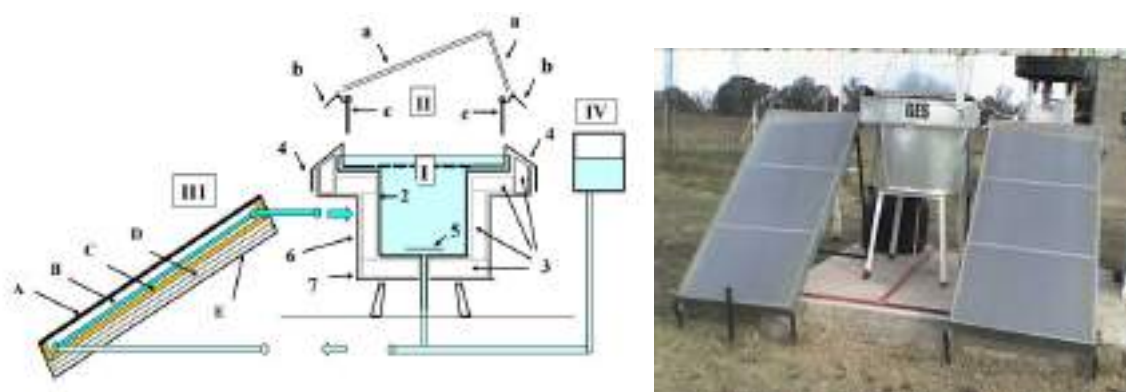


*Figura 1: Diagrama e imagen del destilador solar asistido térmicamente (DS2C)*

Las principales partes separadas, fuera de escala son: (I) Batea con acumulador. (II) Cubierta vidriada asimétrica desmontable. (III) Colector solar plano. (IV) Tanque de alimentación y control del nivel de la batea.

En (I) tenemos: I.2. Tanque cilíndrico, prolongación de la batea. I.3. Aislantes de poliestireno expandido. I.4. Manta de material plástico que cubre el fondo de la batea y que vuelca hacia los laterales para cubrir la parte superior de sus aislaciones (el sector del círculo que cubre el cilindro perforaciones). I.5. Placa difusora. I.6. Cubierta metálica para la protección del material aislante. I.7. Soporte para elevación y nivelación.

En (II) se encuentra: II.a. Vidrio plano de 0,004 m. II.b. Moldura de acero inoxidable que contiene el canal colector del destilado, el canal invertido para alojar las placas de soporte y sellado de la cubierta vidriada con la batea. II.c. Placa compuesta de material aislante (policarbonato y vidrio) que permiten el cierre entre la cubierta vidriada y la batea, encerrando la atmósfera contenida entre ambas.

En (III) tenemos: III.A. Cubierta de policarbonato celular. III.B. Receptor – convertor de la radiación solar. III.C. Aislante térmico (lana de vidrio). III.D. aislante térmico (poliestireno expandido). III.E. Caja metálica.

### **Pérdidas térmicas nocturnas**

La producción nocturna de agua destilada está directamente vinculada a las pérdidas térmicas del tanque acumulador a través de dos mecanismos clave:

1. Transferencia de calor útil.

El calor almacenado en el tanque:

$$Q_{\text{útil}} = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (1)$$

Se transfiere a la batea durante la noche, generando evaporación.

Las pérdidas térmicas:

$$Q_{\text{pérdidas}} = U_{\text{tank}} \cdot A_{\text{tank}} \cdot (T_{w_{\text{tank}}} - T_a) \quad (2)$$

Reducen esta energía disponible, disminuyendo la producción según:

$$\dot{m}_{\text{destilado}} \propto \frac{Q_{\text{útil}} - Q_{\text{pérdidas}}}{h_{fg}} \quad (3)$$

Donde  $h_{fg}$  es el calor latente de vaporización.

2. Constante de decaimiento del sistema:

Las pérdidas determinan la velocidad de enfriamiento:

$$\kappa = \frac{U_{\text{tank}} \cdot A_{\text{tank}}}{m \cdot c_p} \quad (4)$$

Una  $\kappa$  baja (bajas pérdidas) mantiene  $T_{w_{\text{tank}}}$  elevada por más tiempo, extendiendo la producción.

Una  $\kappa$  alta (altas pérdidas) acelera el enfriamiento, reduciendo la producción acumulada.

Los resultados de este estudio constituyen la base fundamental para cuantificar en futuras investigaciones el aporte energético de los colectores solares acoplados al sistema (Figura 1), permitiendo así optimizar tanto el dimensionamiento del área de captación como los parámetros de operación, con el objetivo de maximizar la eficiencia global del destilador solar en condiciones reales de operación.

Para el desarrollo de un modelo que permita determinar la producción nocturna se realizó un ensayo de enfriamiento con objeto de determinar las pérdidas térmicas nocturnas del tanque acumulador aislado, excluyendo la influencia de los colectores solares y del destilador. Los resultados obtenidos permitirán caracterizar las pérdidas energéticas asociadas a condiciones ambientales y al acoplamiento del sistema de destilación, así como cuantificar el calor útil transferido desde el tanque hacia el destilador durante el periodo nocturno.

## METODOLOGÍA

### ***Método de ensayo de pérdidas nocturnas del tanque aislado***

Para realizar el ensayo, se retiró la cúpula de vidrio del destilador y se aisló térmicamente la interfaz tanque-destilador mediante una placa de poliestireno expandido (EPS) de 10 cm de espesor. El tanque acumulador, con capacidad de 400 litros, presentaba un aislamiento externo de 10 cm compuesto por perlas de EPS de distintos diámetros.

El experimento consistió en calentar el agua del tanque hasta alcanzar una temperatura uniforme de aproximadamente 60°C, valor cercano a la temperatura máxima registrada en la batea del destilador. Para ello, se implementó un sistema de recirculación en circuito cerrado equipado con una resistencia calefactora de 2000 W y una bomba centrífuga de ¾ HP, que mantenía un flujo continuo desde la salida inferior hasta la entrada superior del tanque.

El monitoreo térmico se realizó mediante termocuplas tipo T distribuidas verticalmente con un espaciado de 20 cm, complementado con mediciones de temperatura ambiente. La adquisición de datos se efectuó a intervalos de 5 minutos utilizando un registrador de datos Onset HOBO UX120-014M, extendiéndose las mediciones durante 12 horas posteriores a la estabilización térmica. La homogeneidad del sistema se verificó mediante una diferencia de temperatura inferior a 1°C entre la entrada y salida del circuito. En la Figura 2 se esquematiza la configuración experimental: el agua es impulsada desde la parte superior del tanque, circula a través de la bomba, es calentada por la resistencia eléctrica (2000 W) y retorna por la base. Las termocuplas ( $T_1$  a  $T_3$ ) registran las temperaturas cada 20 cm de altura, mientras que el tanque de acero se encuentra rodeado por el aislante de poliestireno expandido EPS.

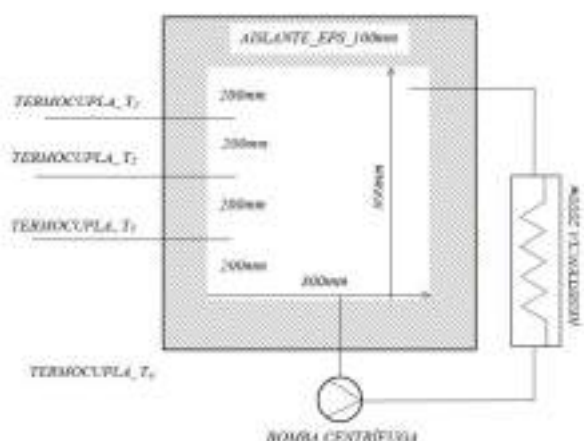


Figura 2: Corte del tanque aislado del DS2C para el ensayo de pérdidas nocturnas

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### ***Modelo de pérdidas energéticas del tanque acumulador***

Para las pérdidas nocturnas, el balance de energía en el tanque se simplifica, ya que dichas pérdidas de energía son por la influencia del medioambiente. Se consideró que las pérdidas de calor ocurren fundamentalmente por conducción a través del aislante que cubre al tanque cilíndrico. Se despreció la capacidad calorífica de las paredes del tanque de acumulación y que no existe estratificación.

En la Figura 3 se representa el circuito equivalente correspondiente al ensayo nocturno del tanque aislado en donde  $T_w$  es la temperatura del agua del tanque,  $T_p$  corresponde a la temperatura de la pared exterior del tanque,  $T_a$  es la temperatura ambiente. También, se muestran las distintas resistencias relacionadas con las pérdidas por conducción, convección y radiación.



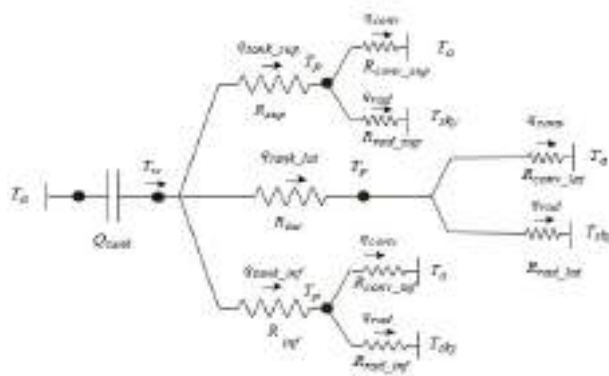


Figura 3: Circuito térmico equivalente para el modelo de pérdidas nocturnas del tanque aislado

El modelo de enfriamiento nocturno considera las resistencias térmicas del sistema, a saber:

I. Resistencia del aislante lateral (Ec. 1), se trata de un caso de conducción radial en un cilindro de acuerdo a Nellis G. y Klein S., (2009):

$$R_{lat} = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi L \cdot k_{poli\_per}} \quad (5)$$

En donde  $r_2$  y  $r_1$  son los radios exterior e interior,  $L$  la altura, y  $k_{poli\_per}$  la conductividad térmica del poliestireno perlado, mientras que  $k_{pol}$  es la conductividad del poliestireno en placa.

II. Resistencias inferior y superior dadas por las ecuaciones (2) y (3), responden a casos de conducción a través de placa plana, dadas por:

$$R_{inf} = \frac{L}{2 \cdot \pi \cdot r_1^2 \cdot k_{poli\_per}} \quad (6)$$

$$R_{sup} = \frac{L}{2 \cdot \pi \cdot r_1^2 \cdot k_{pol}} \quad (7)$$

Las resistencias  $R_{inf}$ ,  $R_{sup}$  y  $R_{lat}$  corresponden a las resistencias del fondo, tapa y paredes laterales del tanque, respectivamente.

III. Del lado exterior del tanque existirán pérdidas simultáneas por convección y radiación. De acuerdo con Nellis G. y Klein S., (2009); Tiwari G.N. y Tiwari A. K. (2008), el coeficiente de pérdidas por convección y radiación exterior a las mismas está dado por:

$$h_{lg} = h_{conv_{ga}} + h_{rad_{ga}} \quad (8)$$

$$h_{conv_{ga}} = 5,7 + 3,8 \cdot w \quad (9)$$

$$h_{rad_{ga}} \approx \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_{prom}^3 \quad (10)$$

$$T_{prom} = \frac{T_p + T_a}{2} \quad (11)$$

Con este resultado se determinan las resistencias inferior, superior y lateral, que se corresponden con las pérdidas externas de calor como se muestra en la Figura 3.

$$R_{cr/l} = \frac{1}{h_{lg} \cdot A_{lat}} \quad (12)$$

$$R_{cr/i} = \frac{1}{h_{lg} \cdot A_{inf}} \quad (13)$$

$$R_{cr/s} = \frac{1}{h_{lg} \cdot A_{sup}} \quad (14)$$

Siguiendo con el circuito de la figura 3:

$$R_1 = R_{inf} + R_{cr/i} \quad (15)$$

$$R_2 = R_{sup} + R_{cr/s} \quad (16)$$

$$R_3 = R_{lat} + R_{cr/l} \quad (17)$$

La resistencia del tanque ( $R_{tank}$ ) por combinación en paralelo de las resistencias 1, 2 y 3 es:

$$R_{tank} = \left( \left( \frac{1}{R_1} \right) + \left( \frac{1}{R_2} \right) + \left( \frac{1}{R_3} \right) \right)^{-1} \quad (18)$$

#### **Comparación del comportamiento del prototipo y de su modelo físico matemático**

El resultado del ensayo nocturno puede observarse en la Figura 4 en donde se comparan las temperaturas medidas experimentalmente durante el ensayo y las temperaturas que predice el modelo propuesto. En la gráfica se pueden observar los valores de la constante de tiempo experimental y simulado.

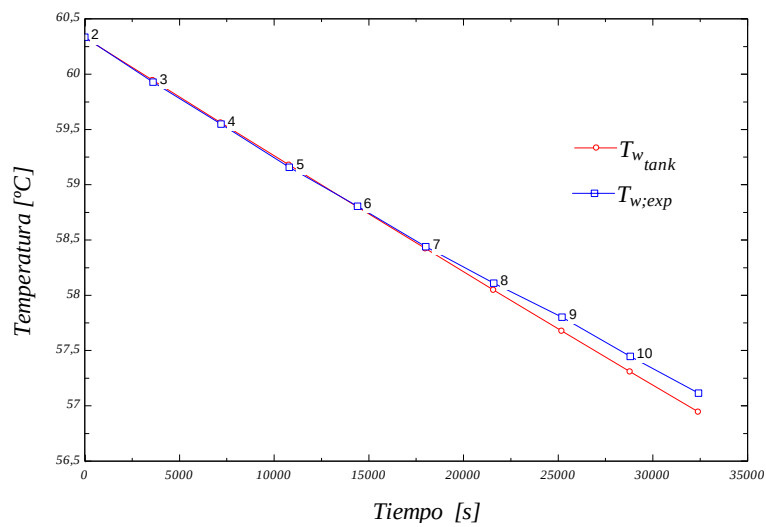


Figura 4: Temperatura medida experimental versus temperatura de predicción del ensayo nocturno

El modelo simulado predice los datos experimentales validando la metodología empleada y confirma que las pérdidas predominantes corresponden efectivamente a mecanismos conductivos a través del aislamiento térmico.

Se identificó un  $U_{tank} = 2,1 [w/m^2 \cdot K]$ , con pérdidas predominantes por conducción a través del aislamiento. Las comparaciones del modelo propuesto en relación a los datos experimentales de las pérdidas de calor se muestran en la Figura 5. Las pérdidas nocturnas de calor del tanque aislado son sensibles a los cambios de la temperatura ambiente como se muestra.

Este ensayo permitió validar el modelo térmico para predecir la producción nocturna lo que permite establecer para el futuro, criterios de diseño en lo que respecta a la reducción de  $U_{tank}$  mediante aislamientos de menor conductividad y/o aumentar la masa de agua ( $m$ ) para elevar la constante de tiempo  $\tau$  y extender la producción.

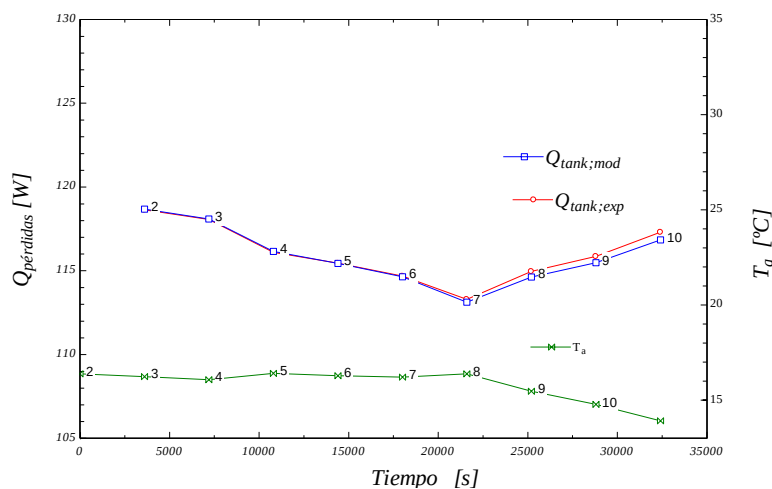


Figura 5: Pérdidas de calor horarias durante el ensayo nocturno de enfriamiento. Comparación de los resultados experimentales con el modelo propuesto, los cambios observados son sensibles a la variación de  $T_a$

### Producción nocturna del DS2C

Para la etapa de producción nocturna las pérdidas térmicas serán por conducción a través de las paredes de la batea ( $U_b$ ) y del tanque ( $U_{tank}$ ), el cual ya fue ensayado, sumado finalmente a las pérdidas térmicas de la batea al vidrio ( $U_{top}$ ) y de la cúpula del prototipo al ambiente por convección y radiación.

El modelo térmico de producción nocturna del prototipo DS2C se muestra en la Figura 6 en el que se muestran las pérdidas por el tanque  $U_{tank}$ , que fueron evaluadas en el ensayo nocturno. En esta etapa el calor contenido en el tanque se transfiere a la superficie de la batea y a las paredes del tanque.

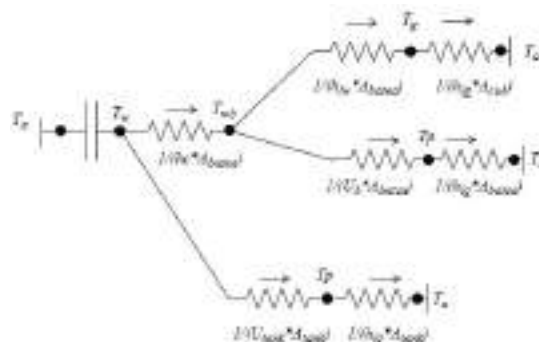


Figura 6: Modelo térmico de pérdidas en el prototipo DS2C durante la producción nocturna

### **Análisis del balance de energía nocturno del DS2C**

Balance de energía en la cubierta de vidrio de acuerdo a Tiwari G.N. y Tiwari A. K., (2008):

$$\dot{Q}_{r_{wg}} + \dot{Q}_{c_{wg}} + \dot{Q}_{e_{wg}} = \dot{Q}_{r_{gsky}} + \dot{Q}_{c_{ga}} \quad (19)$$

Balance de energía en la batea:

$$\dot{Q}_{batea} = \dot{Q}_{r_{wg}} + \dot{Q}_{c_{wg}} + \dot{Q}_{e_{wg}} + \dot{Q}_{U_{batea}} \quad (20)$$

Balance de energía en el agua:

$$(m \cdot c_p)_w \cdot \frac{dT_w}{dt} = \dot{Q}_{batea} + \dot{Q}_{U_{tank}} \quad (21)$$

Los distintos calores de las expresiones anteriores pueden expresarse en términos de sus coeficientes de transferencia de calor respectivos.

$$h_{lw} \cdot A_{batea} \cdot (T_w - T_g) = h_{lg} \cdot A_{cubierta} \cdot (T_g - T_a) \quad (22)$$

$$h_w \cdot A_{batea} \cdot (T_w - T_{wb}) = h_{lw} \cdot A_{batea} \cdot (T_w - T_g) + U_{batea} \cdot A_{lat_{batea}} \cdot (T_{wb} - T_a) \quad (23)$$

$$m \cdot c_p \cdot \frac{dT_w}{dt} = h_w \cdot A_{batea} \cdot (T_w - T_{wb}) + U_{tank} \cdot A_{tank} \cdot (T_w - T_a) \quad (24)$$

En donde  $h_{lg}$  está dado en la Ec. 8, mientras que  $h_w$  puede obtenerse de la Ec. 23 y  $h_{lw}$  se determina como:

$$h_{lw} = h_{conv_{wg}} + h_{rad_{wg}} + h_{evap_{wg}} \quad (25)$$

### **Consideraciones del Modelado Térmico**

Se mantuvo un nivel constante de agua en la cámara de destilación mediante un sistema de reposición controlada desde el tanque acumulador. La producción de agua destilada durante la noche, se reemplaza introduciendo un volumen equivalente de agua de reposición (a temperatura ambiente  $T_a$ ) en la base del tanque, manteniendo así la masa total del sistema.

El ingreso de agua fría creó una zona de mezcla homogénea que se extendió hasta 60 cm desde la base del tanque, verificada mediante termopares ( $\Delta T < 1^\circ\text{C}$  en esta región). Este efecto de mezclado forzado se consideró utilizando un perfil de temperatura uniforme en la zona inferior del tanque.

Las pérdidas por evaporación se incorporaron implícitamente en el coeficiente efectivo de transferencia de calor ( $U_{top}$ ). La capacidad térmica de la cubierta de vidrio se despreció debido a su rápido equilibrio con el ambiente. Un sello hidráulico hermético evitó pérdidas de vapor, confirmado mediante inspecciones visuales. Se consideraron áreas específicas para cada componente: batea de destilación 1.032 m<sup>2</sup>, cubierta de vidrio 2.05 m<sup>2</sup> y tanque acumulador 2.4 m<sup>2</sup>.

La dinámica térmica sigue la formulación de primer orden típica de destiladores solares, (Thakur V.K., et al., 2021):

$$\frac{dT_w}{dt} + a \cdot T_w = f(t) \quad (26)$$

En dónde  $a$  incorpora tanto las pérdidas térmicas como los efectos de reposición,  $f(t)$  representa las condiciones ambientales variables. La solución presenta el decaimiento exponencial característico observado experimentalmente. Estas suposiciones se justifican adicionalmente por la capacidad del

modelo para reproducir las características clave de los datos experimentales en múltiples ciclos de operación.

### Discusiones sobre el modelo

A partir del equilibrio energético en la cubierta podemos determinar:

$$T_{g_{mod}} = \frac{h_{lw} \cdot A_{batea} \cdot T_w + h_{lg} \cdot A_{cubierta} \cdot T_a}{h_{lw} \cdot A_{batea} + h_{lg} \cdot A_{cubierta}} \quad (27)$$

La predicción sobre la temperatura de la cubierta de vidrio durante a producción nocturna se muestran en la Figura 7.

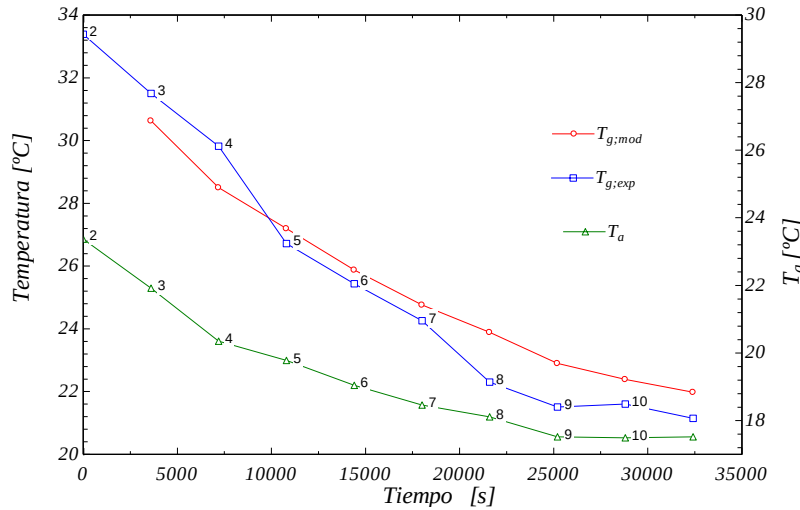


Figura 7: Predicción de la temperatura de la cubierta y temperatura medida experimentalmente

### Determinación numérica de la temperatura del agua en la batea

La temperatura del agua ( $T_w$ ) se calculó numéricamente utilizando una implementación en Python del método de Crank-Nicolson. Este esquema numérico, de segundo orden en tiempo, es ampliamente reconocido para resolver ecuaciones de difusión de calor parabólicas, como la que modela la transferencia de calor transitoria en este sistema térmico. La elección de este método se basó en su estabilidad incondicional y su alta precisión, propiedades cruciales para capturar con fiabilidad la dinámica de enfriamiento nocturno exponencial del sistema, incluso utilizando pasos de tiempo relativamente grandes.

La implementación numérica incluyó la discretización del balance energético, incorporando los coeficientes de pérdidas térmicas ( $U_{top}$  y  $U_{tank}$ ) y la resolución iterativa del perfil de temperatura, considerando acoplamientos entre conducción-convección en las paredes de la batea y radiación hacia el ambiente.

Los resultados (Figura 8) muestran una concordancia notable entre las temperaturas simuladas ( $T_w$ , Crank Nicolson y  $T_{w,mod}$ ) y las medidas experimentalmente ( $T_{w,exp}$ ), validando el enfoque. El análisis reveló que el decaimiento térmico nocturno sigue una respuesta exponencial clásica de primer orden, descrita por:

$$T_{w,mod} = T_{w0} \cdot e^{(-k \cdot tiempo)} - T_a \cdot e^{(-k \cdot tiempo)} + T_a \quad (28)$$

donde la constante de decaimiento  $k$  (Ecuación 28):

$$k = \frac{U_{top} \cdot A_{cubierta} + U_{tank} \cdot A_{tank}}{m \cdot c_p} \quad (29)$$

cuantifica el efecto combinado de las pérdidas por la cubierta y el tanque. Esta formulación confirma que la tasa de enfriamiento es proporcional a la diferencia  $T_w - T_a$ , típica de sistemas gobernados por inercia térmica.

El esquema de Crank-Nicolson demostró ser robusto frente a fluctuaciones rápidas de temperatura, como las ocurridas durante la transición día-noche, evitando inestabilidades numéricas comunes en métodos explícitos. Esta capacidad es crítica para predecir la producción de agua destilada en condiciones reales, donde la dinámica transitoria está dominada por la capacidad térmica del sistema.

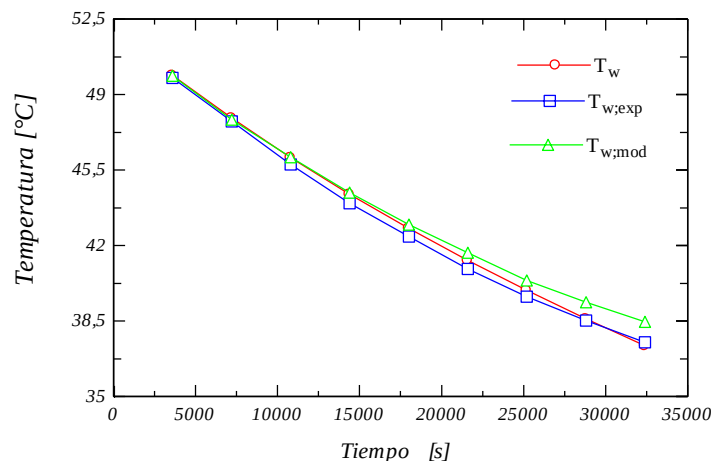


Figura 8: Predicción de la temperatura del agua  $T_w$  (Crank Nicolson), temperatura  $T_{w;mod}$  (Ley de enfriamiento) y temperatura medida experimentalmente  $T_{w;exp}$

La producción nocturna también pudo ser reproducida por la aplicación del modelo como se muestra en la Figura 9.

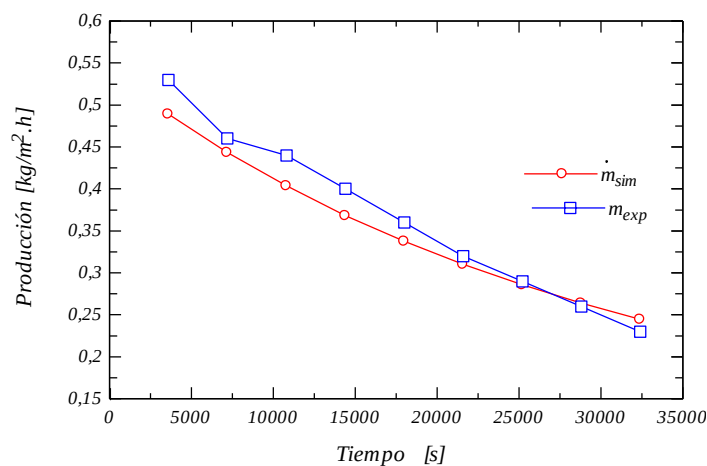


Figura 9: Predicción de la producción nocturna del prototipo DS2C y la producción medida experimentalmente

Con las determinaciones de las pérdidas en el prototipo es posible determinar el calor útil ( $Q_{util}$ ), como se muestra en la ecuación 29, encontrando que el mismo está en proporción al calor que interviene en la convección, radiación y evaporación ( $Q_{ew}$ ) dentro de la cúpula del destilador como se muestra en la Figura 10.

$$\dot{Q}_{util} = \dot{Q}_{tanque} - \dot{Q}_{perdidas} \quad (30)$$

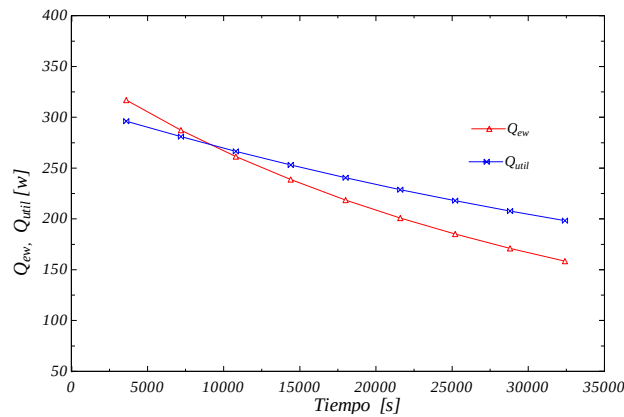


Figura 10: Comparación del calor útil ( $Q_{uit}$ ) con el calor necesario ( $Q_{ew}$ ) para la producción nocturna.

## CONCLUSIONES

Este trabajo demostró que la caracterización experimental de las pérdidas térmicas nocturnas del tanque aislado ( $U_{tank}$ ) fue fundamental para desarrollar un modelo predictivo preciso de producción nocturna. Los resultados revelaron que el sistema sigue una dinámica de primer orden con constante de decaimiento  $\kappa$ , donde el enfriamiento es proporcional a la diferencia  $T_w - T_a$ .

El modelo reproduce con precisión las temperaturas del agua en la batea ( $T_w$ ) y cubierta ( $T_g$ ), como así también la producción nocturna acumulada.

La correlación entre pérdidas térmicas ( $Q_{pérdidas}$ ) y producción nocturna establece que la reducción de  $U_{tank}$ , mejoraría la producción. Además, el acoplamiento con colectores solares (Fig. 1) deberá optimizarse considerando esta inercia térmica.

Para trabajos futuros el modelo validado permite realizar un análisis de sensibilidad para optimizar geometrías y materiales, extendiendo el estudio al ciclo diurno, integrando la contribución solar y explorar el uso de materiales para amortiguar el decaimiento de  $T_w$ .

## REFERENCIAS

- Cooper, P. I. (1973). Digital simulation of experimental solar still data. *Solar Energy*, 14(4), 451-468. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(73\)90023-6](https://doi.org/10.1016/0038-092X(73)90023-6).
- Galimberti P., Adaro J., Barral J., Lema A. (1995). Variables climáticas de la región centro sur de Córdoba. ASADES. 04.67. San Luis. Argentina. ISSN: 2314-1433
- Grossi Gallegos H., Righini R., (2007). Atlas de radiación solar de la República Argentina. Secretaría de Energía. Buenos Aires. ISBN: 978-987-9285-36-7.
- Panchal H., Kumar S.K., Suresh M., Israr M., Sengottain S. (2021): A concise review on Solar still with parabolic trough collector, *International Journal of Ambient Energy* <https://doi.org/10.1080/01430750.2021.1922938>
- Kumar S., Ahmad A., Irshad K., Prakash O., Kausher R., Mozammil Hasnain S.M., Pandey S., Tapalova A., Akylbekov N., Rustem Zairov R. (2024). Solar stills: A review for water scarcity solutions. *Heliyon*. 10. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e38751>
- Marchesi J., Ducculi E., Adaro J., Fasulo A. (2006). Destilación solar en la U.N.R.C. Construcción y primeros resultados. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 10, pp. 31-37. ISSN: 0329-5184.
- Marchesi J., Galimberti P., Tobares N., Adaro J., Fasulo A. (2009). Determinación experimental de la producción de un destilador solar respecto a la temperatura del agua en la batea. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 13, pp. 105-111. ISSN: 0329-5184.
- Mevada D., Panchal, H., Ahmadein M., Zayed M., Alsaleh N., Djuansjah J., Moustafa E., Elsheikh A., Sadasivuni K. (2022). Investigation and performance analysis of solar still with energy storage



- materials: An energy- exergy efficiency analysis. Case Studies in Thermal Engineering. Volume 29. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101687>
- Nema A., Thakur V.K., Singh P., Gaur M.K., Shrivastava V., Ray R. (2025). Performance assessment of passive solar still with different thermal energy storage materials. Desalination and Water Treatment. 323. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2025.101288>
- Nellis G., Klein S. (2009). Heat Transfer. Cambridge University Press. ISBN 978-0-521-88107-4.
- Thakur V.K., Gaur M. K., Sagar M. K., Tiwari G: N. (2021). A study on heat and mass transfer analysis of solar distillation system. Journal of Thermal Engineering. Vol. 7. N°5, pp. 1184-1205. DOI: 10.18186/thermal.978021
- Tiwari G.N, Singh H.N., Rajesh Tripathi (2003). Present status of solar distillation. Solar Energy, 75, 367-373. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2003.07.005>
- Tiwari G.N., Tiwari A. K. (2008). Solar distillation practice for water desalination systems. Anamaya Publishers. pp. 182-202. ISBN: 978-1-905740-88-8
- Voropoulos, K., Mathioulakis, E., Belessiotis, V. (2003). Experimental investigation of the behavior of a solar still coupled with hot water storage tank. Desalination, 156, 315–322. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(03\)00362-X](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(03)00362-X)
- Zizzias J., Fasulo A., Venier F., Marchesi J., Odicino L. (2010). Evaluación detallada de un destilador solar colector acumulador. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 14. Impreso en la Argentina. pp. 63-69. ISSN 0329-5184.
- Zizzias J., Stoll R., Marchesi J., Fasulo A., Venier F. (2012). Evaluación mediante simulación de modificaciones propuestas en un destilador solar asistido por un tanque acumulador integrado. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 16. Impreso en la Argentina. ISSN 0329-5184.

## **DETERMINATION OF ENERGY LOSSES AND NIGHTTIME PRODUCTION IN A SOLAR STILL ASSISTED WITH A STORAGE TANK**

**ABSTRACT** This study presents a detailed analysis of a solar still assisted by a flat-plate solar collector and storage tank, with particular emphasis on quantifying the system's nighttime energy losses. Through an isolated conditions test, experimental data were collected to evaluate the factors influencing thermal losses during nighttime operation, determining the storage tank's nocturnal heat loss coefficient. The correlation of this parameter with experimental results enables the development of a predictive model for system performance under nighttime production conditions.

Additionally, a theoretical model is proposed to estimate overnight distilled water production, representing a significant advancement for optimizing solar still designs. This work contributes to developing more accurate simulation tools, facilitating the implementation of sustainable solar desalination systems with enhanced energy efficiency. The findings provide valuable insights for scalable technological solutions to address water scarcity in arid and semi-arid regions.

**Keywords:** solar distillation, nocturnal thermal losses, heat loss coefficient, predictive modeling, sustainable desalination.

## ANÁLISIS DE LA DEMANDA ENERGÉTICA DE LA EXTRACCIÓN DE ACEITES ESENCIALES Y SU COBERTURA CON ENERGÍA SOLAR CONCENTRADA: ENFOQUE EN EL DIMENSIONAMIENTO Y LAS PÉRDIDAS TÉRMICAS DEL CIRCUITO

**Rodolfo G. Stoll<sup>1</sup>, Ariana Posadas<sup>2</sup>, Ezequiel Podversic<sup>1</sup>, Jorge A. Daghero<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Grupo de Energía Solar – Facultad de Ingeniería – UNRC.

<sup>2</sup>Departamento de Aromáticas y Jardinería – Facultad de Turismo y Urbanismo – UNSL

Ruta 36. Km 601. X5804BYA – Río Cuarto. Prov. de Córdoba

Tel. 0358-46768842 e-mail: [rstoll@ing.unrc.edu.ar](mailto:rstoll@ing.unrc.edu.ar)

**RESUMEN:** Este trabajo analiza la viabilidad técnica de aplicar energía solar concentrada para cubrir la demanda térmica de la extracción de aceites esenciales mediante destilación por arrastre de vapor. Se evaluaron dos escalas de producción: una planta móvil piloto y un destilador de laboratorio, relevando variables operativas, consumos energéticos y rendimientos de extracción. En ambos casos, se midió el rendimiento energético como la relación entre la energía consumida (eléctrica o proveniente del gas) y el volumen de aceite obtenido. Los resultados muestran que, a pesar de las diferencias en escala y fuente energética, el consumo relativo fue similar (0,2 kWh/ml), lo que indica que el proceso es reproducible. Además, se destaca un rendimiento energético promedio en la generación de vapor del 55%. El estudio también incluyó una encuesta a productores de aceites esenciales, identificando barreras para la adopción de tecnologías solares, como el desconocimiento técnico y el alto costo inicial. Estos datos permiten dimensionar sistemas solares adaptados a diferentes escalas productivas y proponen lineamientos para su implementación. La integración de energía solar concentrada, acompañada de formación técnica, representa una estrategia viable para descarbonizar este proceso, especialmente en regiones con alta irradiación solar como el centro de Argentina.

**Palabras clave:** aceites esenciales, energía térmica, concentrador cilíndrico parabólico, circuito térmico, eficiencia energética.

### INTRODUCCIÓN

La demanda de energía térmica en procesos industriales representa una porción considerable del consumo global de energía y emisiones, un informe de la Agencia Internacional de la Energía establece que la demanda de energía térmica representa casi la mitad del consumo global de energía, con los procesos industriales consumiendo el 53% de esa energía térmica. Se proyecta que la demanda de calor industrial se expanda un 16 % a nivel mundial durante el período 2023-2028, con China e India representando conjuntamente más de la mitad de este crecimiento. Durante este período, se espera que el desarrollo de energías renovables represente poco más de un tercio de la demanda adicional de calor. Por lo tanto, se prevé que la proporción de energías renovables en el consumo mundial de calor industrial siga aumentando lentamente, del 12 % en 2022 al 15 % en 2028. (IEA, 2024)

El sector industrial en general es el mayor consumidor de energía principalmente para procesos que requieren temperaturas inferiores a 250 °C. Dos tercios de esta demanda están asociados a la energía térmica y se consigue a partir de combustibles fósiles. Con la creciente urgencia de prevenir un cambio climático severo la rápida reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero es imperativa, lo que impulsa la transición hacia fuentes de energía renovable. Si bien la innovación energética avanza, enfrenta desafíos significativos relacionados con la incertidumbre en la inversión, la fragmentación



geopolítica y las restricciones comerciales, las dificultades no técnicas para escalar tecnologías probadas, y las barreras específicas en las economías emergentes y en desarrollo.

Para procesos industriales, que requieren calor en el rango de 100 a 300 °C, los sistemas de concentración solar, como los concentradores cilindroparábolicos (CCP), emergen como una alternativa sostenible y prometedora, alineada con la generación de Solar Heat for Industrial Processes (SHIP). No obstante, su implementación efectiva exige una evaluación técnica rigurosa y una toma de decisiones estratégica, basada en un análisis sistémico que integre múltiples factores críticos. La clave no radica únicamente en adoptar la energía solar, sino en definir cómo, con qué tecnología y a qué escala implementarla, garantizando así una solución óptima en términos técnicos, económicos y ambientales para cada aplicación industrial específica. Esto implica seleccionar metódicamente diseños, componentes y enfoques para el sistema de generación de vapor, respaldados por datos concretos y un profundo conocimiento del contexto socio-económico del proceso. (Ahmad et al., 2025)

Dentro de estos procesos industriales la extracción de aceites esenciales por arrastre de vapor destaca como un caso de estudio relevante: requiere calor a temperaturas entre 100–200 °C, con un alto consumo energético continuo. Actualmente, este método depende predominantemente de calderas a gas o electricidad, lo que incrementa su huella de carbono y costos operativos. Pese a su importancia en industrias farmacéuticas, alimentarias y cosméticas, existen pocos estudios que exploren su integración con energías renovables, como la energía solar concentrada. (Barba et al., 2019).

La producción de aceites esenciales representa una alternativa sostenible para pequeños y medianos productores, especialmente en regiones como el centro de Argentina, como el ejemplo que sucede en Valle del Conlara, San Luis. Su creciente demanda en sectores como la gastronomía, la medicina natural y la cosmética ha impulsado la creación de emprendimientos y políticas educativas especializadas, como es la Tecnicatura Universitaria en Producción de Plantas Aromáticas de la UNSL (Resolución Ministerial R.M. 31/09). Esta carrera, radicada en la Villa de Merlo, un polo turístico enclavado en las Sierras Comechingones, refleja el potencial de esta actividad para dinamizar economías regionales.

La utilización de energía solar concentrada para la generación de vapor en estas instalaciones resulta estratégica, ya que la naturaleza perecedera de las materias primas exige un procesamiento inmediato post-cosecha. Los altos costos de transporte favorecen un modelo descentralizado de producción, permitiendo el procesamiento cerca de las zonas de cultivo y reduciendo significativamente la dependencia de combustibles fósiles caracterizados por su inestabilidad en términos de costo y acceso. Esta aplicación de la energía solar no solo reduce costos logísticos, sino que además, esta estrategia permite aprovechar la alta disponibilidad de radiación solar en zonas con gran potencial energético, como el Valle del Conlara, para satisfacer la demanda térmica. De esta manera se optimiza la sostenibilidad económica y ambiental del proceso. No obstante, su implementación exige superar barreras críticas: el dimensionamiento preciso del sistema para cubrir la demanda de vapor que requiere el proceso de extracción de aceites esenciales y la minimización de pérdidas térmicas en el sistema, que impactan directamente en la eficiencia global del proceso.

En Argentina se han registrado avances en el desarrollo de tecnologías de concentración solar, especialmente orientadas a aplicaciones térmicas de baja y media temperatura. Investigadores del Instituto de Investigaciones en Energía no Convencional (INENCO) de la Universidad Nacional de Salta han trabajado en herramientas numéricas para la simulación del comportamiento térmico de CCP. Uno de sus modelos fue validado experimentalmente mediante un prototipo con un área de apertura de 11 m<sup>2</sup> y un tubo receptor de 6 metros de longitud (Aparicio et al., 2023). En el mismo instituto, se ha desarrollado un modelo térmico utilizando el software Simusol, aplicado a un prototipo con un área de apertura de 5,41 m<sup>2</sup>, como caso de estudio (Dellicompagni y Linares, 2023). Además, el INENCO diseñó y ensayó un prototipo de CCP con fines educativos para calentamiento de agua, alcanzando temperaturas del orden de 70 °C y una eficiencia térmica global pico del 30 % (Dellicompagni et al., 2023).

El Grupo de Energía Solar (GES) de la Universidad Nacional de Río Cuarto ha investigado la tecnología de concentración solar desde 2013, desarrollando un prototipo de CCP para generación de vapor

industrial. Este desarrollo integró dos dimensiones: un diseño mecánico, que incluyó la construcción de la estructura del CCP y la implementación de un mecanismo de seguimiento solar para maximizar la captación; y un diseño térmico, enfocado en optimizar la transferencia de calor y minimizar las pérdidas energéticas.

La primera etapa consistió en el diseño del prototipo (Daghero et al., 2013), su construcción y evaluación experimental del rendimiento térmico (Daghero et al., 2015). Posteriormente se desarrolló un circuito térmico para transmitir la energía solar captada por el CCP a un generador de vapor de agua utilizando como fluido caloportador un aceite nafténico (Paratherm, 2025) de grado alimenticio (Garnica et al., 2018). Debido al bajo rendimiento térmico global obtenido por problemas asociados a la disipación de calor en el circuito térmico, se decidió realizar una modificación del sistema con el fin de mejorar la aislación térmica del mismo. En la nueva versión se incorporaron en el tanque pulmón del sistema, resistencias eléctricas halógenas para asegurar la estabilidad de la temperatura ante fluctuaciones de la radiación solar incidente. La performance de este sistema modificado funcionando en circuito cerrado (sin acoplar al CCP) se evaluó con éxito. El fluido térmico alcanzó una temperatura del orden 150°C al ingreso del generador de vapor. El caudal de vapor generado en estado estacionario fue de 1,3 kg/h con lo cual la eficiencia térmica global fue del 60 %. (Stoll et al., 2023).

Para maximizar la captación solar se implementó un mecanismo para el movimiento azimutal del concentrador, asegurando la incidencia normal de los rayos solares. Inicialmente, se utilizó un mecanismo construido con impresión 3D y con material PLA. (Ortiz et al., 2022).

En el año 2024 se realizaron distintas experiencias que permitieron determinar el comportamiento de un circuito térmico conectado a un CCP. Si bien no se evaluó el desempeño del CCP en el exterior, el sistema auxiliar de calentamiento permitió determinar la influencia de sus componentes en el funcionamiento. Los resultados muestran que si bien la aislación térmica permite reducir el salto de temperatura que se produce en las mangueras flexibles, este valor sigue siendo considerable comparado con los saltos térmicos que se producen en las otras partes del sistema. El aprovechamiento de la energía provista a este sistema con aislación es del 45%, esta performance está influenciada por el fenómeno de alberca, consiguiendo un mejor resultado cuando la temperatura del intercambiador de calor es de 135° C, consiguiendo una producción de 1kg/h. (Stoll et al., 2024).

En este trabajo se realiza un estudio de la eficiencia energética de la tecnología utilizada para la extracción de aceites esenciales. Para ello se evaluó el consumo energético de una planta piloto de extracción de aceites y se lo comparó con el consumo de un equipo de escala laboratorio.

Para estas experiencias, se dispuso de una planta móvil a escala piloto para la producción de aceites esenciales in-situ, que ha sido desarrollada y construida en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Río Cuarto (FI-UNRC) (Figura 2). A través de un convenio de cooperación entre la FI-UNRC y la Facultad de Turismo y Urbanismo de la Universidad Nacional de San Luis (FTU-UNSL), la planta móvil fue trasladada en 2011 a la zona de producción de hierbas aromáticas en el Valle de Traslasierra. El objetivo de este convenio fue establecer una vinculación multi e interdisciplinaria en docencia, investigación y extensión en relación con las diferentes tecnologías de procesamiento post cosecha de especies aromáticas en condiciones silvestres y de cultivo. Los destinatarios directos fueron los alumnos que cursan la Tecnicatura Universitaria en Producción de Plantas Aromáticas y los distintos actores del sector, a través de diferentes actividades de extensión y transferencia. En diciembre de 2022 la Planta móvil fue donada a la FTU-UNSL consolidando así el vínculo interinstitucional y su compromiso con el desarrollo regional.

### ***Ensayos en la Planta móvil PEM 100. Escala piloto***

Entre otras aplicaciones, esta planta de extracción permite la evaluación de especies nativas y exóticas promisorias y la producción de muestras para comercialización como un servicio a los productores de la región. La planta móvil consta de un extractor de aproximadamente 100 litros de capacidad y permite procesar entre 5 a 10 kg de material en cada operación. El vapor es generado fuera del extractor en una caldera de baja presión que funciona con gas envasado y está montada sobre el mismo trailer. Este generador que produce 12 kg/h de vapor a una presión de 1,5 bar, se trata de una caldera pirotubular. El

sistema de condensación de la planta móvil está compuesto por un tanque de agua de 500 litros y está acoplado al condensador del extractor mediante una bomba monofásica de 0,45 HP. En la Figura 1 se muestra el esquema de los dispositivos que integran la planta de extracción de aceites PEM 100.



Figura 1: Esquema de la Planta de extracción de aceites PEM 100

En las experiencias realizadas se utilizó butano comercial (envasado en garrafas de 10 kg, 15 kg y 45Kg), que pertenece a los gases de la tercera familia, la cual comprende a los gases licuados del petróleo, grupos propano-butano (P/B) y propano (P), con un índice de Wobbe entre 72,9 MJ/m<sup>3</sup> y 87,3 MJ/m<sup>3</sup>, según el Código Argentino de Gas (NAG-301, 2006). Asimismo, en la República Argentina los valores de composición del propano, butano y mezcla de ambos están fijados por la Resolución 7/2006 de la Secretaría de Energía de la Nación. En el caso de butano comercial la resolución establece que debe cumplir con una composición de al menos 96 ml/100 ml, lo que determina implícitamente un valor de poder calorífico superior (PCS) igual a 49624 kJ/kg, el cual será utilizado en este trabajo. Cabe destacar que determinar el valor exacto del poder calorífico del gas, carece de importancia dado que la variación en la composición del butano comercial permitida por la Secretaría de Energía de la Nación, resulta en una variación de su poder calorífico menor al 0,07% del valor total (Medina et al., 2012).

Tabla 1: Resultados obtenidos de la extracción realizada en la PEM 100

| Ensayo | Hierba  | Cantidad de material [Kg] | Tiempo de extracción [min] | Consumo de gas [Kg] | Rendimiento [%v/p] | Rendimiento Energético $\eta_E$ | Consumo [Kwh/ml] |
|--------|---------|---------------------------|----------------------------|---------------------|--------------------|---------------------------------|------------------|
| 1      | Tomillo | 8,75                      | 65                         | 1,080               | 0,80               | 0,55                            | 0,21             |
| 2      | Tomillo | 8                         | 65                         | 1,230               | 0,88               | 0,48                            | 0,24             |
| 3      | Tomillo | 8                         | 70                         | 1,075               | 0,88               | 0,59                            | 0,21             |
| 4      | Tomillo | 8                         | 55                         | 0,840               | 0,88               | 0,60                            | 0,17             |
| 5      | Tomillo | 8                         | 50                         | 1,070               | 1,06               | 0,43                            | 0,17             |
| 6      | Tomillo | 4,22                      | 40                         | 0,800               | 1,18               | 0,45                            | 0,22             |
| 7      | Orégano | 6                         | 50                         | 0,880               | 0,73               | 0,52                            | 0,28             |
| 8      | Orégano | 6,52                      | 45                         | 0,82                | 0,84               | 0,50                            | 0,21             |

Durante los ensayos se registraron distintas variables del proceso. El caudal de vapor registrado fue de 12 Kg/h, el caudal del agua de refrigeración es de 3,24 l/min, la temperatura ambiente se mantuvo en un intervalo de 16 a 27 °C, la presión de la caldera fue de 1,5 Kg/cm<sup>2</sup> y la presión de trabajo de 1 Kg/cm<sup>2</sup>. En la Tabla 1 se muestran los resultados obtenidos en la planta de extracción PEM 100, que consistió en medir el consumo eléctrico y de gas para extraer aceites a una cantidad de material orgánico, en estos ensayos se utilizó tomillo y orégano con un contenido de humedad menor al 20% y se estableció un rendimiento térmico que relaciona el caudal de vapor generado ( $\dot{m}_v$ ) multiplicado por el calor de vaporización del agua ( $\lambda$ ) a la presión de trabajo de la caldera y la cantidad de gas utilizado ( $m_g$ ) considerando un poder calorífico superior (PCS) de 49624 kJ/kg, en los tiempos de extracción de cada muestra dado por la Ec. (1).

$$\eta_E = \frac{\dot{m}_v \lambda}{m_g PCS} \quad (1)$$

Los tiempos adoptados quedaron establecidos luego que se notara que el nivel de aceite obtenido se mantuvo constante. También se muestran los rendimientos de extracción que relacionan el volumen de aceite obtenido y la masa de material vegetal en base húmeda utilizado en valores porcentuales.



*Figura 2: Planta de extracción de aceites PEM 100. Merlo, San Luis. Durante el ensayo de rendimiento*

#### **Ensayo de un destilador comercial. Escala laboratorio**

El extractor por arrastre con vapor de aceites esenciales que se muestra en la Figura 3 consta de una cámara de extracción de aproximadamente 5 litros en donde se introducen dos canastas de malla de acero inoxidable donde se carga el material a extraer. El vapor es generado en el mismo recipiente por medio de una resistencia calefactora aislada. La salida de la cámara de extracción está acoplada a un condensador de contracorriente que se conecta a un elemento colector de aceite e hidrolato que permite su separación. El condensador está acoplado mediante un circuito cerrado a un depósito de agua. El agua de refrigeración es impulsada por una bomba de recirculación con un caudal de 0,6 Kg/min.



*Figura 3: Destilador durante el ensayo*

En la figura 4 se observa los puntos donde se realizaron medidas de temperatura durante el ensayo del extractor de aceites esenciales, se midió la temperatura del canasto superior que contiene la materia vegetal, en la parte superior ( $T_{c1H}$ ) e inferior del mismo ( $T_{c1L}$ ). También se registró la temperatura

del agua contenida en el destilador ( $T_w$ ) y la temperatura de entrada ( $T_{ri}$ ) y salida del agua ( $T_{ro}$ ) que se utilizó como refrigerante del condensador. Asimismo, la temperatura ambiente ( $T_a$ ).

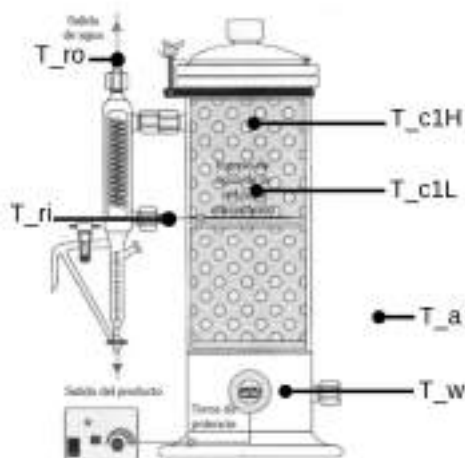


Figura 4. Esquema de experimento, mediciones de temperatura en el extractor de aceites esenciales

Las variables se registraron cada 30 segundos mediante un adquisidor de datos Agilent 34972A. Además, se utilizó un variador de tensión para modificar el consumo de la resistencia calefactora del destilador. La potencia consumida por la resistencia se midió con un voltímetro y una pinza amperimétrica, los cuales fueron contrastados por un vatímetro digital YOKOGAWA modelo WT11. Para determinar el caudal de vapor generado, se registró la masa del vapor condensado a intervalos regulares de tiempo.

En la Tabla 2 se muestran los ensayos realizados con diferentes potencias (800 W y 1325 W), se observa que una mayor potencia acelera el calentamiento del agua y la generación de vapor, lo que reduce el tiempo total de extracción. Sin embargo, la ebullición vigorosa produce un alto caudal de condensación que dificulta la separación de aceite en el separador de extractor de aceites, esta situación se ve reflejada en el rendimiento de extracción de la prueba realizada a mayor potencia. El caudal de vapor obtenido para 800 W fue de 0,75 Kg/h y para 1325 W de 1,3 Kg/h en promedio.

Tabla 2: Resultados obtenidos de la extracción realizada en el extractor comercial

| Ensayo | Hierba  | Cantidad de material [Kg] | Tiempo de extracción [min] | Consumo eléctrico [Kwh] | Rendimiento [%v/p] | Rendimiento Energético | Consumo [KWh/ml] |
|--------|---------|---------------------------|----------------------------|-------------------------|--------------------|------------------------|------------------|
| 1      | Orégano | 0,6                       | 48                         | 0,67                    | 0,62               | 0,54                   | 0,178            |
| 2      | Orégano | 0,6                       | 48                         | 1,29                    | 0,38               | 0,34                   | 0,464            |
| 3      | Orégano | 0,3                       | 48                         | 0,66                    | 0,49               | 0,55                   | 0,450            |

En las siguientes figuras se muestran las respuestas de las temperaturas medidas en el sistema, en el caso de la respuesta de la Figura 5, la cantidad de orégano fue de 0,6 Kg y en la Figura 6 fueron 0,3 Kg. En ambas situaciones, la potencia disipada por la resistencia calefactora es de 800 W aproximadamente. Se puede notar que el tiempo donde empieza la destilación a régimen estable es cuando la temperatura  $T_{ro}$  supera la temperatura  $T_{ri}$ , los tiempos medidos en las experiencias estuvieron en el orden de los 22 minutos. La cantidad de orégano no tuvo una influencia significativa en la disminución del tiempo donde inicia la extracción de aceites, lo que indica que la inercia térmica del extractor de aceites es mayor respecto de la masa de hierbas a destilar.

Si se compara los resultados de extracción de aceites mostrados en la Tabla 1 y Tabla 2 se puede observar que el rendimiento de extracción fue menor en el destilador de escala de laboratorio, esta situación está relacionada con la precisión con que puede ser medido la cantidad de aceite obtenido durante el proceso de extracción. Sin embargo, el rendimiento en la generación de vapor en ambos



equipos estuvo en el orden del 0,55 y los consumos energéticos relativos estuvieron en el orden de los 0,2 KWh/ml para las dos escalas de extracción medidas.

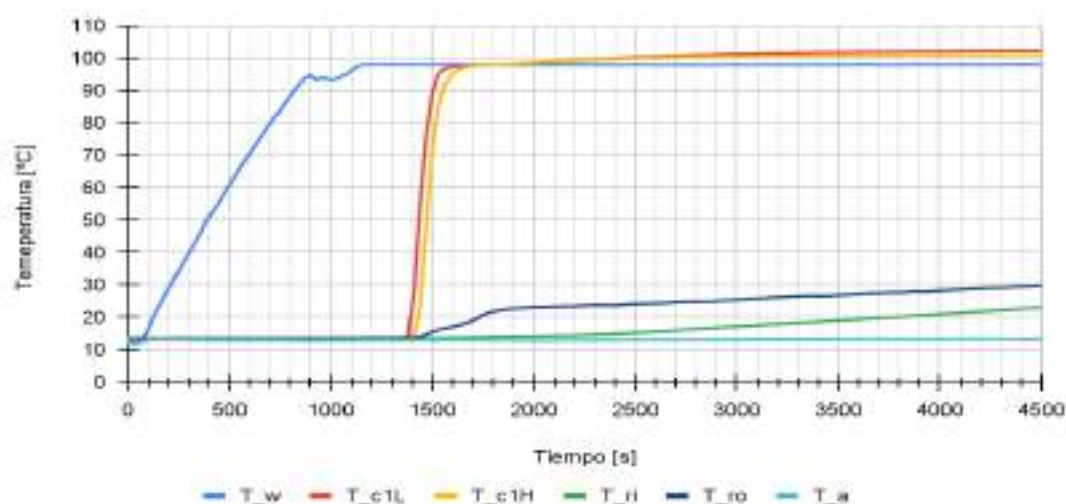


Figura 5: Mediciones de temperatura en el extractor de aceites esenciales con 0,6 Kg de orégano

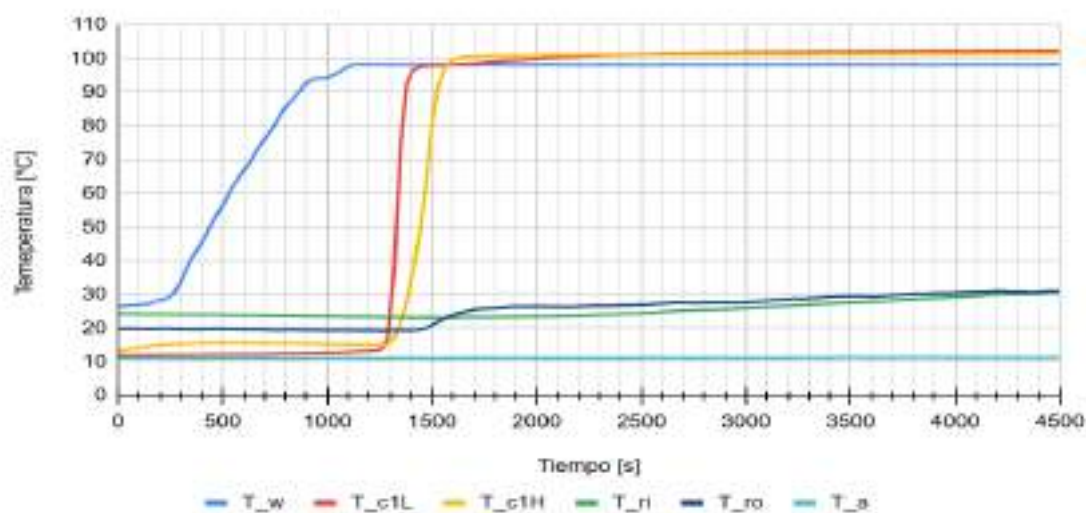


Figura 6: Mediciones de temperatura en el extractor de aceites esenciales con 0,3 Kg de orégano

## ENCUESTA A PRODUCTORES DE ACEITES ESENCIALES PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA SOLAR CONCENTRADA

### Contexto y Metodología

La encuesta fue realizada a pequeños y medianos productores de aceites esenciales en Argentina y España, los encuestados fueron estudiantes que cursaron la Tecnicatura Universitaria en Producción de Plantas Aromáticas. El cuestionario tuvo como objetivo evaluar las necesidades técnicas, energéticas y formativas asociadas al proceso de destilación por arrastre de vapor, con el fin de explorar la viabilidad de implementar Energía Solar Concentrada como alternativa sostenible, se incluyeron preguntas estructuradas en cuatro ejes principales: Perfil del Productor, Infraestructura y Proceso de Destilación, Demanda de Energía y Agua e Intereses y Barreras. Las preguntas realizadas fueron: ¿Es productor de hierbas aromáticas? Si cultiva hierbas aromáticas, ¿qué extensión de superficie utiliza para producirlas? ¿Qué tipos de hierbas destila? ¿Qué capacidad tiene su extractor de aceites esenciales (volumen del extractor)? ¿Cuántas veces destila semanalmente? ¿Para qué utiliza los aceites esenciales? ¿Conoce los fundamentos del proceso de destilación por arrastre de vapor? ¿Qué combustible utiliza para generar vapor? ¿Conoce que cantidad de energía necesita el proceso de destilación por arrastre de vapor? ¿Conoce que cantidad de agua necesita el proceso de destilación por arrastre de vapor? ¿Posee alguna inquietud sobre el proceso de destilación por arrastre de vapor?

Se realizó una encuesta a 9 productores de aceites esenciales en Argentina y España, abarcando desde microemprendedores (con superficies de 20 m<sup>2</sup>) a medianos productores (hasta 200 ha). Los participantes cultivan principalmente lavanda, romero, laurel y eucalipto, utilizando equipos de destilación que comprendían desde sistemas caseros menores a  $\leq 50$  l. hasta extractores industriales (100 a 10000 l). La frecuencia de destilación osciló entre 1–3 veces por semana para pequeños productores y procesos continuos durante temporadas en casos de mayor escala. En la Figura 7, se pueden observar distintos equipos relevados.



*Figura 7: Equipos de Destilación de aceites esenciales relevados*

#### ***Demanda Energética y Conocimiento Técnico***

El 55% de los encuestados desconocía el consumo energético exacto del proceso de destilación por arrastre de vapor, mientras que el 44% ignoraba los requerimientos de agua. Entre las inquietudes más destacadas, los productores mencionaron la necesidad de reducir costos operativos "Cómo lograr hacerlo sin combustión", "Optimizar recursos" y acceder a capacitación técnica "Me gustaría formarme". Estos resultados evidencian una brecha crítica en el conocimiento sobre eficiencia energética, lo que limita la adopción de tecnologías sostenibles.

#### ***Potencial para Sistemas de Energía Solar Concentrada***

El 78% de los productores utiliza gas envasado y el resto leña o electricidad para la destilación. Esta situación representa una oportunidad para la implementación de la energía solar concentrada. Para microproductores (equipos  $\leq 50$  l), se recomienda el desarrollo de sistemas modulares de bajo costo, priorizando portabilidad y facilidad de uso.

En cambio, para medianos y grandes productores ( $\geq 1000$  l), se sugiere explorar diseños híbridos (solar + respaldo). La viabilidad técnica dependerá de estudios piloto que cuantifiquen la demanda energética específica (KWh/kg de aceite) en distintas escalas, así como de programas de capacitación en mantenimiento y operación de estos equipamientos.

## CONCLUSIONES

Las experiencias realizadas en ambas escalas mostraron un rendimiento energético en la generación de vapor cercano al 55 %, lo que confirma que el proceso mantiene un comportamiento térmico reproducible aun con diferencias en tamaño, potencia y fuente de energía. Cabe destacar que, mientras la planta piloto contaba con un extractor aislado, el destilador de laboratorio estaba construido en vidrio de borosilicato, material con mayores pérdidas térmicas. Aun así, los valores de eficiencia fueron consistentes, lo que indica que la magnitud de las pérdidas relativas no altera significativamente el balance global del proceso y que la etapa de vaporización domina el desempeño energético. Asimismo, el consumo específico (0,2 kWh/ml de aceite esencial) se mantuvo estable, evidenciando que la eficiencia global no se ve comprometida por el cambio de escala y está relacionado con la cantidad de vapor que necesita por una unidad de masa a destilar. Sin embargo, esta equivalencia debe interpretarse con cautela: mientras que los equipos a gas o eléctricos permiten un control directo de la energía suministrada, el concentrador solar depende de condiciones externas y requiere un dimensionamiento preciso para garantizar estabilidad operativa. Por ello, si bien los resultados de producción son comparables, la transferencia de mejoras tecnológicas desde equipos convencionales hacia esquemas solares requiere un análisis específico, ya que estos últimos dependen de condiciones externas y de un diseño térmico particular. Reconocer estas diferencias es esencial para proyectar una transferencia tecnológica realista hacia sistemas de energía solar concentrada, considerando sus particularidades en cuanto a pérdidas térmicas, inercia del fluido y variabilidad de la irradiación.

Los resultados demuestran que la transición hacia la energía solar concentrada en la producción de aceites esenciales es técnicamente viable, pero requiere soluciones adaptadas a cada escala. La integración de sistemas solares con capacitación técnica podría posicionar a pequeños y medianos productores como actores clave en la descarbonización de procesos industriales térmicos, alineándose con objetivos globales de sostenibilidad. Estudios futuros deberán cuantificar el retorno de inversión de estas tecnologías en contextos reales, especialmente en regiones con alta irradiación solar como el centro de Argentina.

Las principales barreras identificadas incluyen el alto costo inicial de los equipos y la falta de datos precisos sobre eficiencia energética. Para superar estos desafíos, se propone: desarrollar prototipos accesibles, validados en colaboración con productores locales (ej: destiladores de 50 l); crear guías técnicas que vinculen el dimensionamiento de CCP con la demanda térmica real; y promover políticas de financiamiento para pequeños emprendimientos. Estos pasos no sólo reducirían la huella de carbono del sector, sino que también mejorarían su competitividad económica.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por la Secretaría de Ciencia y Técnica de la Universidad Nacional de Río Cuarto por medio de los proyectos: PPI Período 2024 - 2026.

## REFERENCIAS

- Lahijani A. M., Protheroe M. D., Gschwendtner M., (2025). A modelling tool selection for decarbonising industrial process heat systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 210, 115149, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115149>.
- Aparicio H., Dellicompagni P., Cadena C. (2023). Software para el estudio del desempeño térmico de sistemas de concentración solar. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. 27, 146-157, ISSN 2796-8111.
- Barba F., Gavahian M., Es I., Zhu Z., Chemat F., Lorenzo J. Khaneghah A. (2019). Solar radiation as a prospective energy source for green and economic processes in the food industry: From waste

- biomass valorization to dehydration, cooking, and baking. *Journal of Cleaner Production*. 220, 1121-1130, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.175>.
- Daghero J., Garnica J., Barros J., Rodriguez R. (2013). Concentrador Cilíndrico-Parabólico Aplicado a la Generación de Vapor para la Extracción de Aceites Esenciales de Plantas Aromáticas y Medicinales. *Acta de la XXXVI Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente*. 19, 02.37-02.44, ISSN 2314-1433.
- Daghero J., Garnica J., Buitrago A., Dubini D., Lorenzo C., Manero C., Marticorena M., Martinez M., Sayago U. (2015) Concentrador Cilíndrico Parabólico Aplicado a la Generación de Vapor de Uso Industrial. *Evaluación Óptica y Térmica de un Prototipo*. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. 19, 03.45-03.54. ISSN 2314-1433.
- Dellicompagni P., Linares J. (2023). Simulación numérica de un concentrador solar cilindro parabólico de baja entalpía con Simusol. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. 27, 181-192, ISSN 2796-8111
- Dellicompagni P., Salvo A., Rojas Villena M. (2023). Diseño, construcción y ensayo de un concentrador solar cilindro parabólico para fines educativos. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. 27, 550-509, ISSN 2796-8111.
- Garnica, J., Daghero, J., Longoni, D., Ortiz, M. (2018). Circuito térmico para la generación de vapor de uso industrial utilizando un concentrador cilíndrico parabólico. *Diseño, desarrollo y evaluación térmica*. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. 22, 02.13-02.23, ISSN 2314-1433.
- IEA (2024) [en línea]: Renewables 2023: Analysis and Forecast to 2028. Paris: International Energy Agency. Dirección URL <[https://iea.blob.core.windows.net/assets/96d66a8b-d502-476b-ba94-54ffda84cf72/Renewables\\_2023.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/96d66a8b-d502-476b-ba94-54ffda84cf72/Renewables_2023.pdf)> [consulta: el 8 de Agosto de 2025]
- Medina, M., Stoll, R., Garnica, J., Lucchini, M., y Barral J. (2012) Determinación experimental de la eficiencia térmica de calentadores de agua para la producción de agua caliente sanitaria. *Avances en Energía Solar y Medio Ambiente*. 16, 08.207, ISSN: 0329-5184.
- Ortiz M., Stoll R., Daghero J. Podversic, E. y Cortes S. (2022) Desarrollo de un Mecanismo para el Seguimiento Solar Utilizando una Impresora 3D. *Acta de la XLIV Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente*. 9, 156-166, ISBN 978-987-29873-1-2
- Paratherm [en línea] Fluido de Transferencia Térmica. Dirección URL: <[https://www.paratherm.com/wp-content/uploads/2022/04/NF-Bulletin\\_Mar2022.pdf](https://www.paratherm.com/wp-content/uploads/2022/04/NF-Bulletin_Mar2022.pdf)> [consulta: 08 de Agosto de 2025]
- Stoll R., Daghero J., Podversic E., Capozzuca C., Paisio G. (2023) Evaluación del desempeño de un circuito térmico para la generación de vapor de uso industrial con energía solar. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. 27, 158-168, ISSN 2796-8111.
- Stoll R., Daghero J., Podversic E., (2024) Evaluación de un sistema de generación de vapor industrial asistido con energía solar cocentrada. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. 28, 104-112, ISSN 2796-8111.

## **ENERGY DEMAND ANALYSIS OF ESSENTIAL OIL EXTRACTION AND ITS COVERAGE USING CONCENTRATED SOLAR POWER: FOCUS ON SYSTEM DESIGN AND THERMAL LOSSES**

**ABSTRACT** This study assesses the technical feasibility of using concentrated solar energy to meet the thermal demand of essential oil extraction through steam distillation. Two production scales were evaluated: a mobile pilot plant and a laboratory-scale distiller, recording operational variables, energy consumption, and extraction yields. In both cases, energy performance was quantified as the ratio between the energy consumed (either electrical or gas-derived) and the volume of oil obtained. Results show that, despite differences in scale and energy source, the specific consumption was similar (0.2 kWh/m), indicating that the process is reproducible. Furthermore, an average energy efficiency of 55% was observed for steam generation. The study also included a survey of essential oil producers, identifying barriers to the adoption of solar technologies, such as limited technical knowledge and high upfront costs. These findings provide a basis for sizing solar systems tailored to different production scales and propose guidelines for their implementation. The integration of concentrated solar energy, combined with technical training, represents a viable strategy to decarbonize this process, particularly in regions with high solar irradiance, such as central Argentina.

**Keywords:** essential oil, thermal energy, parabolic trough collector, thermal circuit, energy efficiency.

## EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES TECNOLÓGICAS DE MATERIALES DE MULLITA PARA SU USO EN ENERGÍA SOLAR TÉRMICA CONCENTRADA

**Anabella Mocciaro<sup>1,2</sup>, Camila Peters<sup>1,3,4</sup>, María F. Hernández<sup>1,3</sup>, Diego Richard<sup>1,3</sup>,  
Nicolás M. Rendtorff<sup>1,3</sup>**

<sup>1</sup>CETMIC, Centro de Tecnología de Recursos Minerales y Cerámica  
(CONICET-CIC PBA-UNLP), Campus tecnológico de la CIC, Camino Parque Centenario y 506  
s/n, M. B. Gonnet, Buenos Aires, Argentina. [amocciaro@cetmic.unlp.edu.ar](mailto:amocciaro@cetmic.unlp.edu.ar)

<sup>2</sup>Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Buenos Aires, Argentina.

<sup>3</sup>Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Buenos Aires,  
Argentina.

<sup>4</sup>INIPTA, Instituto de Investigaciones en Procesos Tecnológicos Avanzados  
(UNCAUS -CONICET), Presidencia Roque Sáenz Peña, Chaco, Argentina.

**RESUMEN:** La energía solar térmica de concentración (CSP) utiliza la irradiancia normal directa para concentrar la radiación solar y calentar fluidos, generando electricidad. Sus componentes, como las tuberías de transferencia de calor, requieren materiales con alta refractariedad, resistencia mecánica y a la corrosión. La mullita ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ), por sus propiedades térmicas, mecánicas y químicas, es un material prometedor para estas aplicaciones. Este trabajo evalúa el efecto de la adición de óxidos de cobre ( $\text{CuO}$ ) y manganeso ( $\text{MnO}_2$ ) en la mullitización de mezclas de arcilla caolinítica y alúmina. Se formularon mezclas con 1, 3 y 10 % p/p de óxido, conformadas y sinterizadas a 1400 y 1500 °C. Los análisis térmicos y dilatométricos mostraron que ambos óxidos actúan como fundentes, adelantando la formación de mullita y mejorando la densificación, especialmente  $\text{MnO}_2$ . La difracción de rayos X reveló que los óxidos no se incorporan a la estructura cristalina, sino a la fase vítrea, reduciendo la porosidad (<5 %) y aumentando la densidad. En cuanto a propiedades ópticas, se obtuvo baja luminosidad ( $Y < 8$ ) con tonalidades oscuras, favoreciendo la absorción solar. Mecánicamente, el módulo de elasticidad aumentó hasta ~100 GPa. Los cerámicos, especialmente con  $\text{CuO}$ , presentan baja porosidad, estabilidad térmica y buen rendimiento mecánico, siendo aptos para tubos receptores en sistemas CSP.

**Palabras clave:** energía solar térmica concentrada, mullita, óxido de cobre, óxido de manganeso.

### INTRODUCCIÓN

La transición hacia fuentes de energía renovables ha impulsado el desarrollo de nuevas tecnologías como es el caso del aprovechamiento de la irradiación solar como fuente de energía térmica para calentar un fluido y así producir energía eléctrica por medio de un generador. A este tipo de tecnologías se las conoce como Energía Solar Térmica de Concentración o Energía Solar Térmica Concentrada (CSP, Concentrated Solar Power (Morris et al., 2015; Palacios et al., 2020; Pihl et al., 2012; Rajendran et al., 2020; Sarvghad et al., 2018). La tecnología CSP se enfoca en utilizar la Irradiancia Normal Directa (DNI, Direct Normal Irradiance) para redireccionar los rayos solares a un punto o eje focal (dependiendo de la tecnología) que concentra la energía en un receptor, elevando la temperatura de un fluido térmico que posteriormente se utiliza para generar electricidad. Componentes de CSP son las tuberías de transmisión de calor que funcionan como portadores de energía térmica mediante fluidos de transferencia de calor de alta temperatura (generalmente aire, aceite conductor y sales fundidas: nitratos y cloruros de sodio-potasio, etc.) que transmiten calor desde el receptor. Por lo tanto, los materiales que constituyen las tuberías de transmisión de calor deben tener alta refractariedad debido a

las temperaturas de operación (superiores a 600 °C), alta resistencia al choque térmico, buena resistencia mecánica y buena resistencia a la corrosión.

En este contexto, la mullita ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ), un silicoaluminato con alto punto de fusión (1850 °C) que es utilizada en diferentes aplicaciones, desde la cerámica tradicional hasta la cerámica avanzada por sus propiedades mecánicas tanto en frío como en caliente, estabilidad química, estabilidad térmica, resistencia al choque térmico reflejada por su relativamente bajo coeficiente de expansión térmica ( $\sim 5 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ , 25-1000 °C) y conductividad térmica ( $\sim 10 \text{ W m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , a 1000°C) (Lima et al., 2022; López et al., 2025; Schneider et al., 2008; Torrecillas et al., 1999) se presenta como un material candidato de alto interés para ser empleado en operaciones de elevadas temperaturas y con condiciones de operación más extremas en comparación con materiales metálicos (Carty & Senapati, 1998).

Por diversos aspectos pero principalmente por disponibilidad, control del proceso y costos una de las rutas más empleadas para elaborar cerámica de mullita sinterizadas es la reacción de sinterización entre una arcilla caolinítica y una fuente de alúmina (Chen et al., 2000; Da Silva et al., 2016; Liu et al., 1994; Sainz et al., 2000; Yuan et al., 2022). Esta resulta ser una ruta muy versátil para la fabricación de cerámica de mullita con microestructura fina (menor 5  $\mu\text{m}$ ) y relativamente densa (porosidad menor a 10 %). Además, por tener una arcilla como principal material de partida permite diversas rutas de conformado, incluyendo el prensado en semi-seco, el colado de barbotinas y los distintos conformados por deformación plástica, como el laminado y el extrudado.

En la búsqueda de mejorar la eficiencia y durabilidad de los sistemas CSP, también se exploran compuestos y composites basados en mullita, reforzados con fibras cerámicas u óxidos metálicos, que permitan adaptar sus propiedades a requerimientos específicos de conductividad, resistencia o comportamiento mecánico bajo carga térmica (López et al., 2023). Tanto las propiedades ópticas como la conductividad térmica se verán afectadas por la incorporación de óxidos metálicos en la formulación de los cerámicos de mullita, en particular se podría ver incrementada la absorción de luz solar cuando los óxidos colorantes negros, y marrones fueran incorporados en cantidades apreciables con evidentes beneficios para la aplicación energética planteada.

El presente trabajo analiza el efecto de la adición (hasta 10 % p/p) de los óxidos de manganeso y de cobre ( $\text{MnO}_2$  y  $\text{CuO}$ ) en la formación de mullita estequiométrica a partir de una arcilla caolinítica nacional ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), y alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Se propone la elaboración de estos cerámicos a escala de laboratorio, seguida de una caracterización integral que incluye la evaluación de propiedades texturales, microestructurales y otras propiedades tecnológicas relevantes con el objeto de establecer los criterios de diseño de tuberías cerámicas destinadas a intercambiadores de calor de alta temperatura.

## MATERIALES Y METODOLOGÍA

Para la fabricación de mullita se utilizó alúmina A16 (Almatis, Brasil) pureza 99,9 % y tamaño de partícula de 0.5  $\mu\text{m}$ , junto con una arcilla caolinítica de Argentina (caolín Sur Río Blanco-PG, Argentina) las mezclas fueron formuladas estequiométricamente para obtener 100 % de la fase mullita.

En la Tabla 1 se presenta un análisis mineralógico y químico de la arcilla utilizada. Además, se usó óxido de cobre y óxido de manganeso de pureza industrial (pureza 99,5 % y malla 200, Crecer Poles, Argentina).

Se formularon 7 mezclas de acuerdo a la Tabla 2, con la adición de 1, 3 y 10 % p/p de cada uno de los óxidos y una muestra sin adición (M0) como referencia. Las mezclas de las materias primas se realizaron en un molino de bolas de alúmina de 1L, con elementos moledores de alúmina de 20 mm de diámetro por vía húmeda. La permanencia dentro del molino fue de 1 h a 300 rpm sin adición de dispersante. Luego se dejó reposar en moldes de yeso para retirar el exceso de agua y tener una pasta modelable (aproximadamente 35% p/p de agua). Seguidamente se conformaron por laminado barras prismáticas de  $7 \times 7 \times 50 \text{ cm}^3$ . Las barras primero se secaron a temperatura ambiente y luego se calcinaron en horno eléctrico con una rampa de calentamiento de  $5 \text{ }^\circ\text{C min}^{-1}$  y una permanencia de 30 min a la temperatura de consigna. Las temperaturas de sinterización fueron 1400 °C y 1500 °C.



*Tabla 1: Composición química u mineralógica de la arcilla caolinítica (% p/p).*

| Composición química                                                           |                                |                                |                                                          |     |                   |                             |                  |      |
|-------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|----------------------------------------------------------|-----|-------------------|-----------------------------|------------------|------|
| SiO <sub>2</sub>                                                              | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO                                                      | MgO | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O            | TiO <sub>2</sub> | LOI  |
| 60,0                                                                          | 26,4                           | 1,0                            | 0,2                                                      | 0,2 | 0,12              | 0,6                         | 0,4              | 11,1 |
| Composición mineralógica                                                      |                                |                                |                                                          |     |                   |                             |                  |      |
| Caolinita (Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub> ) |                                | Cuarzo (SiO <sub>2</sub> )     | Feldespato potásico (KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> ) |     |                   | Anatasa (TiO <sub>2</sub> ) |                  |      |
| 76,6                                                                          |                                | 22                             | 1,35                                                     |     |                   | Trazas                      |                  |      |

*Tabla 2: Formulaciones de mezclas de alúmina, arcilla y óxido (% p/p).*

| Fórmula | Arcilla caolinítica | Alúmina | CuO   | MnO <sub>2</sub> |
|---------|---------------------|---------|-------|------------------|
| M0      | 46,00               | 54,00   | 0,00  | 0,00             |
| MCu1    | 45,54               | 53,46   | 1,00  | 0,00             |
| MCu3    | 44,62               | 52,38   | 3,00  | 0,00             |
| MCu10   | 41,40               | 48,60   | 10,00 | 0,00             |
| MMn1    | 45,54               | 53,46   | 0,00  | 1,00             |
| MMn3    | 44,62               | 52,38   | 0,00  | 3,00             |
| MMn10   | 41,40               | 48,60   | 0,00  | 10,00            |

Inicialmente se caracterizó la termoquímica de las formulaciones sin calcinar, para ello se eligieron las formulaciones con 10 % p/p de adición de óxido (MCu10 y MMn10) y la M0 como referencia. Se realizó un análisis térmico diferencial y termo gravimétrico (ATD-TG) en simultaneo con un equipo Nesztch 409c y por otro lado, una dilatometría en un microscopio óptico de calentamiento Linseis L74. Ambos ensayos se realizaron en atmosfera de aire y con una velocidad de calentamiento de 10 °C min<sup>-1</sup> hasta 1400 °C.

Luego se caracterizaron las propiedades texturales, la composición mineralógica, el color, la microestructura y las propiedades de los materiales luego del tratamiento térmico. Las fases cristalinas de los cerámicos fueron evaluadas mediante difracción de rayos X (DRX) de polvos con un difractómetro Bruker D8 Advance A25. Se utilizó radiación CuK $\alpha$  (1,5418 Å) y filtro de Ni a 40 mV y 30 mA. El barrido se realizó entre 3° y 70°, con un paso de 0,02° y un tiempo de conteo de 0,5 s/paso. Los patrones de DRX resultantes fueron refinados mediante el método de Rietveld con el software FullProf (v.6.0), modelando la fase no cristalina con la aproximación de Le Bail.

Se determinó la densidad aparente y el porcentaje de porosidad abierta con el método de Arquímedes en agua. Se midió el color mediante colorimetría óptica con un Konica-Minolta CR-410, tomando el espacio color XYZ, en donde Y representa luminosidad, Z es aproximadamente igual al estímulo de azul, y X es una mezcla tendiente a la curva de sensibilidad del rojo al verde. A su vez, se observó la microestructura en un microscopio electrónico de barrido (MEB) Jeol JCM-6000 en muestras de fractura libre con un baño de plata para facilitar la conductividad. Por último, se evaluó el módulo de elasticidad dinámico (E) con un equipo GrindoSonic, Modelo MK5 “Industrial”, con detector piezoeléctrico.



## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Análisis térmico de las formulaciones

La Figura 1, muestra los tres análisis térmicos de las formulaciones con adición de óxido y la mezcla estequiométrica arcilla-alúmina (M0). En la Figura 1a se presentan las curvas de TG, se evidencia en la muestra con  $\text{MnO}_2$  una pérdida de masa por debajo de los 200 °C asociado a la eliminación de humedad absorbida (~ 10 %). Por otra parte, en el rango de temperatura entre 500-600 °C se observa en las tres curvas una pérdida de masa asociada a la deshidroxilación de la arcilla caolinítica, la cual se ve afectada por la adición de óxidos. En la Figura 1b, al igual que en el TG, se observa un pico endotérmico a bajas temperaturas propio de la presencia de agua en el óxido de manganeso. En el rango de 400-500 °C se observa el pico endotérmico a 495 °C asociado al proceso de deshidroxilación de la arcilla y no se ven diferencias entre las fórmulas con y sin la adición de óxidos. Sin embargo, el pico exotérmico de formación de espinela de pre-mullita (Hernández et al., 2022), identificado a 968 °C en la fórmula M0 se ve claramente afectado por la presencia de los aditivos ( $\text{CuO}$  y  $\text{MnO}_2$ ). La señal se ve atenuada y corrida a menores temperaturas (entre 100-150 °C menos) con lo que se podría concluir que la presencia de óxido en las mezclas fomenta la formación de mullita.

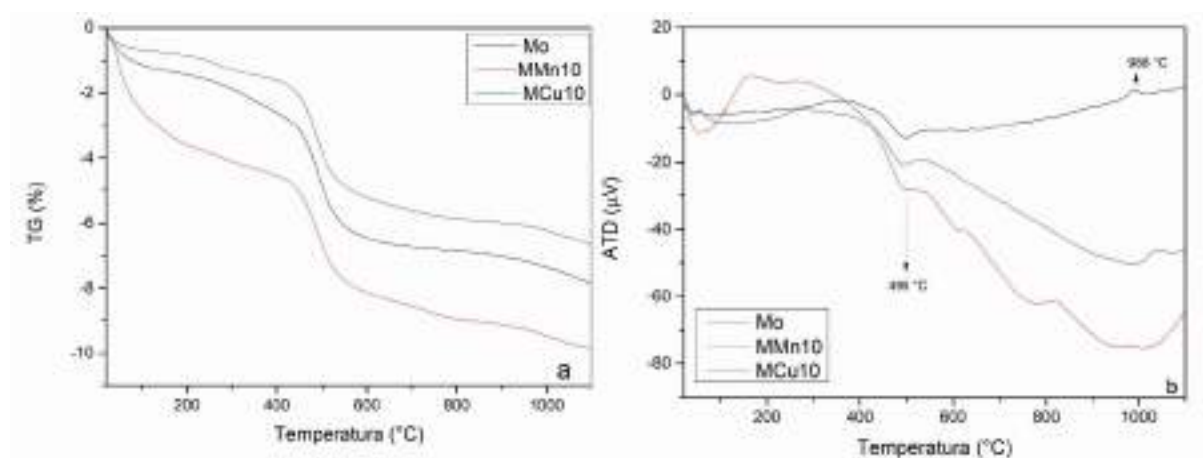


Figura 1: Análisis termo gravimétrico (a) y térmico diferencial (b) de las fórmulas estudiadas.

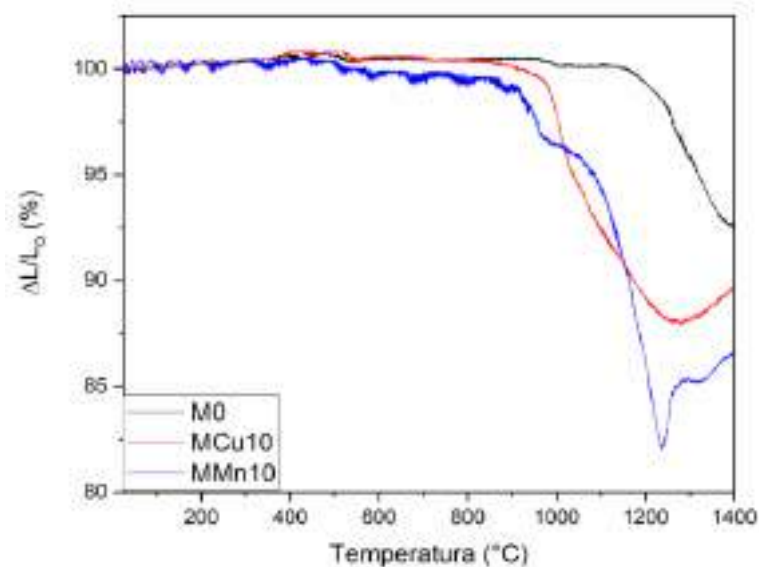


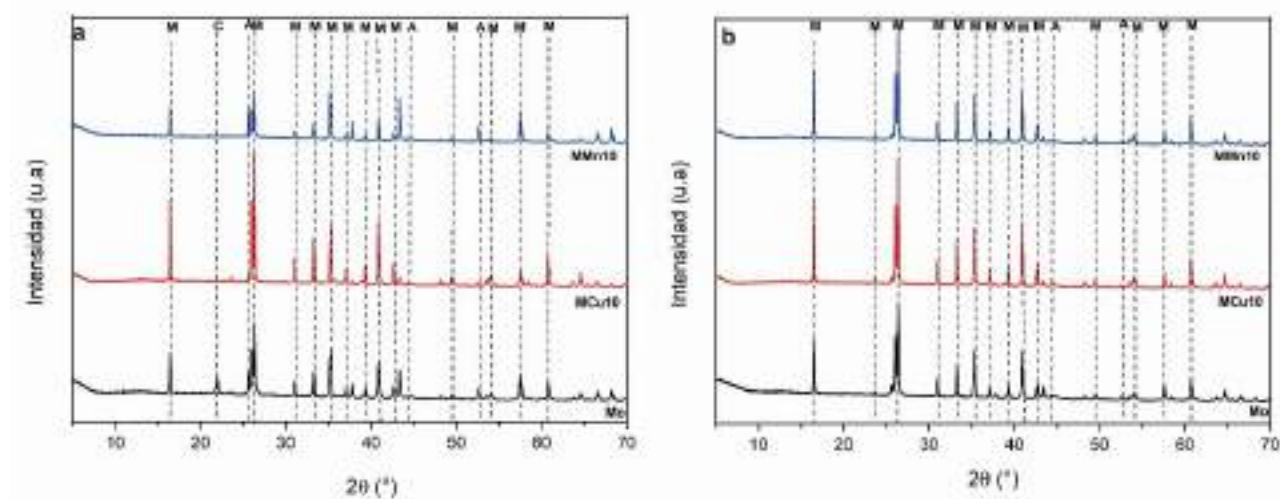
Figura 2: Dilatometría las fórmulas estudiadas

En la Figura 2 se presentan las curvas dilatométricas de las formulaciones, se observa claramente los procesos termo-físico-químicos de la formación de mullita hasta los 1400 °C (en negro), con una

El efecto de los óxidos en el proceso de sinterización se evidencia adelantando el inicio del proceso de contracción a los 1000 y 900 °C para el CuO y el MnO<sub>2</sub> respectivamente. A su vez, la contracción total de las formulaciones es mayor para las muestras con óxido, 12 % para MCu10 y 17 % para MMn10, que para la muestra M0 (7.5 %); así como también, la temperatura de mayor contracción disminuye por la presencia de óxidos siendo cercana a los 1300 °C para el MCu10 y 1250 °C para MMn10 mientras que para M0 es cercana a 1400 °C. Se observa que el efecto del MnO<sub>2</sub> es más abrupto, posiblemente propiciando la formación de una fase vítrea de menor viscosidad.

La Figura 3 muestra los patrones DRX de las muestras estudiadas sinterizadas a 1400 °C y 1500 °C, para este análisis sólo se muestran los extremos que son los materiales en los cuáles se observaron cambios significativos. Luego, las Tablas 3 y 4 muestran los resultados del refinamiento de Rietveld y la cuantificación de fases cristalinas, así como la bondad de esos refinamientos (Rwp).

En la Tabla 3, considerando los valores de Rwp alcanzados se puede concluir que los refinamientos son adecuados para materiales elaborados a base de minerales como las arcillas y similares a otros reportados en la literatura (Hernández et al., 2020). La adición de óxido beneficia el proceso de mullitización a ambas temperaturas de sinterizado, obteniéndose mayores porcentajes de dicha fase. Por otra parte, la cantidad de fase no cristalina aumenta a mayor temperatura de sinterizado debido a la formación de fase vítrea y a su vez, es mayor cuando se adiciona manganeso a la formulación.



271

*Tabla 3: Contenido de fases cristalinas y no cristalina (DRX-Rietveld).*

|            | <b>Rwp</b> | <b>Mullita</b> | <b>Alúmina</b> | <b>Cristobalita</b> | <b>Cuarzo</b> | <b>Fase amorfa</b> |
|------------|------------|----------------|----------------|---------------------|---------------|--------------------|
| M0-1400    | 22,0       | 60,7 (5)       | 26,0 (2)       | 3,64 (6)            | 0,68 (4)      | 9,0 (4)            |
| M0-1500    | 22,1       | 73,0 (6)       | 12,7 (2)       | 0,23 (2)            | 1,14 (4)      | 12,9 (6)           |
| MCu10-1400 | 22,9       | 86,7 (6)       | 7,43 (7)       | -                   | -             | 5,8 (4)            |
| MCu10-1500 | 23,3       | 85,4 (6)       | 5,95 (7)       | -                   | -             | 8,6 (5)            |
| MMn10-1400 | 27,3       | 69,1 (3)       | 13,3 (2)       | -                   | -             | 17,6 (4)           |
| MMn10-1500 | 23,3       | 84,8 (5)       | 5,06 (7)       | -                   | -             | 10,2 (5)           |

La Tabla 4 muestra los valores refinados de los parámetros de celda de la fase de mullita en los cerámicos obtenidos a 1400 °C y 1500°C, comparados con el material de referencia M0, elaborado sin la adición de óxidos metálicos. Los resultados revelan que no hay cambios significativos en los parámetros de celda ni en el volumen de la celda unitaria, lo que indica que los cationes de manganeso ( $Mn^{+4}$ ) y cobre ( $Cu^{+2}$ ) no se incorporan a la estructura cristalina del silicato de aluminio. Esto sugiere que los óxidos añadidos no se incorporan en la red de la mullita, sino que, en cambio, forman parte de la fase vítrea que actúa como agente densificante en la matriz cerámica.

De acuerdo con la composición química de la arcilla utilizada (ver Tabla 1), esta fase vítrea presenta una composición compleja, constituida principalmente por  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Na_2O$ ,  $K_2O$ ,  $TiO_2$ , como así también los óxidos metálicos adicionados (Cu y Mn). Por lo cual se puede concluir que las condiciones de procesamiento evaluadas en este estudio permiten obtener materiales cerámicos basados en mullita mediante la reacción de sinterización entre una arcilla caolínica y alúmina, con la formación simultánea de una fase vítrea multi-metálica de composición heterogénea.

*Tabla 4: Parámetros de red de la mullita según el refinamiento de Rietveld.*

|            | <b>a</b>   | <b>b</b>   | <b>c</b>    |
|------------|------------|------------|-------------|
| M0-1400    | 7.552 (1)  | 7.6963 (2) | 2.88670 (4) |
| M0-1500    | 7.554 (1)  | 7.6938 (1) | 2.88615 (4) |
| MCu10-1400 | 7.5641 (9) | 7.6950 (1) | 2.88762 (4) |
| MCu10-1500 | 7.5642 (9) | 7.6968 (1) | 2.88753 (4) |
| MMn10-1400 | 7.563 (1)  | 7.6957 (2) | 2.88569 (6) |
| MMn10-1500 | 7.561 (1)  | 7.6938 (1) | 2.88653 (4) |

En la Tabla 5 se muestran los valores de densidad aparente, porosidad abierta y las coordenadas de color de los cerámicos estudiados. A 1400 °C la muestra M0, sin adición de óxidos, presenta una densidad de 2,25 g/cm<sup>3</sup> y una porosidad de 23 %, luego a 1500 °C 2,26 g/cm<sup>3</sup> y 16 % respectivamente, disminuyendo la porosidad por el proceso de sinterización que sufre el material al ser tratado a mayor temperatura. Por otro lado, se observa que mientras los valores de densidad aparente aumentan con el agregado de óxidos, los valores de porosidad disminuyen, estos resultados son en concordancia con los ensayos dilatométricos (Figura 2), en los cuales se observaba que la sinterización del material comenzaba a menores temperaturas por la adicción de CuO y MnO<sub>2</sub>.

El aumento de densidad por adición de óxido de cobre es mayor al del óxido de manganeso, 15 y 7 % respectivamente, cuando se incorpora 10 % de óxido. Del mismo modo la porosidad abierta de los cerámicos obtenidos se vio notablemente afectada por la incorporación de los óxidos metálicos. El efecto también fue gradual y proporcional, disminuyendo la porosidad abierta a valores menores al 5 % cuando la incorporación de óxido es del 10 %. La menor porosidad se obtuvo con la incorporación de cobre a 1500 °C (MCu10-1500). Notablemente la porosidad de los cerámicos con MnO<sub>2</sub> es mayor a 1500 °C en comparación con los cerámicos sinterizados a 1400 °C evidenciando un proceso de sinterización con

formación de gases y sus consecuentes burbujas a elevadas temperaturas en las fases vítreas del sistema  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-MO}_x$ .

En relación a las coordenadas de color obtenidas para cada material se observa que la paleta cromática de los cerámicos de mullita experimenta transformaciones notables al incorporar los óxidos de cobre y manganeso. En este caso centramos el análisis en el valor de luminosidad (Y) ya que es el que se puede relacionar con la absorción potencial de luz solar. Partiendo de un tono blanco casi puro ( $Y \approx 86$ ) en la muestra M0, la adición progresiva de óxido de cobre va oscureciendo el material hasta alcanzar un negro intenso ( $Y \approx 6$ ), mientras que el óxido de manganeso genera tonalidades marrones con luminosidad levemente mayor ( $Y \approx 8$ ). Este importante cambio de luminosidad, particularmente evidente en los materiales procesados a  $1500^\circ\text{C}$ , surge de la compleja interacción entre los iones metálicos y la matriz cerámica. Los cationes de cobre ( $\text{Cu}^{+2}$ ) y manganeso ( $\text{Mn}^{+4}$ ) se integran predominantemente en la fase vítrea, donde sus transiciones electrónicas características absorben selectivamente regiones del espectro visible. Como por DRX no se detectaron espinelas cristalinas, la intensidad y estabilidad del color sugieren que estos iones se encuentran químicamente ligados en la red amorfa.

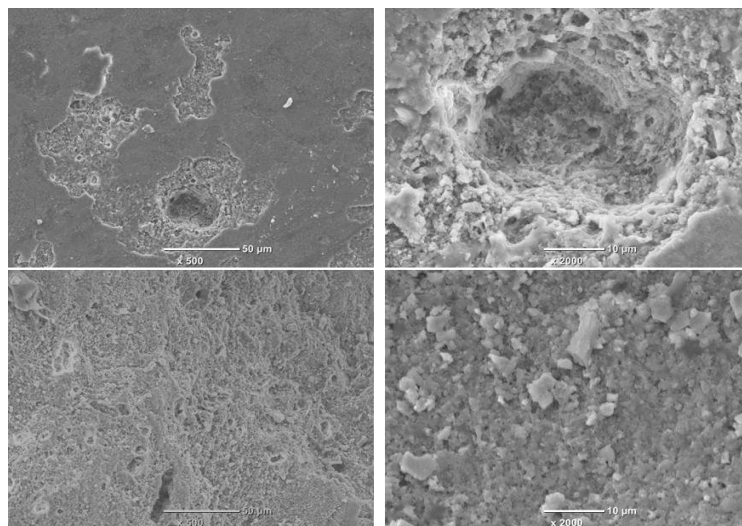
*Tabla 5: Valores de densidad aparente, porosidad abierta y coordenadas de color CIE XYZ de los cerámicos estudiados en función de la formulación y la temperatura de sinterización.*

| Temperatura ( $^\circ\text{C}$ ) | Muestra      | Densidad aparente ( $\text{g/cm}^3$ ) | Porosidad abierta (%) | Color     |           |           |
|----------------------------------|--------------|---------------------------------------|-----------------------|-----------|-----------|-----------|
|                                  |              |                                       |                       | x         | y         | z         |
| <b>1400</b>                      | <b>M0</b>    | 2,25 (6)                              | 23 (1)                | 84,0 (4)  | 86,0 (3)  | 91 (1)    |
|                                  | <b>MCu1</b>  | 2,27 (1)                              | 19,0 (1)              | 40,5 (2)  | 43,0 (2)  | 42,1 (2)  |
|                                  | <b>MCu3</b>  | 2,35 (6)                              | 13,1 (4)              | 7,3 (3)   | 7,3 (3)   | 7,2 (3)   |
|                                  | <b>MCu10</b> | 2,59 (1)                              | 3,4 (6)               | 5,93 (2)  | 6,04 (4)  | 7,21 (2)  |
|                                  | <b>MMn1</b>  | 2,28 (4)                              | 22,9 (6)              | 52,94 (4) | 52,80 (4) | 52,96 (8) |
|                                  | <b>MMn3</b>  | 2,36 (3)                              | 10,0 (3)              | 20,8 (8)  | 20,0 (8)  | 15,5 (7)  |
|                                  | <b>MMn10</b> | 2,44 (6)                              | 4,0 (5)               | 8,13 (3)  | 7,60 (1)  | 5,72 (2)  |
| <b>1500</b>                      | <b>M0</b>    | 2,26 (3)                              | 16 (2)                | 86,7 (7)  | 88,7 (7)  | 98 (1)    |
|                                  | <b>MCu1</b>  | 2,28 (2)                              | 14,7 (7)              | 46 (1)    | 48 (1)    | 50 (1)    |
|                                  | <b>MCu3</b>  | 2,4 (2)                               | 10,8 (5)              | 7,0 (3)   | 7,1 (3)   | 7,3 (3)   |
|                                  | <b>MCu10</b> | 2,6 (1)                               | 1,4 (5)               | 5,2 (1)   | 5,3 (1)   | 6,3 (1)   |
|                                  | <b>MMn1</b>  | 2,21 (1)                              | 16,1 (5)              | 47,50 (4) | 47,5 (1)  | 45,9 (2)  |
|                                  | <b>MMn3</b>  | 2,26 (7)                              | 14,0 (8)              | 18,21 (5) | 17,45 (3) | 13,01 (1) |
|                                  | <b>MMn10</b> | 2,50 (1)                              | 6,2 (9)               | 8,5 (6)   | 7,9 (5)   | 6,0 (3)   |

Las Figuras 4, 5 y 6 muestran imágenes tomadas por MEB de los materiales cerámicos estudiados, para este caso se presentan las muestras M0, MCu10 y MMn10 calcinadas a  $1400^\circ\text{C}$  y  $1500^\circ\text{C}$ . Las muestras M0 (Figura 4) presentan una microestructura característica a materiales de mullita donde se observan cristales de dicha fase levemente alargados inmersos en una matriz vítrea, con presencia de poros redondeados de hasta  $8\ \mu\text{m}$  de diámetro.

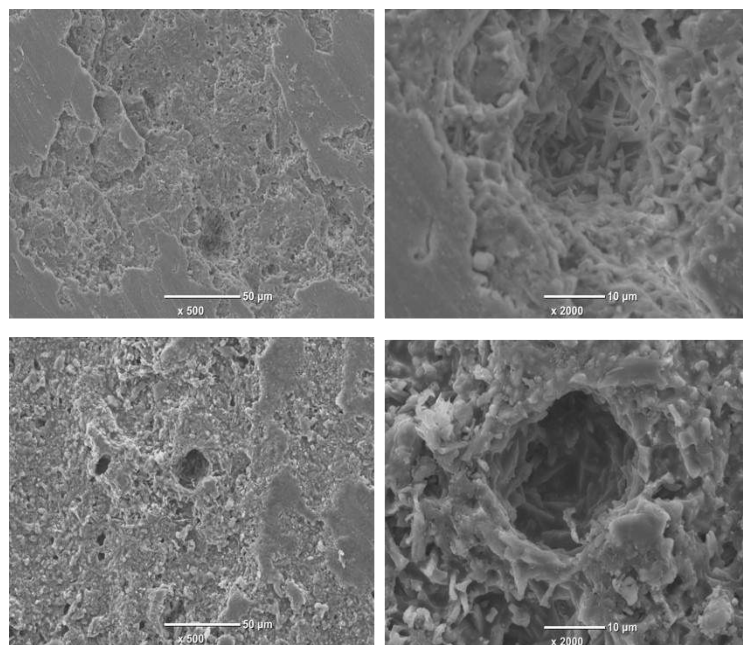
Se observa que la adición de óxidos de cobre y manganeso en proporciones de hasta el 10 % en peso influencia directamente la microestructura final del material (Figuras 5 y 6). Se aprecia una marcada

acentuación en la morfología alargada de los cristales de mullita (típicamente conocida como agujas) que no era observada en el cerámico original, los cuales desarrollan formas aciculares más pronunciadas, particularmente a la temperatura más alta de sinterización (1500 °C). Paralelamente, se produce un notable aumento en la cantidad de fase vítrea presente en el material. Este fenómeno puede atribuirse principalmente al efecto fundente que ejercen los óxidos adicionados, los cuales, al reducir la viscosidad del líquido formado durante el proceso de sinterización, favorecen tanto el crecimiento anisotrópico de los cristales como la generación de mayor cantidad de fase vítrea.



#### Mullita

*Figura 4: Imagen SEM de los materiales M0, con 500 (izquierda) y 2000 (derecha) aumentos sinterizados a 1400 °C y 1500 °C, arriba y abajo respectivamente.*

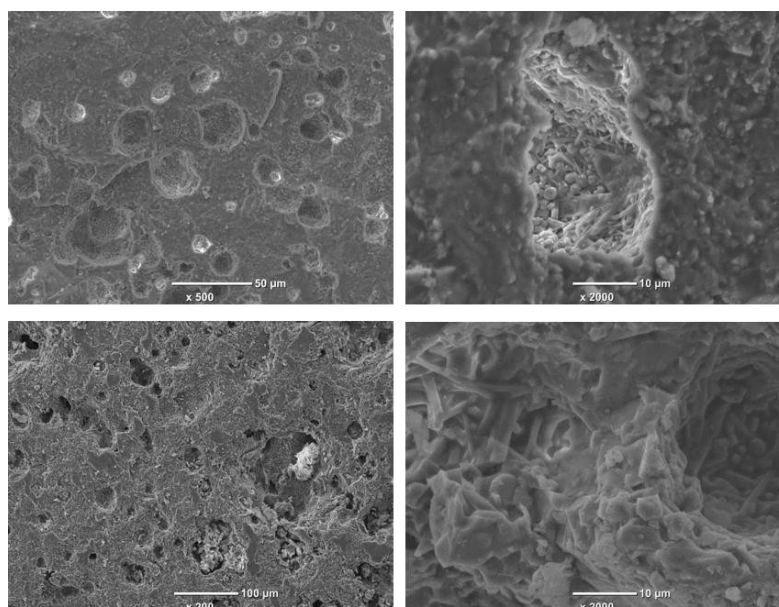


#### Mullita CuO

*Figura 5: Imagen SEM de los materiales MMCu10, con 500 (izquierda) y 2000 (derecha) aumentos sinterizados a 1400 y 1500 °C, arriba y abajo respectivamente.*

La microestructura resultante de las composiciones con mayor contenido de óxidos muestra una distribución heterogénea de poros, algo mayor para el MnO<sub>2</sub>, que, aunque mantiene su forma

redondeada, presenta variaciones significativas en su tamaño y distribución. Este resultado se relaciona directamente con los valores de porosidad presentados en la Tabla 5. Es importante destacar que, a pesar del aumento en la fase vítrea, el material conserva sus características fundamentales. Estos cambios microestructurales inducidos por la incorporación de cobre y manganeso abren interesantes posibilidades para el diseño de materiales cerámicos con características controladas.



### Mullita MnO<sub>2</sub>

Figura 6: Imagen SEM de los materiales MMn10, con 500 (izquierda) y 2000 (derecha) aumentos sinterizados a 1400 y 1500 °C, arriba y abajo respectivamente.

Tabla 6: Módulo de elasticidad dinámico de los materiales en función de la formulación y la temperatura de sinterización

| Temperatura (°C) | Muestra | E (GPa) | Desviación |
|------------------|---------|---------|------------|
| 1400             | M0      | 63      | 6          |
|                  | MCu1    | 84      | 5          |
|                  | MCu3    | 89      | 5          |
|                  | MCu10   | 96      | 20         |
|                  | MMn1    | 80      | 7          |
|                  | MMn3    | 96      | 10         |
|                  | MMn10   | 99      | 10         |
| 1500             | M0      | 61      | 8          |
|                  | MCu1    | 86      | 2          |
|                  | MCu3    | 90      | 10         |
|                  | MCu10   | 104     | 3          |
|                  | MMn1    | 86      | 6          |
|                  | MMn3    | 75      | 10         |
|                  | MMn10   | 99      | 6          |

Se evaluó el módulo de elasticidad dinámica ( $E$ ) de los materiales obtenidos, los resultados se muestran en la Tabla 6. Los valores son similares a los materiales de mullita obtenidos por rutas y formulaciones similares reportados en la literatura (López et al., 2023). Las desviaciones obtenidas en los ensayos

mecánicos son aceptables y por debajo del 25 % en todos los casos. Los valores obtenidos son adecuados para una sollicitación ingenieril como la propuesta en el presente trabajo (Violini et al., 2022).

Estos valores de  $E$  nos dan una idea de la rigidez de los materiales. Se observa que la incorporación de CuO y MnO<sub>2</sub> afecta los valores de rigidez incrementándose progresivamente desde 63 GPa (M0) a valores cercanos a 100 GPa (MCu10 y MMn10). Este efecto es explicable por la mayor sinterización del material y presencia de mayor cantidad de fase no cristalina (fase vítrea).

## CONCLUSIONES

En este trabajo se elaboraron a escala laboratorio materiales de mullita por reacción sinterización de arcilla caolinítica y alúmina. Este estudio evaluó el efecto de la adición de óxido de cobre (CuO) y óxido de manganeso (MnO<sub>2</sub>) (1, 3, y 10 % p/p). Los resultados demostraron que ambos óxidos actúan como fundentes efectivos (el MnO<sub>2</sub> en mayor proporción que el CuO), mejorando la sinterización a en el rango de temperatura de 1400-1500 °C. El efecto de estos óxidos en la termoquímica de la reacción de sinterización de las mezclas arcilla-alúmina fue descrito. Mientras la deshidratación del caolín no se vio afectada si se adelantaron más de 100 °C, la formación de espinela (premulita) y el proceso de sinterización o densificación del material.

Según lo observado por DRX no se forman soluciones sólidas del manganeso y el cobre con la mullita, y la adición de estos óxidos contribuyó a la formación de fase vítrea. La porosidad abierta de los materiales fue disminuida por debajo del 5% con mayor incorporación de óxido, gracias a la formación de fases líquidas transitorias que favorecen la densificación. Sin embargo, en la muestra con 10 % de MnO<sub>2</sub> tratada a 1500 °C provocó un aumento de porosidad posiblemente asociado a la volatilización de especies de manganeso y a la formación de microgrietas.

En cuanto a las propiedades ópticas, los cerámicos presentaron una luminosidad ( $Y$ ) inferior a 8, con tonalidades negro-verdosas (CuO) y marrón oscuro (MnO<sub>2</sub>), debido a la presencia de óxidos metálicos en la matriz vítrea. En lo que respecta a las propiedades mecánicas, el módulo de elasticidad dinámico ( $E$ ) aumentó con el contenido de aditivo.

Los materiales cerámicos obtenidos, particularmente aquellos de cobre a 1400 y 1500 °C y aquellos de MnO<sub>2</sub> de 1400 °C, presentan características adecuadas para aplicaciones en intercambiadores de calor para tecnologías solares de concentración. Su baja porosidad (<5 %), estabilidad térmica y buen comportamiento mecánico los convierten en candidatos prometedores para la fabricación de tubos receptores en sistemas CSP (Concentrated Solar Power), donde se requieren materiales resistentes a altas temperaturas y con buena transferencia térmica. Adicionalmente, su baja luminosidad ( $Y < 8$ ) podría favorecer la absorción de radiación solar en dichas aplicaciones.

## FUENTES DE FINANCIAMIENTO

Esta investigación fue financiada por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET, Argentina), la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT, Argentina, números de subvención PICT-2019-03570 y 2021-00392) y la Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de La Plata (UNLP, Argentina, X-904). C.P agradece a CONICET por la beca doctoral, AM, MFH, D.R. y NMR son miembros de la carrera de CONICET.

## REFERENCIAS

- Carty, W. M., & Senapati, U. (1998). Porcelain—Raw Materials, Processing, Phase Evolution, and Mechanical Behavior. *Journal of the American Ceramic Society*, 81(1), 3-20.  
<https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1998.tb02290.x4>
- Chen, C. Y., Lan, G. S., & Tuan, W. H. (2000). Preparation of mullite by the reaction sintering of kaolinite and alumina. *Journal of the European Ceramic Society*, 20(14-15), 2519-2525.  
[https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(00\)00125-4](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(00)00125-4)



- Da Silva, V. J., Da Silva, M. F., Gonçalves, W. P., De Menezes, R. R., Araújo Neves, G. D., Lucena Lira, H. D. y De Lima Santana, L. N. (2016). Porous mullite blocks with compositions containing kaolin and alumina waste. *Ceramics International*, 42(14), 15471-15478. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.06.199>
- Hernández, M. F., López, P. V., Conconi, M. S., & Rendtorff, N. M. (2022). Effect of boron sources in the thermal behavior of a clay-based ceramics. *Open Ceramics*, 9, 100227. <https://doi.org/10.1016/j.oceram.2022.100227>
- Hernández, M. F., Violini, M. A., Serra, M. F., Conconi, M. S., Suarez, G., & Rendtorff, N. M. (2020). Boric acid (H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>) as flux agent of clay-based ceramics, B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> effect in clay thermal behavior and resultant ceramics properties. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 139(3), 1717-1729. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08563-4>
- Lima, L. K. S., Silva, K. R., Menezes, R. R., Santana, L. N. L., & Lira, H. L. (2022). Microstructural characteristics, properties, synthesis and applications of mullite: A review. *Cerâmica*, 68(385), 126-142. <https://doi.org/10.1590/0366-69132022683853184>
- Liu, K.-C., Thomas, G., Caballero, A., Moya, J. S., & De Aza, S. (1994). Mullite formation in kaolinite- $\alpha$ -alumina. *Acta Metallurgica et Materialia*, 42(2), 489-495. [https://doi.org/10.1016/0956-7151\(94\)90503-7](https://doi.org/10.1016/0956-7151(94)90503-7)
- López, P. V., Hernández, M. F., Mocciaro, A., Richard, D., & Rendtorff, N. M. (2025). MoO<sub>3</sub> and AlF<sub>3</sub> effect on the properties of porous mullite ceramics with needle-like microstructure. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 22(2), e14947. <https://doi.org/10.1111/ijac.14947>
- López, P. V., Hernández, M. F., Richard, D., Conconi, M. S., & Rendtorff, N. M. (2023). Porous acicular mullite ceramics produced from well and poorly crystallized kaolinite. *Applied Clay Science*, 238, 106937. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2023.106937>
- Morris, D. G., López-Delgado, A., Padilla, I., & Muñoz-Morris, M. A. (2015). Selection of high temperature materials for concentrated solar power systems: Property maps and experiments. *Solar Energy*, 112, 246-258. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.09.050>
- Palacios, A., Barreneche, C., Navarro, M. E., & Ding, Y. (2020). Thermal energy storage technologies for concentrated solar power – A review from a materials perspective. *Renewable Energy*, 156, 1244-1265. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.127>
- Pihl, E., Kushnir, D., Sandén, B., & Johnsson, F. (2012). Material constraints for concentrating solar thermal power. *Energy*, 44(1), 944-954. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.04.057>
- Pekdemir, A.D., Sarikaya, Y. & Önal, M (2016). Thermal transformation kinetics of a kaolinitic clay. *J Therm Anal Calorim* 123, 767–772. <https://doi.org/10.1007/s10973-015-4866-8>
- Rajendran, D. R., Ganapathy Sundaram, E., Jawahar, P., Sivakumar, V., Mahian, O., & Bellos, E. (2020). Review on influencing parameters in the performance of concentrated solar power collector based on materials, heat transfer fluids and design. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 140(1), 33-51. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08759-8>
- Sainz, M. A., Serrano, F. J., Amigo, J. M., Bastida, J., & Caballero, A. (2000). XRD microstructural analysis of mullites obtained from kaolinite–alumina mixtures. *Journal of the European Ceramic Society*, 20(4), 403-412. [https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(99\)00183-1](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(99)00183-1)
- Sarvghad, M., Delkasar Maher, S., Collard, D., Tassan, M., Will, G., & Steinberg, T. A. (2018). Materials compatibility for the next generation of Concentrated Solar Power plants. *Energy Storage Materials*, 14, 179-198. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2018.02.023>
- Schneider, H., Schreuer, J., & Hildmann, B. (2008). Structure and properties of mullite. A review *Journal of the European Ceramic Society*, 28(2), 329-344. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2007.03.017>
- Torrecillas, R., Calderón, J. M., Moya, J. S., Reece, M. J., Davies, C. K. L., Olagnon, C., & Fantozzi, G. (1999). Suitability of mullite for high temperature applications. *Journal of the European Ceramic Society*, 19(13-14), 2519-2527. [https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(99\)00116-8](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(99)00116-8)
- Violini, M. A., Hernández, M. F., Gass, S. E., Tomba Martinez, A. G., & Rendtorff, N. M. (2022). High temperature mechanical behavior of low stiffness Al<sub>2</sub>TiO<sub>5</sub> and Al<sub>2</sub>TiO<sub>5</sub>-3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.2SiO<sub>2</sub>-ZrTiO<sub>4</sub> composite materials. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 19(1), 514-522. <https://doi.org/10.1111/ijac.13919>
- Yuan, W., Kuang, J., Huang, Z., & Yu, M. (2022). Effect of aluminum source on the kinetics and mechanism of mullite preparation from kaolinite. *Chemical Physics Letters*, 787, 139242. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2021.139242>

## EVALUATION OF THE TECHNOLOGICAL PROPERTIES OF MULLITE MATERIALS FOR USE IN CONCENTRATED SOLAR THERMAL ENERGY

**ABSTRACT:** Concentrated Solar Power (CSP) uses direct normal irradiance to focus solar radiation and heat fluids, generating electricity. Its components, such as heat transfer pipes, require materials with high refractoriness, mechanical strength, and corrosion resistance. Mullite ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ), due to its thermal, mechanical, and chemical properties, is a promising material for these applications. This study evaluates the effect of adding copper (CuO) and manganese ( $\text{MnO}_2$ ) oxides on the mullitization of kaolinitic clay and alumina mixtures. Mixtures containing 1, 3, and 10 wt% of each oxide were prepared, shaped, and sintered at 1400 and 1500 °C. Thermal and dilatometric analyses showed that both oxides act as fluxing agents, promoting mullite formation and enhancing densification, particularly  $\text{MnO}_2$ . X-ray diffraction revealed that the oxides do not incorporate into the crystalline structure but into the glassy phase, reducing porosity (<5%) and increasing density. Regarding optical properties, low brightness ( $Y < 8$ ) and dark tones were obtained, favoring solar absorption. Mechanically, the elastic modulus increased up to ~100 GPa. The ceramics, especially those with CuO, exhibit low porosity, thermal stability, and good mechanical performance, making them suitable for receiver tubes in CSP systems.

**Keywords:** concentrated solar thermal energy, mullite, copper oxide, manganese oxid

## **NORMA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE EQUIPOS SOLARES COMPACTOS PARA CALENTAMIENTO DE AGUA DOMICILIARIA EN DISTINTAS REGIONES GEOGRÁFICAS DE LA REPÚBLICA ARGENTINA**

**Anahí Lanson<sup>1</sup>, Jorge R. Barral<sup>2</sup>, Federico Nores Pondal<sup>3</sup>, Gastón Lunardelli<sup>4</sup>, Joaquín Garat<sup>5</sup>**

<sup>1</sup> Grupo de Estudios de la Radiación Solar, Universidad Nacional de Luján

<sup>2</sup> Grupo de Energía Solar, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Río Cuarto

<sup>3</sup> Laboratorio de Estudios Sobre Energía Solar, Universidad Tecnológica Nacional Regional Buenos Aires

<sup>4</sup> Energías Renovables, Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI)

<sup>5</sup> Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM), Comisión de Energía Solar Térmica.

Tel. 0232-3423979 - e-mail: [anahilanson@gmail.com](mailto:anahilanson@gmail.com)

**RESUMEN:** Una clara identificación de las características físicas y la capacidad productiva facilita la comparación y selección de sistemas solares compactos de agua caliente domiciliaria. Esto es especialmente crítico si la decisión es tomada por el usuario final. Es por eso que se ha desarrollado una norma IRAM de etiquetado de estos sistemas especialmente enfocado en el usuario final, contemplando, también, la complejidad de climas de nuestro país. Para obtenerla, se ha trabajado en el subcomité de Energía Solar Térmica del IRAM, analizando la distribución geográfica de los valores medios mensuales del recurso solar y de la temperatura ambiente, con las que se determinó una zonificación que facilita una correcta interpretación de la producción de agua caliente esperable con cada sistema etiquetado. En este artículo se justifican los criterios utilizados en la selección de cinco localidades para la proyección de ensayos bajo norma, donde se definirán los valores de producción de agua caliente que constarán en el etiquetado, logrando así, una clasificación de sistemas solares compactos sobre la base de la estimación de la energía anual que pueden producir en cada región. La norma fue sometida a discusión pública y se encuentra publicada desde el 27 de diciembre de 2024.

**Palabras clave:** Sistemas solares compactos; producción de energía; ensayos; normas; clima

### **INTRODUCCIÓN**

En Argentina, el uso de agua caliente sanitaria (ACS) es, estadísticamente, el segundo consumo energético de una vivienda tipo, solo superada por la climatización (Gil, 2021). Hoy, mayoritariamente, la energía que produce este calentamiento proviene de gas natural, gas envasado, electricidad, leña y carbón (Queipo y Pasetti, 2022). Dado el actual contexto de discusión sobre el destino del gas natural, su ahorro mediante el aprovechamiento de la energía solar permitiría, al menos, disminuir el consumo de estas fuentes energéticas mediante otra limpia y renovable, en consonancia con la Agenda 2030. Se espera que esta transición contribuya, desde el punto de vista ambiental, con la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero. Desde el punto de vista social, facilite el acceso a la energía y a una mejor calidad de vida a la población sin acceso al gas. Y desde el punto de vista económico, represente un menor costo de energía tanto para los usuarios como para el estado dado que no requiere inversiones en infraestructura, a la vez que genera nuevas oportunidades laborales.

En este sentido, para el calentamiento de agua domiciliaria de consumo unifamiliar, los sistemas compactos son los más convenientes, y en consecuencia, representan la mayoría de los equipos comercializados en nuestro país (Barral et al., 2023). Los disponibles en el mercado, se caracterizan por acoplar la superficie absorbente al tanque almacenamiento en una única unidad de geometría y tamaño

predeterminado, no requieren bomba de circulación, proveen el servicio de agua caliente por gravedad, y son de simple y rápida instalación. Una buena referencia de fabricantes e importadores de estos equipos se encuentra en el Censo Nacional Solar Térmico realizado por el INTI (Sabre et al., 2020).

Si bien un técnico con algún conocimiento en energía solar puede seleccionar el sistema solar compacto adecuado, dada la sencillez de implementación de esta tecnología, esta selección suele ser determinada por el usuario final. Es allí donde resulta indispensable la disponibilidad de información clara, veraz y completa. En este contexto, la estandarización de métodos de ensayo y el etiquetado de producto se vuelve crucial para garantizar la fiabilidad y comparabilidad de los sistemas solares disponibles en el mercado.

El Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM) desarrolla normas técnicas para promover la calidad y seguridad de los productos en Argentina y representa al país en organizaciones internacionales como ISO, COPANT y AMN, lo que asegura la armonización de las normas nacionales con estándares globales.

En este trabajo se presenta lo realizado por el subcomité de Energía Solar Térmica del IRAM, específicamente en la norma IRAM 210015, bajo el título general "Energía solar. Sistemas solares compactos", que se divide en dos partes: "Parte 1 - Requisitos generales" y "Parte 2 - Etiquetado de producción de energía". Y se centra en la Parte 2, que establece la metodología para la estimación de la producción de energía anual y la información a proporcionar a los usuarios.

## **METODOLOGÍA PARA EL ETIQUETADO DE SISTEMAS SOLARES COMPACTOS**

La metodología propuesta en la norma IRAM 210015-2 se aplica a sistemas solares compactos, con o sin resistencia de apoyo incorporada. Pero en el caso de sistemas con resistencia de apoyo, estos deben ser ensayados con dicha resistencia desconectada. Cabe aclarar que esta norma excluye expresamente a los sistemas solares térmicos de circulación forzada prefabricados que son abarcados en la IRAM 210023.

Así como la Unión Europea evalúa el comportamiento térmico de equipos, para distintos climas de referencia (en cuatro localidades europeas) y distintas demandas, mediante la norma EN 12976-2 (2000), la IRAM 210015-2 dispone un formato de ficha técnica a modo de etiquetado, para identificar fácilmente las características técnicas del equipo, la producción de agua caliente esperable de su uso y la región en que puede esperarse una producción equivalente. La versión argentina plantea definir la información para cinco localidades de referencia y seis volúmenes diarios de extracción.

### ***Requisitos para el etiquetado***

Esta norma determina que, para la obtención de este etiquetado, el fabricante debe proveer:

- Marca y modelo del equipo.
- Información para el instalador y el usuario final, obtenida a partir del ensayo del sistema.

También indica que esta ficha debe acompañar al producto de forma visible y legible hasta su adquisición por el consumidor final, y publicarse junto con el producto cuando se comercialice por canales en líneas. Y aclara que no reemplaza las instrucciones de operación que el fabricante debe entregar, sino que se complementa con ellas.

La norma exige información mínima de operación, incluyendo:

- Condiciones de diseño.
- Descripción de componentes.
- Medidas de seguridad previas a la puesta en marcha.
- Precauciones de uso.
- Plan de mantenimiento.
- Datos de desempeño.
- Procedimientos de desmantelamiento.

Para obtener la determinación del desempeño del sistema, el fabricante deberá encomendar su ensayo a un laboratorio reconocido para tal fin. Este último determinará la predicción de la producción de energía de acuerdo con la norma IRAM 210004, para las condiciones de referencia establecidas en un apartado de la IRAM 210015-2, y con algunas modificaciones específicas para la ficha técnica mencionada anteriormente.

Cabe destacar que el equipo se somete a ensayo una sola vez, en algún laboratorio autorizado. Sin importar el clima del lugar de emplazamiento del laboratorio, el resultado del ensayo consta de dos ecuaciones exclusivas de cada equipo. Luego, un algoritmo previsto en la norma IRAM 210004, que usa dichas ecuaciones, puede utilizarse para realizar simulaciones y obtener los resultados de Fracción Solar Anual en cualquier lugar del país (no sólo los de referencia). Para ejecutar estas simulaciones se debe contar con los valores adecuados de un año típico de irradiación solar en el plano del colector y temperaturas medias diurnas y diarias, todos de la localidad en que se desee analizar la posibilidad de montar el equipo. Esto último puede acarrear alguna dificultad, especialmente los valores de irradiación que se miden en pocas estaciones meteorológicas del país. Pero es posible encontrar algún centro importante cercano que sí tenga datos de irradiación, o utilizar datos satelitales.

Para este etiquetado, los indicadores de desempeño a obtener son:

- Calor producido por el sistema solar térmico ( $Q_L$ )
- Fracción solar ( $f_{sol}$ )
- Energía de sistemas auxiliares ( $Q_{par}$ ), si existen

El Calor producido será determinado por las ecuaciones (1) y (2)

$$Q_L = a_1 H_{pi} + a_2 (T_{a(día)} - T_{red}) + a_3 \quad (1)$$

Donde:

$H_{pi}$  = irradiación total recibida durante el día, en el plano del colector del sistema compacto [ $\text{MJ}/\text{m}^2$ ]

$T_{a(día)}$  = temperatura ambiente promedio durante el calentamiento [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$T_{red}$  = temperatura del agua fría

$a_1$ ,  $a_2$ , y  $a_3$  son constantes que resultan del estudio estadístico determinado en la norma.

$$U_s = \frac{\rho_w \cdot c_f \cdot V_s}{\Delta t} \ln \frac{(T_i - T_{as(av)})}{(T_f - T_{as(av)})} \quad (2)$$

$U_s$  = coeficiente de pérdidas del depósito [ $\text{W}/(^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^2)$ ]

$V_s$  = Volumen del almacenamiento

$T_i$  = temperatura al iniciar la medición (homogeneizada previamente por recirculación)

$T_f$  = temperatura agua almacenada al finalizar la medición (homogeneizada por recirculación)

$T_{as(av)}$  = temperatura promedio del aire externo al almacenamiento durante el proceso de medida

$t$  = tiempo transcurrido desde el inicio a la finalización de la medición.

A diferencia de la norma europea, cuya certificación provee información sobre la producción de energía de cada sistema en función de tres perfiles diferentes de extracción, que a su vez dependen del volumen del acumulador, la IRAM 210015-2 exhibe el porcentaje de ahorro esperado (o fracción solar) en función de la cantidad de personas que harán uso del servicio, de 1 a 6 personas. El volumen de agua por persona equivale a 50 litros, volumen que responde tanto a los hábitos de consumo de los usuarios argentinos, como a los volúmenes de los reservorios predominantes en el mercado.

El etiquetado presentará la fracción solar expresada en ahorro porcentual, como indica la ecuación (3), por cada una de estas cantidades de usuarios. Y será determinada como:

$$f_{sol} = Q_L / Q_d \quad (3)$$

Donde:

- $Q_L$ : energía suministrada por la parte solar del sistema.
- $Q_d$ : demanda de calor total del sistema.

Paralelamente, este etiquetado exhibe las condiciones de referencia para la expresión del desempeño. Estas incluyen: la orientación del colector (Norte), el ángulo de inclinación (aproximadamente latitud +10°), el largo total del circuito del colector (20 m), y el diámetro y espesor de tubería según el área de apertura total de captación para sistemas por termosifón. En cuanto a la temperatura ambiente de acumulación, esta fue fijada en 15 °C.

Para la determinación de los valores de ahorro esperados por volumen de extracción, se adoptaron cinco localidades de referencia en el país. Éstas fueron seleccionadas tomando en cuenta la cantidad de habitantes, la representatividad del clima que la circunda (radiación, temperatura media ambiente, efecto “isla de calor”, etc), la disponibilidad de datos suficientes y confiables. Con todos estos condicionamientos, se definieron las ciudades de Santiago del Estero, Paraná, La Plata, Mendoza y Bariloche, detalladas en la Tabla 1, como referencia para el cálculo de producción energética.

*Tabla 1: localidades seleccionadas para la proyección de la norma IRAM 210004*

| Ciudades de referencia |
|------------------------|
| Santiago del Estero    |
| Paraná - Entre Ríos    |
| La Plata - Bs. As.     |
| Mendoza                |
| Bariloche - Río Negro  |

Se observa que no se han seleccionado como locación algunos conglomerados de importancia como CABA, Rosario o Córdoba que, desde el punto de vista comercial, son importantes dada su cantidad de habitantes. Esto se debe al efecto “isla de calor” muy marcado en las grandes ciudades, y que a pocos kilómetros del conglomerado ya no tiene influencia. Esto podría conducir a predicciones erróneas para usuarios cercanos que tomen a estas ciudades como referencia.

### **Zonificación geográfica**

Con el fin de brindar al usuario final una herramienta simple que facilite la interpretación de la producción mencionada en esta ficha técnica y, consecuentemente, la selección del equipo más adecuado a su ubicación, se elaboró un mapa de zonificación de la República Argentina. Esta zonificación presenta isolíneas de la variable  $\psi$  ( $\Psi$ ), en relación a la latitud y longitud del país.

Para confeccionarlo, se realizó un análisis explorativo del desempeño de 3 sistemas compactos ya ensayados, en 8 localidades. Para ello, se evaluó la producción de energía anual [kWh/año] según la norma IRAM 210004; dicha producción en relación al volumen del tanque del sistema compacto [kWh/año.litro] y el ahorro relativo [%] que representa para alcanzar una temperatura de 45 °C, para cada uno de estos equipos, y en cada localidad.

Luego, se comparó estos ahorros con las condiciones propias de cada localidad. Para eso se determinó el cociente entre el salto térmico entre los 45 °C deseados y los valores medios diarios anuales de la temperatura ambiente, y la irradiación solar (en este caso en plano horizontal), de cada localidad. En esta relación, a la que se denominó Req/Rad y expresada en la ecuación (4), se consideró el requerimiento energético por litro de agua, así como la energía solar disponible por metro cuadrado.

$$\text{Req/Rad} = \frac{C_p \cdot (45^\circ\text{C} - T_{\text{media}}) \cdot 365}{H_{\text{anual}}} \quad (4)$$

Donde

$C_p$  = Calor específico del agua expresado en kWh / litro.°C

$T_{media}$  = temperatura ambiente media anual expresada en °C

$H_{anual}$  = Irradiación anual en el plano horizontal por metro cuadrado expresada en kWh/m<sup>2</sup>.año

En la Figura 1 se presentan los resultados de las simulaciones y el valor de estas condiciones ambientales medias.

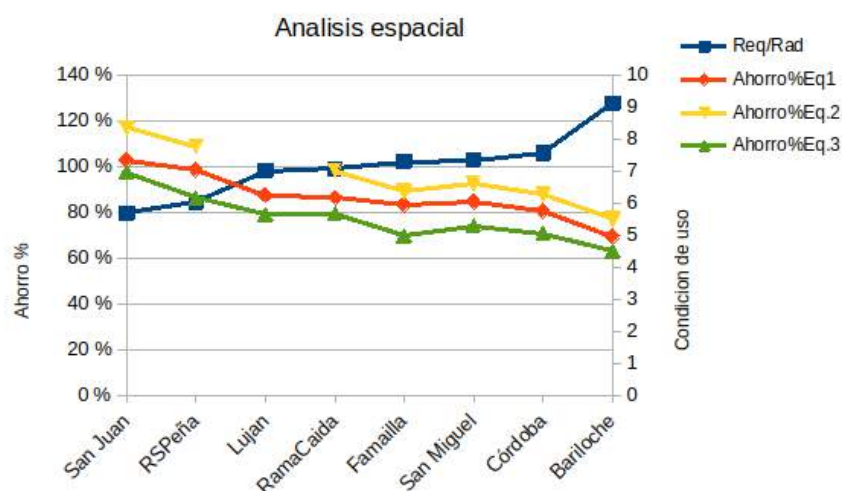


Figura 1: Comparación del ahorro relativo de tres sistemas compactos diferentes y la relación entre el requerimiento energético por litro de agua y la radiación diaria media anual para 8 localidades

Luego del análisis de estos resultados, se definió la variable de condiciones medias de uso ( $\Psi$ ) con la finalidad de condensar en un único parámetro las variables más relevantes que definen la producción de un sistema compacto, como muestra en la ecuación (5)

$$\Psi = \frac{\sum (45^{\circ}\text{C} - T_{media_i}) \cdot D_i}{\sum H_i \cdot D_i} \quad (5)$$

Donde

$T_{media_i}$  = temperatura ambiente media mensual

$H_i$  = irradiación media mensual

$D_i$  = cantidad de días del mes

Zonificar una región tan extensa y de climas diversos como Argentina es complejo. Es por ello que para realizar el mapa se ha completado una base de datos de 15 localidades de diferentes regiones bioclimáticas: Ia; Ib; IIa; IIb; IIIa; IVa; IVc y VI según norma IRAM 11603. De cada localidad se han recopilado los valores diarios medios mensuales de temperatura ambiente y de irradiación solar, y con ellos se ha determinado la condición media anual de uso  $\Psi$  para cada sitio.

A modo de ejemplo, se presenta los valores de la localidad de San Miguel en la Tabla 2.

Tabla 2: Determinación de  $\Psi$  para la localidad de San Miguel

|             | ENE  | FEB  | MAR  | ABR  | MAY  | JUN  | JUL  | AGO  | SET  | OCT  | NOV  | DIC  | ANUAL  |
|-------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------|
| # D         | 31   | 28   | 31   | 30   | 31   | 30   | 31   | 31   | 30   | 31   | 30   | 31   | 365    |
| $H_{media}$ | 7,4  | 6,0  | 5,3  | 3,9  | 2,7  | 2,3  | 2,7  | 2,9  | 4,3  | 5,5  | 6,8  | 7,7  | 1.745  |
| $T_{media}$ | 24,0 | 22,9 | 20,5 | 17,2 | 13,2 | 10,0 | 9,8  | 11,0 | 14,0 | 16,9 | 19,9 | 22,1 |        |
| Req         | 21,0 | 22,1 | 24,5 | 27,8 | 31,8 | 35,0 | 35,2 | 34,0 | 31,0 | 28,1 | 25,1 | 22,9 | 10.308 |
| $\Psi$      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | 5,9    |

Finalmente, se confeccionó la grilla con las coordenadas georeferenciadas de cada localidad (latitud y longitud) con sus respectivos valores de  $\Psi$ . Y con esta grilla se alimentó el programa SURFER 10 que arrojó el mapa que se presenta en la Figura 2. En el mapa resultante la zona 1 está delimitada por la



isolínea de 5,3; la zona 2 esta delimitada por las isolíneas de 5,3 y 7,3 ; la zona 3, entre 7,3 y 9,3; la zona 4, entre 9,3 y 11,3 y la zona 5 se extiende al sur de la isolínea de 11,3.

Dada la extensión y la complejidad climática de Argentina, la aplicación de esta norma podría requerir una mayor sectorización. De ser así, esta norma podrá ser revisada en el futuro.

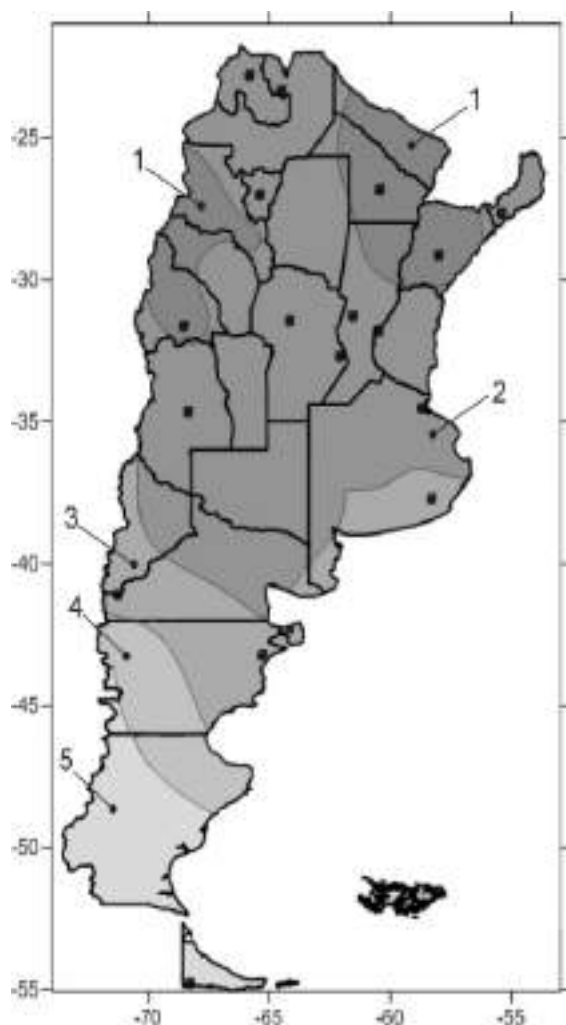


*Figura 2: mapa de regiones de isolíneas de  $\Psi$ , disponible en Anexo a norma IRAM 210015-2*

Esta zonificación es representativa de la relación entre el requerimiento de salto térmico y el recurso solar disponible. En efecto, por la forma en que está definida, la variable de condición de uso ( $\Psi$ ) permite identificar las áreas donde pueden esperarse desempeños similares de un sistema solar térmico compacto, dependiendo de las características de cada caso, que serán determinados por el ensayo mencionado y constará en la ficha técnica resultante. El mapa es especialmente útil para las regiones que se encuentran distantes de las localidades de referencia adoptadas.

### **Consideraciones adicionales**

No se tuvieron en cuenta, en esta primera instancia, para la elaboración del mapa otras variables climáticas, como la humedad relativa y el viento, que pueden influir en la producción de energía del equipo y por lo tanto en la fracción solar o ahorro generado por su uso. Esto hace que en algunos casos particulares, como por ejemplo en zonas muy cálidas y húmedas, el ahorro pueda ser un poco menor al esperado por el gráfico de zonificación, así mismo para regiones muy ventosas.

Por último, esta norma establece una modificación al método de determinación de la energía extraída de la norma IRAM 210004. Aporta, también, un método de cálculo de la temperatura del agua fría para

cada día del año y valores de temperatura del agua fría media anual; amplitud térmica estacional del agua fría de las localidades de referencia.

### ***Capacidades de ensayo***

La metodología puede ser aplicada en Argentina por al menos tres laboratorios con experiencia en la IRAM 210004:

- INTI – Plataforma solar térmica.
- LESES – UTN Facultad Regional Buenos Aires (Nores Pondal et al., 2023).
- GES – UNRC (Barral et al., 2023).

## **CONCLUSIONES**

La norma IRAM 210015-2 proporciona una metodología estandarizada para la estimación de la producción de energía de sistemas solares compactos, lo que facilita la clasificación y la comparación de estos sistemas en el mercado argentino.

La especificación de las características del sistema y la información a proporcionar, garantiza la transparencia y la seguridad para el usuario final. Es por ello que la adhesión a esta norma contribuye al desarrollo de la energía solar térmica en Argentina al establecer un marco técnico sólido para la evaluación del desempeño de los equipos.

Es importante destacar la relevancia de las condiciones de referencia detalladas, para asegurar la precisión en la predicción del desempeño.

El ensayo que plantea esta norma puede ser realizado por al menos tres laboratorios de Argentina (Barral et al., 2023), por lo cual esta normativa local es conveniente para el correcto desarrollo de este mercado. La existencia de laboratorios capacitados y la potencial obligatoriedad del etiquetado constituyen una oportunidad para impulsar el uso seguro y eficiente de los sistemas solares térmicos compactos. Un marco legal específico para la energía solar térmica permitiría consolidar este avance. La obligatoriedad del etiquetado y la provisión de información completa al usuario final promoverían el uso adecuado y seguro de los sistemas solares compactos, por lo que sigue siendo necesario un marco legal de la Energía Solar Térmica.

Este trabajo permite concluir que es posible elaborar una normativa de fácil interpretación para los vendedores e instaladores, así como para los usuarios.

Que en la actualidad el país cuenta con capacidad para llevarla adelante, dado que hay laboratorios equipados y con capacidades suficientes para realizar los ensayos mencionados.

Y que la permanente revisión de las normas IRAM permitirá incorporar más ciudades de referencia en caso de ser necesarias.

### ***Reflexiones***

La Secretaría de Comercio, en 2024, dejó sin efecto el reglamento que regía el control de los sistemas compactos. Debido a esto, hoy es posible encontrar productos que carecen de información clara y confiable respecto a su desempeño y potencial de producción de agua caliente con respecto a las condiciones en que puede ser utilizado. Se entiende necesario reiterar la necesidad de un marco legal y regulatorio que ordene el mercado en el país, respalde la implementación de tecnologías eficaces y, así también, fomente la transición energética comprometida por nuestra nación con el mundo. Respecto a este punto, se resalta que estos sistemas tienen uno de los mayores aportes a la sustitución de combustibles fósiles, y su uso es aún incipiente en Argentina. En las regiones del centro y norte de nuestro país, la relación entre el costo de los equipos y el ahorro económico de la energía que sustituyen es cada vez más conveniente por lo que se espera un crecimiento sostenido de su uso. Es por ello que consideramos que se deben contemplar otros elementos positivos para la difusión y buena administración del rubro, entre otros:

- a) Crear un organismo nacional coordinador similar al europeo que abarque todo el país
- b) Desarrollar programas de capacitación continua para instaladores, en continuación de los pasos ya dados por el INTI en este sentido, con el fin de mantener actualizado el registro de instaladores certificados por el organismo.
- c) Fomentar herramientas de fortalecimiento de fabricantes nacionales, así como incentivos impositivos a los usuarios consumidores
- d) Mantener actualizada la contabilización de metros cuadrados instalados que permitan cuantificar el ahorro, tanto energético de fuentes convencionales de energía, como de emisiones de gases de efecto invernadero.

## FUENTES DE FINANCIAMIENTO

Este trabajo fue realizado por los miembros del subcomité de Energía Solar Térmica, dependiente de la gerencia de Mecánica y Metalurgia, de la dirección de Normalización del IRAM. Esta participación es financiada por las instituciones de las que cada miembro forma parte.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Servicio Meteorológico Nacional por mantener gran parte de su base de datos disponible, y al Grupo de Estudios de la Radiación Solar de la Universidad Nacional de Luján por compartir sus resultados con la comunidad científica, información sin la cual este trabajo no hubiera sido posible.

La norma 210015-2 se encuentra disponible:

para su adquisición en <https://catalogo.iram.org.ar/#/normas/detalles/14197>

en el buscador <https://catalogo.iram.org.ar/#/home>

## REFERENCIAS

- Barral J., Lanson A., Nores Pondal F., Chiaravalotti A., Bertinat P., Garat J. (2023) Norma para la caracterizar térmicamente a los sistemas compactos solares para calentamiento de agua residencial en la República Argentina. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol, 27 , pp 205-2016.
- Gil S. (2021) Eficiencia energética en Argentina - Sector residencial – Agua caliente sanitaria. GFA Consulting Group. <[https://www.eficienciaenergetica.net.ar/img\\_publicaciones/04271009\\_03.SectorResidencial-ACS.pdf](https://www.eficienciaenergetica.net.ar/img_publicaciones/04271009_03.SectorResidencial-ACS.pdf)>
- Nores Pondal, F. J., Barnetche Orenzas, M., Haim, A. (2023) “Diseño de ensayos de durabilidad sobre colectores solares térmicos en el territorio argentino según norma IRAM 210007:2017”, 4o Congreso de Energías Sustentables, Bahía Blanca, Argentina.
- Queipo G. y Pasetti G. (2022) Energía solar térmica: oportunidades para la industria argentina. Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Libro digital <[https://www.inti.gob.ar/assets/uploads/files/economia-industrial/01-2023/Energia\\_solar\\_termica\\_Final.pdf](https://www.inti.gob.ar/assets/uploads/files/economia-industrial/01-2023/Energia_solar_termica_Final.pdf)>
- Sabre M., Pereira G., Medel N., Pescio F., Chiaravallotti A., Bornancin M., Cordi M., Lunardelli G. y Quiroga L. (2020) Censo Nacional Solar Térmico 2020 - Informe Período 2019. Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI). Buenos Aires.
- EN 12976 (2000) Thermal Solar Systems and Components. Factory Made Systems — Part 2: Test Methods.
- IRAM (2016) IRAM 210004 Métodos de ensayo exteriores para la caracterización y predicción del rendimiento anual de los sistemas solares. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires, 56 pp.

## **STANDARD FOR THE CHARACTERIZATION OF COMPACT SOLAR WATER HEATING SYSTEMS IN DIFFERENT GEOGRAPHICAL REGIONS IN ARGENTINA**

**ABSTRACT:** Accurate identification of the physical characteristics and productive capacity of compact domestic hot water solar systems facilitates their comparison and selection. This is especially critical when the decision is made by the end user. For this reason, an IRAM standard for labeling these systems have been developed, with a specific focus on the end user and including the climatic complexity of our country. To achieve it, the IRAM Thermal Solar Energy Committee worked on a standard, published by Barral and others in 2023, that delves into the geographical distribution of solar resources and average temperatures. This work established a radiation and temperature zoning to allow for a proper interpretation of the expected hot water production from each labeled system. Five localities were defined for the projection of tests under the standard, which will determine the hot water production values to be included on the label, thus achieving a classification of compact solar systems based on the estimation of the annual energy they can produce in each region. The standard was submitted to public discussion and has been approved since December 2024.

**Keywords:** compact solar water heaters, energy production, climate, tests, standards.

## DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA ABSORTANCIA SOLAR DE TECHOS METÁLICOS ONDULADOS EN CONDICIONES REALES: METODOLOGÍA Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Gerardo Vitale<sup>1</sup>, Andrés Monetta<sup>1</sup>, Italo Bove<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratorio de Energía Solar, Depto. de Física del CeNUR Litoral Norte, Universidad de la República, Salto, Uruguay

<sup>2</sup>Instituto de Física de la Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay  
email: [gvitalepdf@gmail.com](mailto:gvitalepdf@gmail.com)

**RESUMEN:** La absorptancia solar de techos metálicos ondulados suele tomarse de ensayos de laboratorio o tablas, lo que no siempre representa superficies reales bajo cielo variable. Presentamos una metodología en campo para estimar la absorptancia efectiva de una chapa galvanizada ondulada usada típicamente en techos de vivienda social uruguaya. Se instrumentó un arreglo de siete radiómetros de silicio LI-200 orientados hacia abajo para medir la radiación reflejada y un sensor adicional hacia arriba para la irradiancia global incidente (GHI). Para mitigar picos por reflejos especulares y la heterogeneidad espacial debida a la geometría corrugada, se aplicaron filtros numéricos basados en condiciones físicas ( $GHI > 100 \text{ W/m}^2$ ), geométricas (ángulo cenital  $< 75^\circ$ ), en la consistencia espacial entre sensores (dispersión de reflejada  $\sigma_{\text{ref}} < 20 \text{ W/m}^2$ ), y estadística robusta (mediana y promedio recortado entre sensores). Del total de la campaña, 13 379 registros minutales (18,2 %) pasaron todos los filtros. Clasificando por condición de cielo mediante el índice de claridad se obtuvo una absorptancia promedio  $\alpha = 0,687 \pm 0,039 (1\sigma)$  para el conjunto total; por cielo: despejado  $0,679 \pm 0,041$ , parcialmente cubierto  $0,688 \pm 0,037$ , y cubierto  $0,700 \pm 0,031$ . Las diferencias entre mediana y promedio recortado fueron  $< 0,002$ . Los resultados se encuentran dentro de rangos reportados y proveen un valor reproducible en condiciones reales, útil para simulaciones energéticas y evaluación de estrategias pasivas en vivienda social.

**Palabras clave:** Techo metálico ondulado, absorptancia solar, medición en campo, estadística robusta, vivienda social.

### INTRODUCCIÓN

En regiones de clima cálido o templado-húmedo como el litoral norte de Uruguay, los techos metálicos representan una de las principales fuentes de ganancia térmica en edificaciones de interés social. Este fenómeno se debe a su elevada absorptancia solar y baja inercia térmica, que favorecen un rápido calentamiento durante las horas de mayor radiación solar. En contextos de vulnerabilidad energética, donde el acondicionamiento térmico activo no siempre está disponible, esta ganancia puede impactar significativamente en el confort térmico y la salud de los ocupantes.

La absorptancia solar de las superficies es un parámetro clave para estimar las ganancias de calor por radiación directa y difusa. Si bien existen valores tabulados para materiales genéricos y mediciones en laboratorio bajo condiciones controladas, estas no siempre reflejan adecuadamente el comportamiento real de la superficie, expuestas a condiciones meteorológicas variables o con geometrías complejas como las ondulaciones típicas de los techos metálicos galvanizados.

Diversos estudios han abordado la caracterización óptica de materiales de cubierta mediante mediciones espectrales o de reflectancia hemisférica. Levinson et al. (2010); Sleiman et al. (2011), destacan la influencia del envejecimiento, la suciedad y la humedad sobre la absorptancia y reflectancia solar de



techos pintados y no pintados, reportando variaciones significativas respecto a condiciones de laboratorio. Otros trabajos, como los de Paolini et al. (2014); Piselli et al. (2018), han utilizado métodos en campo para evaluar techos en condiciones reales, relacionando sus propiedades ópticas con el desempeño térmico del edificio, aunque centrados en coberturas de tipo techo frío o superficies planas.

Los estudios que abordan la absorptancia solar de techos metálicos en condiciones reales aún son escasos en América Latina. A nivel internacional, Yoochareon et al. (2024) propusieron un enfoque experimental sobre techos metálicos corrugados en Tailandia, aunque sin incorporar un tratamiento estadístico robusto para reflejos especulares ni una caracterización detallada bajo distintas condiciones de cielo. En Estados Unidos, Parker et al. (2002), han instrumentado techos metálicos en contextos reales, centrando el análisis en el desempeño térmico general más que en la determinación precisa de la absorptancia. Por su parte, algunos reglamentos técnicos constructivos en Brasil RGSA incluyen valores tabulados de propiedades ópticas sin sustento experimental detallado.

Se han reportado valores de absorptancia solar para cubiertas metálicas en condiciones reales. Piselli et al. (2018) reportaron valores entre 0,61 y 0,75 para techos metálicos pintados expuestos al clima mediterráneo. Yoochareon et al. (2024), en su estudio sobre cubiertas metálicas corrugadas en Tailandia, observaron valores promedio cercanos a 0,65 para superficies nuevas, con incrementos de hasta un 10 % tras pocos meses de exposición. Paolini et al. (2014); Colon et al. (2021) han trabajado sobre la caracterización energética de viviendas con techos metálicos, asumiendo valores tabulados entre 0,6 y 0,8 según el tipo de acabado y exposición. Sin embargo, estos valores no surgen de mediciones directas, y en general no consideran reflexiones especulares ni dispersión angular del flujo reflejado.

La falta de datos experimentales en condiciones reales, considerando factores como la acumulación de polvo, humedad o envejecimiento, limita la capacidad de modelar con precisión el comportamiento térmico de techos metálicos en viviendas reales. Por otro lado, el uso de superficies con geometrías irregulares, como las chapas onduladas, introduce desafíos adicionales en la medición debido a las reflexiones especulares y la heterogeneidad espacial del flujo reflejado.

Este trabajo tiene por objetivo desarrollar y validar una metodología experimental robusta para determinar la absorptancia solar efectiva de techos metálicos ondulados en condiciones reales de operación. Dicha metodología fue ensayada con una chapa galvanizada, instalada algo más de un año antes del período de medición. Este aspecto es relevante, ya que la absorptancia solar de superficies metálicas puede variar sensiblemente con el tiempo de exposición debido a procesos como oxidación, acumulación de polvo o humedad (Levinson et al., 2010; Paolini et al., 2014; Piselli et al., 2018). Evaluar una superficie con bajo grado de envejecimiento permite obtener un valor representativo del comportamiento inicial del material en condiciones reales. Se propone un sistema de medición basado en múltiples sensores de radiación instalados sobre una superficie de chapa galvanizada típica, evaluando la fracción de radiación reflejada en campo abierto durante un periodo mayor a 50 días. Se incluyen criterios de filtrado para distintas condiciones de cielo y análisis estadísticos orientados a reducir el sesgo por reflexiones especulares. Los resultados obtenidos permitirán mejorar la representación de estos materiales en simulaciones energéticas y evaluar estrategias de mitigación pasiva en viviendas sociales.

## **EQUIPOS Y MÉTODO EXPERIMENTAL**

### ***Sitio experimental***

El experimento se llevó a cabo en el predio del Laboratorio de Energía Solar de la Universidad de la República, ubicado en  $-31,283^\circ$ ,  $-57,918^\circ$ , en la región litoral norte de Uruguay. Esta zona presenta un clima subtropical húmedo. Las mediciones se realizaron durante el invierno (junio y julio), con días despejados, parcialmente nublados y cubiertos, lo que permitió aplicar filtros de clasificación por condiciones de cielo.

### ***Instrumentación y diseño experimental***

Para la adquisición de datos se emplearon radiómetros LICOR LI-200 (LI-COR Biosciences, 2017), utilizados para la medición de la irradiancia global en plano horizontal (GHI). Este sensor es

ampliamente utilizado en estudios de radiación solar, tienen respuesta espectral entre 400–1100 nm, pero están calibrados frente a piranómetros térmicos de referencia internacional para estimar GHI. Se eligieron por su tamaño reducido y robustez, que permiten el montaje cercano y en orientación hacia abajo, lo cual sería impracticable con piranómetros térmicos que además presentan errores convectivos significativos fuera de la horizontalidad. Estas características hacen a los LI-200 especialmente adecuados para estimar radiación reflejada sobre superficies corrugadas. La precisión típica es de  $\pm 5\%$ . Para el registro de datos se utiliza un DataTaker DT80, responsable del registro automático de las señales provenientes de los radiómetros, la medida se realiza cada 20 segundos y se registra el promedio minutal. Este equipo permite registrar múltiples canales en paralelo, asegurando la simultaneidad de las mediciones.

Con el objetivo de garantizar que las mediciones reflejaran de forma representativa la radiación reflejada por una superficie metálica ondulada, típica de chapas usadas en techos de viviendas sociales o familiares en Uruguay, se utilizan varios radiómetros como se muestra en la Figura 1.



*Figura 1: Arreglo experimental: siete LI-200 orientados hacia abajo, separados 3 cm y montados a 30 cm sobre la chapa; la línea de sensores cruza de cresta a cresta. Dos chapas de 1 m en continuidad aseguran que el campo de visión esté dominado por la propia superficie.*

Se utilizó un conjunto de siete radiómetros LICOR orientados hacia abajo y dispuestos en línea sobre la superficie de chapa galvanizada, perpendicular a la dirección de las ondulaciones. Este diseño buscó reducir el sesgo causado por reflexiones especulares localizadas, generadas más que nada por las paredes de las ondulaciones, de esta forma se obtiene la radiación de diferentes posiciones relativas a las crestas y valles del perfil metálico. Las ondulaciones se disponen en dirección Norte - Sur y la línea de radiómetros se centra en la chapa en dirección Este - Oeste. Además se utiliza un sensor adicional, ubicado en la misma estructura pero orientado hacia arriba, este registró la irradiancia global incidente (GHI) sobre un plano horizontal, utilizado como base para el cálculo de la absortancia. Los datos se registraron de manera continua durante 50 días entre junio y julio de 2025, abarcando diferentes condiciones de cielo.

### ***Geometría del arreglo y cobertura espacial***

El arreglo de sensores reflejados se montó a una altura de  $h = 0,30$  m respecto al plano de la chapa y centrado en su ancho. Se utilizaron dos chapas galvanizadas con algo más de un año a la intemperie de 1 m de ancho colocadas en continuidad, de modo que el área vista por los sensores quedó dominada por la propia superficie metálica. Los siete radiómetros LI-200 orientados hacia abajo se dispusieron en línea perpendicular a las ondulaciones, con separación centro-centro de 3 cm (de difusor a difusor), cubriendo transversalmente de principio de una cresta a principio de la cresta consecutiva (como se indica en la Figura 1) en la canaleta central de la unión de las chapas. Esta configuración asegura un muestreo espacial representativo de crestas, paredes y valles de la chapa, y reduce el sesgo por reflexiones especulares localizadas. La distancia al plano ( $h$ ) y la posición centrada minimizan la



contribución de bordes; cualquier remanente del entorno es simétrico y se atenúa adicionalmente al aplicar la estadística robusta (mediana / promedio recortado) en el conjunto de sensores. En la sección Apéndice se detallan los cálculos que justifican esta hipótesis.

### Procesamiento de datos

El cálculo de la absorptancia solar instantánea,  $\alpha$ , se realizó según la siguiente expresión, basada en el balance de radiación global propuesto por Duffie y Beckman (2006):

$$\alpha = 1 - \frac{G_{ref}}{G_{inc}} \quad (1)$$

donde  $G_{inc}$  es la irradiancia global incidente en la superficie de la chapa, medida por el sensor orientado hacia el cielo, y  $G_{ref}$  es la irradiancia global reflejada por la superficie de la chapa estimada a partir del arreglo de sensores.

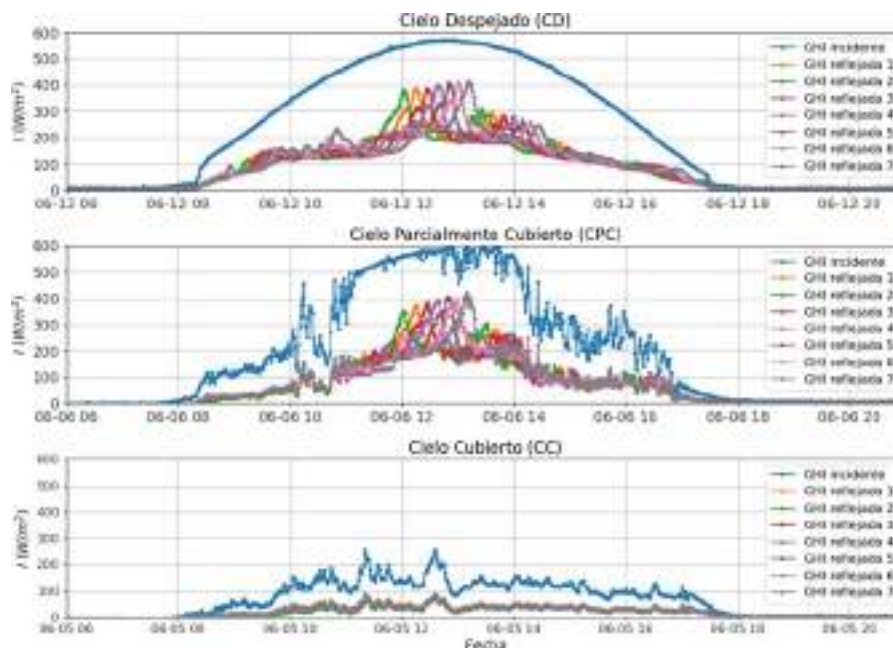


Figura 2: Irradiancia solar incidente y reflejada para tres días de la serie con diferentes condiciones de cielo, de arriba hacia abajo: Cielo Despejado (CD), Cielo Parcialmente Cubierto (CPC) y Cielo Cubierto (CC)

La Figura 2 muestra la evolución temporal de la irradiancia solar incidente en plano horizontal y las 7 irradiancias solares reflejadas para tres condiciones de cielo diferentes. Como se puede observar existe bastante dispersión en la irradiancia reflejada debido a las reflexiones de las irregularidades superficiales de la chapa. Este fenómeno se manifiesta con más intensidad los días de cielo despejado o parcialmente despejado cuando la irradiancia directa es significativa. Para obtener un valor representativo de  $G_{ref}$ , se aplicaron métodos estadísticos robustos que reducen la influencia de picos especulares en el espacio de la irradiancia reflejada: mediana y promedio recortado.

Para trabajar con datos de calidad en el espacio de las irradiancias se suelen aplicar filtros, para este trabajo se aplican los siguientes:

- Filtro 1: Irradiancia incidente  $> 100 \text{ W/m}^2$ , para evitar sesgos por condiciones de baja radiación, pero captar datos en días de cielo cubierto.
- Filtro 2: Ángulo cenital solar  $\theta_z < 75^\circ$  (es decir, altura solar mayor a  $> 15^\circ$  respecto al horizonte), para evitar datos con Sol muy bajo.

- Filtro 3: Descarte de registros con alta dispersión espacial (desviación estándar de la radiación reflejada entre sensores  $\sigma_{ref} > 20 \text{ W/m}^2$ ), indicadora de reflexiones especulares extremas o perturbaciones en la superficie.

Sea  $R_j(t)$  la irradiancia reflejada medida por el sensor  $j$  en el minuto  $t$  ( $j = 1, \dots, 7$ ). Ordenamos  $R_{(1)}(t) \leq R_{(2)}(t) \leq \dots \leq R_{(7)}(t)$  y definimos el conjunto recortado  $S_t = \{R_{(2)}(t), \dots, R_{(6)}(t)\}$ , excluyendo el mínimo y el máximo. La media recortada es:

$$R_{trim}(t) = \frac{1}{5} \sum_{i=2}^6 R_{(i)}(t), \quad (2)$$

y la dispersión espacial utilizada en el filtro es la desviación estándar del conjunto recortado:

$$\sigma_{ref}(t) = \sqrt{\frac{1}{4} \sum_{i=2}^6 \left( R_{(i)}(t) - \bar{R}_{trim}(t) \right)^2}. \quad (3)$$

Se descartan los minutos con  $\sigma_{ref}(t) > 20 \text{ W/m}^2$ , por asociarse a reflejos especulares intensos o perturbaciones locales de la superficie.

En la Tabla 1 se muestran los datos descartados por cada filtro, donde el caso cero son los 73 485 datos minutales tomados en toda la campaña. Se puede observar que el 18,2 % de los datos pasan todos los filtros, y sobre ellos se trabaja a continuación.

*Tabla 1: Resumen de registros filtrados. Se indica la cantidad de datos que cumplen cada condición individual y el subconjunto que cumple todas simultáneamente*

| Filtro      | Condición                         | Registros | Porcentaje (%) |
|-------------|-----------------------------------|-----------|----------------|
| Filtro 1    | $G_{inc} > 100 \text{ W/m}^2$     | 22 113    | 30,1 %         |
| Filtro 2    | $\theta_z < 75^\circ$             | 22 275    | 30,3 %         |
| Filtro 3    | $\sigma_{ref} < 20 \text{ W/m}^2$ | 44 943    | 61,2 %         |
| Combinación | Cumplen los tres filtros          | 13 379    | 18,2 %         |

Los datos considerados buenos son clasificados por condiciones de cielo mediante el índice de claridad,  $k_t = \frac{G_{HI}}{G_{oh}}$ , donde  $G_{oh}$  es la irradiancia horizontal a tope de atmósfera.

- Cielo Despejado (CD):  $k_t > 0,55$
- Cielo Parcialmente Cubierto (CPC):  $k_t \geq 0,30$  y  $k_t \leq 0,55$
- Cielo Cubierto (CC):  $k_t < 0,30$

*Tabla 2: Distribución de registros por condición de cielo para el conjunto filtrado y porcentajes de datos con el mismo conjunto de filtros aplicado al año meteorológico típico de Salto*

| Cielo                       | Registros     | Porcentaje (%) | AMTUsa (%)     |
|-----------------------------|---------------|----------------|----------------|
| Despejado (CD)              | 7 139         | 53,4 %         | 55,6 %         |
| Parcialmente cubierto (CPC) | 2 493         | 18,6 %         | 23,5 %         |
| Cubierto (CC)               | 3 747         | 28,0 %         | 20,9 %         |
| <b>Todo tipo cielo (TC)</b> | <b>13 379</b> | <b>100,0 %</b> | <b>100,0 %</b> |

En la Tabla 2 se muestran las cantidades y porcentajes de datos válidos que caen en cada tipo de cielo y en la última columna se muestran los datos del año meteorológico típico de Salto AMTUsa (Alonso-

Suárez et al., 2024). Se puede observar que las condiciones de cielo del ensayo son bastante representativas del AMTUsa.

Para reducir el efecto de reflexiones especulares puntuales y obtener una estimación representativa de la radiación reflejada en cada minuto  $t$ , aplicamos un promedio recortado (trimmed mean) en la dimensión espacial (entre sensores). Sea  $G_{ref,j}(t)$  la lectura del sensor  $j$  ( $j = 1, \dots, n$ ) y sea  $G_{ref,(1)}(t) \leq \dots \leq G_{ref,(n)}(t)$  el conjunto ordenado. Definimos como en la Ec. (2), pero de forma genérica:

$$\bar{G}_{ref}^{(p)}(t) = \frac{1}{n-2k} \sum_{i=k+1}^{n-k} G_{ref,(i)}(t) \quad (4)$$

donde  $n$  es el número de sensores (en nuestro caso,  $n = 7$ ),  $p \in [0, 0.5)$  es la fracción a recortar,  $k = [pn]$  es la cantidad de valores descartados en cada extremo, e  $i$  recorre los índices del conjunto ordenado que se promedian tras descartar los  $k$  mínimos y  $k$  máximos.

En el caso de estudio utilizamos  $k = 1$  (esto es,  $p \approx 1/7 \approx 0.14$ ), por lo que la expresión se reduce a

$$\bar{G}_{ref}^{trim}(t) = \frac{1}{5} \sum_{i=2}^6 G_{ref,(i)}(t) \quad (n = 7, k = 1) \quad (5)$$

Se estimó  $G_{ref}$  como la mediana entre los siete sensores orientados hacia abajo:

$$\tilde{G}_{ref} = \begin{cases} G_{ref,(\frac{n+1}{2})} \\ \frac{G_{ref,(\frac{n}{2})} + G_{ref,(\frac{n}{2}+1)}}{2} \end{cases} \quad (6)$$

Posteriormente se realizan comparaciones a nivel de absortancias entre ambos métodos estadísticos y para todas las condiciones de cielo.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 3 se presenta la distribución de la absortancia solar  $\alpha$  calculada a partir de los datos filtrados, considerando todo tipo de cielo. Se muestran los resultados obtenidos mediante el promedio recortado y la mediana en ventanas espaciales, con un binado de 40 clases y un rango de  $\alpha$  entre 0.50 y 0.80. Ambos métodos presentan distribuciones similares, con ligeras diferencias en la concentración de valores centrales.

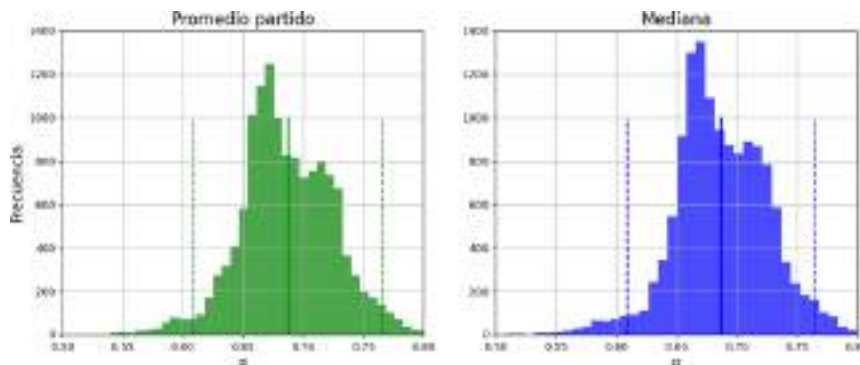


Figura 3: Distribución de la absortancia solar para todo tipo de cielo (TC), calculada con (izquierda) promedio recortado y (derecha) mediana

### Distribución por condiciones de cielo

En la Figura 4 se muestran las distribuciones de  $\alpha$  segmentadas según las condiciones de cielo (despejado, cubierto y parcialmente cubierto) y según el método estadístico aplicado. En todos los casos se mantienen los rangos generales observados para el conjunto total de datos, aunque las distribuciones presentan variaciones en su asimetría y dispersión dependiendo del tipo de cielo. En particular, los cielos despejados concentran valores ligeramente menores de  $\alpha$  en comparación con los cielos cubiertos.

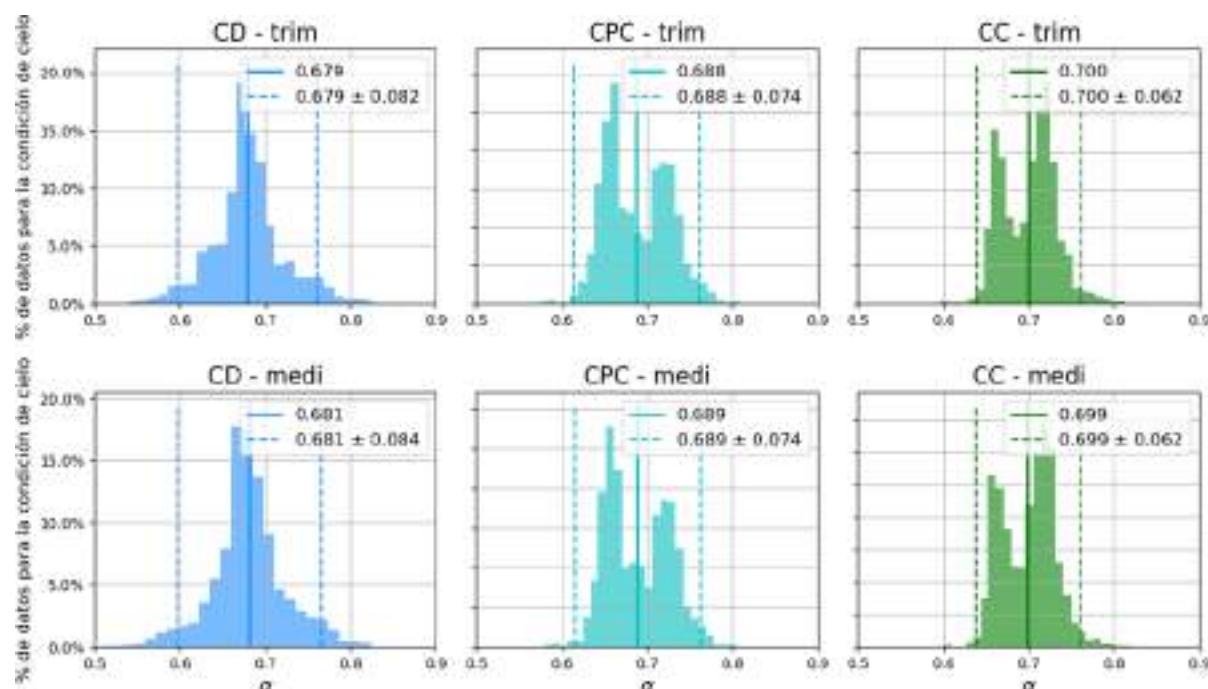


Figura 4: Distribución de la absorptancia solar segmentada por condiciones de cielo. Arriba: promedio recortado (trim), abajo: mediana (medi)

### Comparativa de métodos

La Figura 5 presenta una serie temporal de irradiancia solar e incidente para varios días que abarcan cada condición de cielo, allí se muestran las estimaciones de irradiancia reflejadas obtenidas mediante el promedio recortado y la mediana.

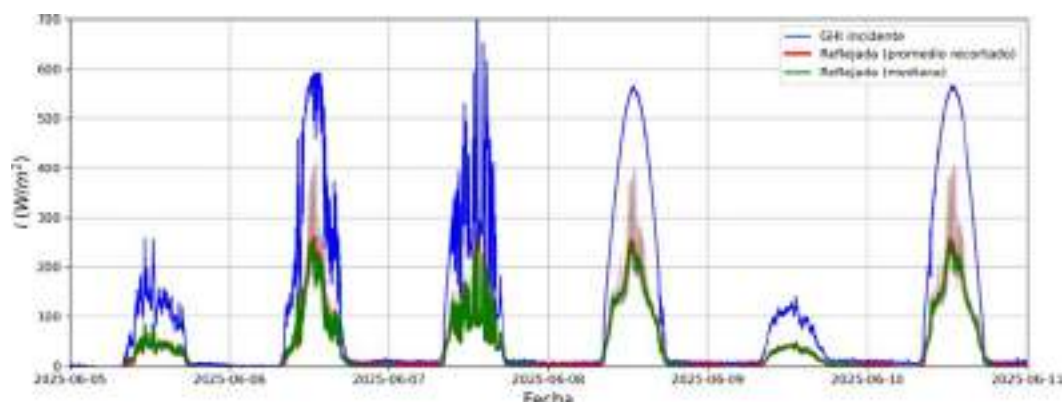


Figura 5: Comparación de los valores de irradiancia incidente y reflejados obtenidos con promedio recortado y mediana para una serie temporal que abarca días en cada condición de cielo

En la Tabla 3 se resumen los valores de  $\mu$  y  $\sigma$  (promedio y desviación estándar respectivamente) de cada combinación de método y condición de cielo. Las diferencias entre ambos métodos son reducidas, aunque la mediana tiende a ser ligeramente más robusta frente a valores atípicos, mostrando desviaciones estándar marginalmente menores.

Tabla 3: Valores promedio ( $\mu$ ) y desviación estándar ( $\sigma$ ) de la absorptancia ( $\alpha$ ) para cada condición de cielo, calculados mediante promedio recortado ( $\alpha_{trim}$ ) y mediana ( $\alpha_{medi}$ )

| Condición de cielo | $\mu_{trim}$ | $\sigma_{trim}$ | $\mu_{medi}$ | $\sigma_{medi}$ |
|--------------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|
| CD                 | 0,679        | 0,041           | 0,681        | 0,042           |
| CPC                | 0,688        | 0,037           | 0,689        | 0,037           |
| CC                 | 0,700        | 0,031           | 0,699        | 0,031           |
| TC                 | 0,687        | 0,039           | 0,687        | 0,039           |

### Estimación de la incertidumbre

La absorptancia instantánea se calcula como en la Ec. (1). Su incertidumbre, asumiendo no correlación entre canales, se obtiene por propagación:

$$u^2(\alpha) = \left(\frac{\partial \alpha}{\partial G_{ref}}\right)^2 u^2(G_{ref}) + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial G_{inc}}\right)^2 u^2(G_{inc}) = \left(\frac{1}{G_{ref}}\right)^2 u^2(G_{ref}) + \left(\frac{G_{ref}}{G_{inc}^2}\right)^2 u^2(G_{inc}) \quad (7)$$

La Ec. (7) propaga las incertidumbres estándar de entrada. Para cada magnitud usamos

$$u^2(G) = u_A^2(G) + u_B^2(G) \quad (8)$$

donde  $u_A$  es la componente estadística (repetibilidad) y  $u_B$  agrupa efectos instrumentales/sistemáticos (calibración, respuesta espectral, coseno, alineación, linealidad).

A continuación, se analizarán las incertidumbres de la radiación reflejada y de la incidente.

Reflejada (7 sensores, estimador robusto). Sea  $\{g_j\}_{j=1}^7$  el conjunto de lecturas en el mismo minuto. Definimos la dispersión espacial  $s_{esp} = \text{std}(\{g_j\})$  tras el filtrado. Para la mediana:

$$u_A(G_{ref}) \approx \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{s_{esp}}{\sqrt{7}} \quad (9)$$

Para el promedio recortado con  $k$  valores por extremo (aquí  $k = 1 \Rightarrow n_{ef} = 7 - 2k = 5$ ), usando la varianza winsorizada  $s_W$ :

$$u_A(G_{ref}) \approx \frac{s_W}{\sqrt{n_{ef}}} \quad (10)$$

La componente  $u_B$  puede tomarse, en primera aproximación, como la incertidumbre relativa de calibración del LI-200 ( $\approx 5\%$ ) aplicada a  $G_{ref}$ . *Nota:* al usar el mismo tipo de sensor para  $G_{inc}$  y  $G_{ref}$ , parte del sesgo espectral/coseno se correlaciona y tiende a cancelarse en el cociente; aquí lo ignoramos para ser conservadores.

Incidente (1 sensor, promedio minatural). Si el datalogger promedia  $m = 3$  muestras,

$$u_A(G_{inc}) \approx \frac{s_t}{\sqrt{m}} \quad (11)$$

con  $s_t$  la desviación de las muestras en ese minuto (este término suele ser pequeño frente a la calibración). Para  $u_B$ , usamos la incertidumbre relativa de calibración ( $\approx 5\%$ ).

Sustituyendo  $u(G_{ref})$  y  $u(G_{inc})$  así definidos en la Ec. (7), se obtiene la incertidumbre combinada  $u(\alpha)$  de cada instante. Con valores típicos de mediodía ( $G_{inc} \approx 600 \text{ W/m}^2$ ,  $G_{ref} \approx 186 \text{ W/m}^2$ ) y  $5\%$  de calibración, el orden de magnitud resulta  $u(\alpha) \sim 0,02 - 0,03$ , dominado por la incertidumbre de  $G_{inc}$ . Dado que la desviación estándar  $\sigma$  del histograma es mayor a la incertidumbre combinada, se optó por presentar los resultados (Tabla 3) con el valor de  $\sigma$ .

La respuesta espectral del LI-200 (400 – 1100 nm), la corrección coseno y el montaje experimental cercano a la chapa pueden introducir sesgos (error sistemático) de algunos puntos porcentuales. Por lo tanto, el valor reportado corresponde a una absorptancia efectiva en condiciones reales.

### **Agua superficial (lluvia/rocío).**

La cubierta ensayada tiene una pendiente muy baja, por lo que tras eventos de lluvia o formación de rocío se retiene agua en forma de película y pequeños empozamientos en los valles de la ondulación. Esta condición modifica la distribución angular de la reflectancia (suaviza la micro-rugosidad y aumenta la componente especular), elevando  $G_{ref}$  y sesgando la absorptancia hacia valores menores. A primer orden puede modelarse como una mezcla de fracciones seca y húmeda sobre el campo de visión del sensor:

$$G_{ref}(t) = G_{inc}(t)[(1 - \phi_w(t))\rho_{dry} + \phi_w(t)\rho_{wet}]; \alpha_{eff}(t) = 1 - [(1 - \phi_w)\rho_{dry} + \phi_w\rho_{wet}], \quad (12)$$

donde  $\phi_w(t)$  es la fracción superficial húmeda en el minuto  $t$  y, típicamente,  $\rho_{wet} > \rho_{dry}$  (con  $\rho_{wet}$  y  $\rho_{dry}$  reflectancias secas y húmedas de la chapa respectivamente). Cuando  $\phi_w$  varía entre posiciones (algunos sensores ven zonas húmedas y otros secas), la mezcla genera distribuciones mezcladas de  $\alpha$ , lo que se manifiesta en los doble picos observados en los histogramas de cielos cubierto y parcialmente cubierto (Fig. 4). En esta campaña no se aplicó un filtro específico de humedad superficial; el efecto se atenúa parcialmente mediante el criterio de dispersión espacial  $\sigma_{ref}$  y los estimadores robustos (mediana/promedio recortado), pero constituye una fuente adicional de sesgo dentro de  $u_B$ .

Mitigación futura: (i) etiquetar y excluir las primeras horas posteriores a precipitación o con humedad relativa  $> 90 \%$  y baja irradiancia (p. ej.,  $GHI < 150 \text{ W/m}^2$ ), (ii) incorporar un sensor de registro de precipitación para definir una ventana de secado (4 – 6 h), y (iii) aumentar levemente la pendiente o prever drenajes para reducir empozamientos.

## **DISCUSIÓN**

Los valores obtenidos muestran que la absorptancia efectiva de la chapa galvanizada ondulada se concentra en 0,50 – 0,80, con media global  $\alpha = 0,687$  y dispersión 0,039 ( $1\sigma$ ) para el conjunto filtrado. Se observa una diferencia sistemática por condición de cielo:  $CD (0,679) < CPC (0,688) < CC (0,700)$ . Bajo cielo despejado la componente directa potencia máximos especulares que elevan  $G_{ref}$  y reducen  $\alpha$ ; en cielo cubierto predomina una distribución angular más difusa, con menor contribución especular y ligera elevación de  $\alpha$ . Es importante hacer notar que las medidas fueron tomadas en junio-julio. Si bien en meses de verano con el Sol más elevado podría haber un cambio en la absorptancia solar por menores ángulos de incidencia de la irradiancia directa, nuestra experiencia en medidas previas, mientras se probaban metodologías para la implementación del experimento, nos mostraron que la variación por ángulo de incidencia es mínima. En la campaña de medidas se obtuvieron datos en todas condiciones de cielo, logrando una buena representatividad en las condiciones de nubosidad típicas del clima de Salto.

La comparación entre estimadores robustos (mediana vs. promedio recortado) arroja medias indistinguibles ( $< 0,002$ ) y desviaciones estándar muy similares, por lo que la mediana resulta una elección adecuada por simplicidad y resistencia a valores atípicos.

En relación con la bibliografía (Levinson et al., 2010; Paolini et al., 2014; Parker et al., 2002; Piselli et al., 2018; Sleiman et al., 2011; Yoochareon et al., 2024), los resultados se sitúan dentro de los rangos reportados para techos metálicos expuestos, lo que respalda la validez del enfoque en campo. Para su uso en simulaciones de viviendas, recomendamos parametrizar la cubierta con absorptancia solar = 0,69 (valor medio del conjunto). Si se requiere un análisis de sensibilidad, se sugiere emplear el intervalo ( $\mu \pm 2\sigma$ ) el cual asegura una cobertura del 95,4 % de los valores, es decir (0,61 – 0,77). De forma opcional, y cuando el caso de estudio lo amerite, pueden usarse dicho criterio de intervalo ( $\mu \pm 2\sigma$ ) para cada una de las condiciones de cielo:  $CD (0,597 - 0,761)$ ,  $CPC (0,614 - 0,762)$  y  $CC (0,638 - 0,762)$ . Estos rangos reflejan únicamente la variabilidad observada en las mediciones (y su incertidumbre asociada), sin extrapolar a escenarios de envejecimiento, suciedad u oxidación no cubiertos por esta campaña. Dado que estos factores pueden modificar la absorptancia, se seguirán realizando campañas de medición para

evaluar su evolución temporal. El valor obtenido es algo mayor a la absorptancia de la literatura para chapas galvanizadas mencionada en la introducción; por ende, significa que una vivienda con dicha chapa como techo, tendrá mayor absorptancia solar, y por ende más necesidad de refrigeración en verano y menos de calefacción en invierno que lo que daría una simulación con el valor de absorptancia antes mencionado.

No se dispuso de sensores de lluvia ni humedad relativa, por lo que no fue posible filtrar datos de chapa mojada (lluvia o rocío). Esto genera un pequeño corrimiento de algunos registros a valores menores; sin embargo, al considerarse toda la distribución de datos, estos posibles desvíos quedan incluidos en la incertidumbre reportada.

## CONCLUSIONES

Este trabajo presentó una metodología en campo y de bajo costo para estimar la absorptancia solar efectiva de chapas galvanizadas onduladas bajo condiciones reales de cielo. El uso conjunto de un arreglo de siete radiómetros orientados hacia abajo, filtros físicos ( $GHI > 100 \text{ W/m}^2$ ,  $\theta_z < 75^\circ$ ,  $\sigma_{\text{ref}} < 20 \text{ W/m}^2$ ) y estadística robusta (mediana y promedio recortado) permitió mitigar la influencia de reflexiones especulares y de la heterogeneidad espacial asociada a la geometría corrugada. Con 13 379 registros válidos, se obtuvo una absorptancia promedio para el conjunto de datos de  $\alpha = 0,687 \pm 0,039$  ( $1\sigma$ ). Por condición de cielo, los valores fueron: Cielo Despejado (CD)  $0,679 \pm 0,041$ , Cielo Parcialmente Cubierto (CPC)  $0,688 \pm 0,037$  y Cielo Cubierto (CC)  $0,700 \pm 0,031$ , lo que sugiere una leve dependencia angular/hemisférica: la presencia de componente directa intensa tiende a incrementar la reflejada y reducir  $\alpha$ .

La geometría del montaje (altura de 0,30 m, línea de sensores con separación de 3 cm cubriendo de cresta a cresta, y dos chapas de 1 m en continuidad) contribuyó a que el campo de visión estuviera dominado por la propia superficie metálica y a que la contribución de bordes fuera simétrica y reducida. En este sentido, el valor reportado debe interpretarse como absorptancia efectiva en condiciones reales, adecuada para simulaciones y evaluaciones de desempeño térmico de viviendas sociales.

Los resultados se ubican dentro de los rangos reportados para techos metálicos expuestos y son directamente aplicables en modelos energéticos. Como trabajo futuro, se propone profundizar la trazabilidad metrológica con piranómetros espectralmente planos (300 – 3000 nm), explorar explícitamente la dependencia con el ángulo cenital y el envejecimiento (campañas estacionales).

Existen escasos estudios previos sobre techos metálicos en climas húmedos en la región, por lo que este trabajo contribuye a cubrir esa brecha.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Francisco Guimaraens, técnico del Laboratorio de Energía Solar (LES, Universidad de la República), por su apoyo en el diseño y montaje del arreglo experimental, así como en la instalación y mantenimiento durante la campaña de medición. Agradecemos también a Gonzalo Abal (LES, Universidad de la República) por sus comentarios y discusiones, que ayudaron a aclarar aspectos de la instrumentación y del análisis de los datos. Cualquier error remanente es responsabilidad exclusiva de los autores.

## REFERENCIAS

- Alonso-Suárez, R., Abal, G., Righini, R., Nollas, F. M., Ramos-Martins, F., de Castro Vilela, O., Figueiredo, G., Wolfram, E., Laguarda, A., Lell, J., et al. (2024). Recomendaciones y Buenas Prácticas para la Medición y Registro de la Radiación Solar en Territorio.
- Colón, C., Colon-Serrano, J., et al. (2021). Cool roofs for community resilience: Performance of reflective coatings in a tropical climate. *Energy and Buildings*, 253, 111530. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111530>
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2006). *Solar Engineering of Thermal Processes* (3rd). Wiley.



- Levinson, R., Berdahl, P., & Akbari, H. (2010). Solar spectral optical properties of pigments - Part II: Survey of common colorants. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 94(6), 1179-1189. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2010.02.017>
- LI-COR Biosciences. (2017). *LI-COR LI-200 Pyranometer Sensor Specifications* [Accessed: 2025-08-07]. <https://www.licor.com/documents/zde8po3ze1yc1lvtvv01>
- Paolini, R., Zinzi, M., Poli, T., Hofer, P., & Scrosati, C. (2014). Effect of cool roofs on ambient temperature and urban heat island in Rome: Analysis of local scale measurements. *Sustainable Cities and Society*, 13, 82-89. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2014.04.004>
- Parker, D. S., Sonne, J. K., Sherwin, J. R., & Moyer, N. (2002). Comparative evaluation of the impact of roofing systems on residential cooling energy demand in Florida. *Proceedings of the 2002 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings*, 1, 219.
- Piselli, C., Castaldo, V. L., Cotana, F., & Pisello, A. L. (2018). Outdoor experimental analysis for passive cooling effect of cool roof coating on building energy performance and thermal comfort in summer conditions. *Building and Environment*, 136, 142-151. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.03.052>
- Sleiman, M., Destailats, H., Sullivan, D. P., Cohn, S., Lunden, M. M., Russell, M. L., Fisk, W. J., Fatehifar, E., & Nazaroff, W. W. (2011). Emissions of reactive oxygen species from commercial and residential building materials. *Atmospheric Environment*, 45(15), 2758-2765. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.02.021>
- Yoochareon, T., et al. (2024). Spectral absorptance and thermal behavior of corrugated metal roofs under different sky conditions. *Journal of Building Engineering*, 84. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.106359>

## APÉNDICE. HUELLA DE VISIÓN EFECTIVA DEL SENSOR

### Planteo.

Para justificar que el campo de visión del arreglo de sensores es predominantemente de las chapas, estimamos el radio efectivo sobre el plano de la chapa que concentra una fracción  $p$  de la señal registrada. Suponemos (i) respuesta coseno del sensor con ángulo de aceptación  $\theta_{\text{máx}}$ , y (ii) campo difuso aproximadamente isotrópico en la vecindad de la normal local. Con el sensor a altura  $h$  sobre el plano, los rayos que llegan con ángulo  $\theta$  (desde la normal del sensor) intersectan el plano en un radio:

$$r(\theta) = h \tan(\theta)$$

Bajo radiancia constante  $L$  y respuesta coseno, la irradiancia recogida hasta  $\theta$  vale:

$$E(\leq \theta) = \int_0^{2\pi} \int_0^\theta L \cos \vartheta \sin \vartheta \, d\vartheta d\phi = \pi L \sin^2(\theta)$$

Normalizando por la aceptación angular del sensor, la fracción acumulada de señal proveniente del disco de radio  $R$  sobre el plano es:

$$f(R; h, \theta_{\text{max}}) = \frac{\sin^2(\min\{\arctan(R/h), \theta_{\text{max}}\})}{\sin^2 \theta_{\text{max}}} \quad (13)$$

El radio que contiene la fracción  $p$  se obtiene invirtiendo (13):

$$R_p(h, \theta_{\text{max}}) = h \tan[\arcsin(\sin \theta_{\text{max}} \sqrt{p})] \quad (14)$$

### Aplicación al montaje.

Con  $h = 0,30$  m y ángulos de aceptación típicos para sensores de silicio ( $\theta_{\text{máx}} \in [70^\circ, 85^\circ]$ ), los radios efectivos resultan:

Para un valor representativo  $\theta_{\text{máx}} = 80^\circ$ , el 50 % de la señal proviene de un radio  $\approx 0,29$  m, el 80 % de  $\approx 0,56$  m y el 95 % de  $\approx 1,03$  m. Dado que el arreglo está centrado sobre dos chapas en continuidad y el borde más cercano se ubica a 1 m, entonces  $f(R=1 \text{ m}) \approx 0,95$ : al menos un 95 % de la contribución aceptada proviene de la propia cubierta metálica, y la fracción potencial asociada a bordes/entorno queda acotada a  $\lesssim 5 - 8$  % incluso para  $\theta_{\text{máx}}$  exigentes ( $85^\circ$ ). Además, el uso de estadística robusta (mediana/promedio recortado) reduce el impacto de contribuciones angulares extremas y de eventuales reflexiones especulares.

*Tabla 4: Radios efectivos  $R_p$  (m) para  $h = 0,30$  m. Además,  $f(R=1 \text{ m})$  indica la fracción de señal contenida dentro de 1 m de radio (relevante porque el borde más próximo de la cubierta está a  $\approx 1$  m)*

| $\theta_{\text{máx}}$ | R50  | R80  | R95  | $f(R=1 \text{ m})$ |
|-----------------------|------|------|------|--------------------|
| $70^\circ$            | 0,27 | 0,47 | 0,68 | 1,00               |
| $75^\circ$            | 0,28 | 0,51 | 0,84 | 0,983              |
| $80^\circ$            | 0,29 | 0,56 | 1,03 | 0,946              |
| $85^\circ$            | 0,30 | 0,59 | 1,22 | 0,924              |

Nota. La estimación se basa en un campo difuso localmente isotrópico; ante anisotropías (p. ej., facetas de la ondulación) el peso angular puede desplazarse levemente, pero el orden de magnitud de la huella y las conclusiones respecto a bordes se mantienen.

## IN-FIELD DETERMINATION OF THE SOLAR ABSORPTANCE OF CORRUGATED METAL ROOFS: METHODOLOGY AND RESULTS

**ABSTRACT** Laboratory values or tables are commonly used to estimate the solar absorptance of corrugated metal roofs, which may not represent real surfaces under variable sky conditions. We present an in-field methodology to estimate the effective solar absorptance of a galvanized corrugated roof typical of Uruguayan social housing. An array of seven downward-facing LI-200 silicon sensors measured reflected irradiance while an upward-facing sensor measured global horizontal irradiance (GHI). Filters (GHI  $> 100 \text{ W/m}^2$ , zenith angle  $< 75^\circ$ , reflected dispersion  $\sigma_{\text{ref}} < 20 \text{ W/m}^2$ ) and robust statistics (median and trimmed mean) were applied to mitigate specular peaks and spatial heterogeneity. From 13,379 valid one-minute records (18.2 % of the campaign), the average absorptance was  $\alpha = 0.687 \pm 0.039$  ( $1\sigma$ ) overall; by sky condition: clear  $0.679 \pm 0.041$ , partly cloudy  $0.688 \pm 0.037$ , and overcast  $0.700 \pm 0.031$ . Differences between estimators were  $< 0.002$ . These results fall within reported ranges and provide a reproducible value under real conditions, useful for building energy simulations and the assessment of passive strategies in social housing.

**Keywords:** corrugated metal roof, solar absorptance, field measurements, robust statistics, social housing.

## APLICACIÓN DEL MÉTODO DE LA UTILIZABILIDAD EN COLECTORES SOLARES DE TUBOS EVACUADOS TIPO WATER-IN-GLASS PARA ESTIMAR SU RENDIMIENTO A LARGO PLAZO EN RÍO CUARTO

**María V. Milanesio<sup>1</sup>, Alba I. Lema<sup>1</sup>, Adrián F. Valetti<sup>2</sup>, Jorge R. Barral<sup>1</sup>, Pablo D. Galimberti<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Grupo de Energía Solar – Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de Río Cuarto

<sup>2</sup>Facultad de Ciencias Económicas – Universidad Nacional de Río Cuarto

Tel. 358-4676246 e-mail: [mmilanesio@ing.unrc.edu.ar](mailto:mmilanesio@ing.unrc.edu.ar)

**RESUMEN:** La predicción del rendimiento a largo plazo resulta fundamental para el diseño y la optimización de sistemas solares térmicos, en este contexto, el método de la utilizabilidad constituye una herramienta valiosa. El presente trabajo describe la aplicación del método de la utilizabilidad horaria y diaria a un colector solar de tubos evacuados sin almacenamiento térmico. Si bien el método requiere un nivel crítico de irradiancia constante, esta limitación se atenúa al emplearlo en sistemas de alta inercia térmica, como son los colectores tipo “water in glass”. Al integrar los parámetros de rendimiento del colector, con el método de la utilizabilidad y datos climáticos experimentales de Río Cuarto, se ofrece una estimación precisa del aporte energético a largo plazo. El trabajo describe la infraestructura utilizada, detalla la formulación matemática y presenta los resultados obtenidos; a partir del análisis de estos últimos, se ofrecen conclusiones sobre el desempeño a largo plazo del colector instalado en Río Cuarto. Las curvas de utilizabilidad obtenidas, constituyen una herramienta útil para comprender qué proporción de la energía solar incidente es realmente aprovechable en función de las condiciones de operación y el umbral de irradiancia requerido.

**Palabras clave:** utilizabilidad, evaluación energética, umbral crítico de irradiancia.

### INTRODUCCIÓN

La energía solar térmica se ha consolidado como una solución valiosa y sostenible frente a las crecientes necesidades energéticas globales, ofreciendo una alternativa limpia y renovable a las fuentes de energía convencionales (Njoku et al., 2020). En el ámbito de los sistemas térmicos solares, los colectores son componentes cruciales que captan la radiación solar y la convierten en calor útil para diversas aplicaciones, como el calentamiento de agua sanitaria, la climatización de piscinas y los sistemas de calefacción (Barral et al., 2017). La estimación precisa del desempeño de estos sistemas es imprescindible para su diseño eficiente y optimización (Karatasou et al., 2006).

Aunque los colectores de placa plana han sido históricamente los más utilizados, en los últimos años, los colectores de tubos evacuados han adquirido una presencia cada vez mayor en el mercado internacional y particularmente en Argentina (Barral et al., 2017). Su principal ventaja radica en sus bajas pérdidas de calor, tanto convectivas (debido al vacío entre la superficie absorbente y el vidrio exterior), como radiativas (gracias al uso de una superficie selectiva) (Qiu et al., 2015). Aunque inicialmente eran costosos, las mejoras en los procesos de fabricación y las economías de escala los han hecho muy competitivos frente a los colectores de placa plana tradicionales (Barral et al., 2017).

La correcta estimación del rendimiento energético de estos sistemas es esencial para optimizar su diseño y operación. En este sentido, el método de la utilizabilidad (o curva  $\phi$ ) se ha consolidado como una herramienta ampliamente reconocida en el campo de la ingeniería solar (Klein y Beckman, 1984; Armenta-Deu y De Andrés, 1991) para evaluar el rendimiento a largo plazo de colectores solares planos.



Dicho método se basa en determinar la fracción de la irradiancia solar incidente sobre la superficie del colector que excede un valor crítico (Duffie y Beckman, 2013; Karatasou et al., 2006), este valor crítico representa la irradiancia mínima necesaria para superar las pérdidas energéticas del colector, siendo la irradiancia por encima de este nivel, la porción "utilizable". El concepto fue formulado inicialmente por Whillier y posteriormente generalizado por varios autores (Kalogirou, 2024).

Una de las principales ventajas del método de la utilizabilidad es su capacidad para separar las variables climáticas de los parámetros intrínsecos del colector (Karatasou et al., 2006), facilitando la predicción de su aporte energético a largo plazo. De este modo, el método de la utilizabilidad, resulta especialmente valioso para comparar configuraciones de diseño o analizar el impacto de distintas condiciones de operación sin necesidad de recurrir a modelos excesivamente complejos.

Sin embargo, la aplicación de este método a colectores de tubos evacuados, del tipo "water-in-glass", presenta dificultades derivadas de su elevada inercia térmica, que complica la obtención de parámetros en condiciones de equilibrio (Barral et al., 2017). Además, la variabilidad instantánea de la irradiancia, especialmente en días con nubosidad, puede conducir a que las curvas de utilizabilidad horaria o diaria subestimen el rendimiento real (Suehrcke y McCormick, 1989). El uso de datos experimentales locales se plantea entonces como un recurso indispensable para superar estas limitaciones y obtener predicciones más realistas.

En la localidad de Río Cuarto, Argentina (33,09° S, 64,25° O), se han desarrollado estudios previos que aplicaron el método de la utilizabilidad a colectores solares de aire de placa plana (Pontin et al., 2012). Sin embargo, no existen suficientes antecedentes referidos a colectores de tubos evacuados tipo water-in-glass, a pesar de su creciente relevancia en el mercado regional y global.

El objetivo principal de este trabajo es aplicar el método de la utilizabilidad, integrando parámetros de rendimiento de colectores water-in-glass con datos climáticos experimentales de Río Cuarto, para estimar su capacidad de suministro de energía útil a largo plazo. De este modo, se busca contribuir al diseño, optimización y expansión del uso de esta tecnología en sistemas solares térmicos activos de la región, ofreciendo una base sólida para futuras aplicaciones e investigaciones.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

En este trabajo se aplica el método de la utilizabilidad al colector de tubos evacuados que se muestra en la figura 1, es del tipo "water in glass" y está ubicado en el Laboratorio de Energía Solar de la Universidad Nacional de Río Cuarto.

### ***Descripción del colector de agua de tubos evacuados "water in glass"***

El colector objeto de estudio, está formado por 25 tubos que se inervan en la parte superior a un cabezal de sección cuadrada. Cada tubo de 58 mm de diámetro por 1,80 m de largo, llega a contener 2,8 litros de agua, con una masa de agua de aproximadamente 70 kg cuando está en funcionamiento y está pensado para funcionar en forma activa con la impulsión de una bomba.

No posee tanque de almacenamiento, el almacenamiento es posible diseñarlo de manera independiente y no es necesario que el tanque aislado se ubique por encima de los tubos.

El colector está montado sobre una estructura soporte que lo posiciona a 45° respecto de la horizontal, que es un ángulo adecuado para esta región del país. Para una descripción más detallada, se puede consultar Barral et al., 2017.

### ***Datos Meteorológicos utilizados***

Para los cálculos de la utilizabilidad y calor útil, se utilizan datos instantáneos de irradiancia sobre el plano del colector y temperatura ambiente. Estos datos climáticos, se midieron para Río Cuarto, desde el 01 de enero de 2019 hasta el 31 de diciembre de 2022.

Los registros de temperatura ambiente, se obtuvieron mediante una estación meteorológica marca Davis Vantage Pro II, que además de la temperatura ambiente, provee registros de humedad relativa, velocidad y dirección del viento y irradiancia solar global horizontal, entre otras variables.



*Figura 1. Colector de tubos evacuados “water in glass”*

Para la medición de irradiancia solar global en el plano del colector, se utilizó además un piranómetro EKO modelo SPB-801, con una sensibilidad de 7 [mV/(kW/m<sup>2</sup>)], resistencia interna de 500  $\Omega$ , dispuesto en forma coplanar con el plano de captación del colector solar. Este instrumento se vinculó a un registrador Agilent 34970A provisto de una placa con múltiples entradas que, al conectarse a una PC, permite monitorear los valores medidos en tiempo real y acceder a los datos almacenados.

Los datos de irradiancia solar global y temperatura ambiente, se registraron cada 10 minutos, generando una base de datos de 221820 datos por cada variable, estos datos se procesaron para obtener valores medios de irradiancia sobre plano inclinado y temperatura ambiente cada 1 hora.

#### **Formulación matemática de la utilizabilidad**

El concepto de utilizabilidad se deriva directamente de la ecuación de Hottel-Whillier-Bliss (ecuación 1), que relaciona la tasa de recolección de energía útil transferida al fluido,  $\dot{q}_u$ , con los parámetros de diseño del colector  $F_R(\tau\alpha)$  y  $F_R U_L$ , y las condiciones climáticas representadas por la irradiancia solar global sobre el plano inclinado,  $I_T$ , y la temperatura ambiente,  $T_a$ , (Klein y Beckman, 1984).

$$\dot{q}_u = A \left[ F_R(\tau\alpha) I_T - F_R U_L (T_e - T_a) \right]^+ \quad (1)$$

El superíndice + se usa para indicar que solo se consideran valores positivos de la cantidad entre corchetes (en la práctica, podría usarse un controlador para prevenir la circulación del fluido siempre que la irradiancia solar no sea suficiente para superar las pérdidas térmicas del colector), mientras que los parámetros del colector  $F_R(\tau\alpha)$  y  $F_R U_L$ , se tomaron de un trabajo anterior (Barral et al., 2007).

Las variables y símbolos que intervienen en todas las ecuaciones de aquí en adelante, cuando no se describan directamente en el texto, se detallan en la sección "Nomenclatura", ubicada al final del artículo. Se ha dispuesto de este modo, con el fin de evitar una extensión innecesaria de la publicación. La ecuación (1) puede reordenarse como:

$$\dot{q}_u = AF_R (\tau\alpha) \left[ I_T - \underbrace{\frac{F_R U_L}{F_R (\tau\alpha)} (T_e - T_a)}_{I_C} \right]^+ = AF_R (\tau\alpha) [I_T - I_C]^+ \quad (2)$$

donde  $I_C$  es el nivel crítico de irradiancia definido como:

$$I_C = \frac{F_R U_L}{F_R (\tau\alpha)} (T_e - T_a) \quad (3)$$

y representa el valor de irradiancia para el cual la potencia radiante absorbida y las pérdidas son iguales, luego la potencia útil es nula. Este nivel crítico de irradiancia se encuentra estableciendo  $\dot{q}_u = 0$  en la ecuación (1):

A partir de la ecuación (2) es posible calcular  $\bar{Q}_{u-i}$ , que es la recolección de energía promedio mensual a largo plazo para un período horario específico, por ejemplo, de 10:00 a 11:00 AM en marzo. Este cálculo se realiza aproximando  $I_T$  como la irradiancia solar promedio sobre superficie inclinada durante el intervalo de tiempo  $\Delta t = 1$  hora. En este caso,

$$\bar{Q}_{u-i} = AF_R (\tau\alpha) \frac{\sum_{i=1}^N [I_T - I_C]^+ \Delta t}{N} \quad (4)$$

donde  $N$  representa un gran número de observaciones de irradiancia, suficientes para representar las condiciones promedio a largo plazo. Por ejemplo, si  $\bar{Q}_{u-i}$  es la recolección de energía promedio mensual horaria entre las 10:00 y las 11:00 AM durante el mes de marzo, y si se disponen datos cada una hora, durante 4 años, el valor de  $N$  vendrá dado por:  $N = 31 \times 4$ .

En una base horaria ( $\Delta t = 1$  hora), la utilizabilidad horaria,  $\phi$ , es una estadística que depende del nivel crítico de irradiancia, la hora del día, la ubicación y la orientación de la superficie. Se define como la fracción de la irradiancia horaria a largo plazo, que está por encima del nivel crítico y se puede expresar como:

$$\phi = \frac{\sum_{i=1}^N (I_T - I_C)^+ \Delta t}{\sum_{i=1}^N I_T \Delta t} = \frac{\sum_{i=1}^N (I_T - I_C)^+}{N \bar{I}_T} \quad (5)$$

donde  $\bar{I}_T$  es el promedio en una hora a largo plazo de la irradiancia solar global  $I_T$  y viene dada por:

$$\bar{I}_T = \frac{\sum_{i=1}^N I_T \Delta t}{\sum_{i=1}^N \Delta t} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_T \quad (6)$$

La metodología del cálculo de la utilizabilidad, presupone un régimen de operación de estado estacionario del colector, y si bien el régimen de trabajo real de un colector no es de estado estacionario debido a la fluctuación de la irradiancia solar y de la temperatura ambiente, se considera que no existen cambios bruscos en el período de una hora y se opera con valores promedio horarios mensuales de temperatura ambiente y irradiancia solar incidente sobre el plano del colector.

En términos de  $\phi$ , la ecuación (4) se convierte en:

$$\bar{Q}_{u-i} = AF_R (\tau\alpha) \bar{I}_T \phi \Delta t \quad (7)$$

Cuando se quiere considerar el nivel crítico de irradiancia como un valor constante para todas las horas del día, resulta conveniente el uso de la utilizabilidad diaria,  $\bar{\phi}$ , puede definirse como la fracción promedio mensual de la irradiancia solar por encima del nivel crítico durante el período entre el amanecer y el atardecer, o puede evaluarse utilizando la utilizabilidad horaria como un promedio ponderado por la irradiancia promedio horario de todas las horas de luz del día.

$$\bar{\phi} = \frac{\sum_{\text{horas de sol}} \bar{I}_T \phi}{\sum_{\text{horas de sol}} \bar{I}_T} \quad (8)$$

o podría evaluarse numéricamente a partir de la ecuación (8).

$$\bar{\phi} = \frac{\sum_{\text{horas de sol}} \sum_N (I_T - I_C)^+}{\sum_{\text{horas de sol}} \sum_N I_T} = \frac{\sum_{\text{horas de sol}} \sum_N (I_T - I_C)^+ \Delta t}{\bar{H}_T N} \quad (9)$$

donde  $\bar{H}_T$  es la irradiación total diaria promedio mensual sobre una superficie inclinada.

### **Curvas de utilizabilidad horaria**

Las curvas de utilizabilidad horaria ( $\phi$  vs  $X_C$ ), son representaciones gráficas que permiten predecir el rendimiento a largo plazo del sistema solar en estudio. En ordenadas se representa la utilizabilidad ( $\phi$ ), mientras que, en abscisas, se representa una relación de intensidad crítica adimensional que se define como el cociente entre la irradiancia crítica sobre plano inclinado y la irradiancia promedio horario a largo plazo, y se expresa como:

$$X_C = \frac{I_C}{\bar{I}_T} \quad (10)$$

Para calcular el nivel crítico de irradiancia horaria,  $I_C$ , se utilizó la ecuación 3, la cual requiere los parámetros de diseño del colector,  $F_R U_L$  y  $F_R (\tau\alpha)$ , la temperatura de entrada del fluido,  $T_e$ , y la temperatura ambiente promedio para esa hora,  $T_a$ . Por ejemplo, la  $T_a$ , para la hora comprendida entre las 10:00 y 11:00 AM del mes de marzo, se obtiene promediando los valores de temperatura ambiente para esa hora durante todo el mes de marzo y durante los 4 años que integran la base de datos. Por otro lado, a los fines de disponer de suficientes puntos para graficar las curvas de utilizabilidad, se computaron valores de  $T_e$ , en un rango que va desde los 15°C hasta los 95°C, variando cada 1°C, de este modo se obtienen para cada curva de utilizabilidad horaria, un total de 80 puntos (la  $T_a$  es la temperatura ambiente promedio para esa hora y permanece constante en esa hora).

Es necesario destacar que si la temperatura de entrada del fluido,  $T_e$ , es menor que la temperatura ambiente promedio horario,  $T_a$ , el  $X_C$  es menor que cero, y si bien estos resultados pueden interpretarse físicamente como que el colector está transfiriendo calor al medio ambiente, generando una utilizabilidad mayor a 1, en el presente estudio, estos resultados, se descartaron.

El procesamiento del gran caudal de datos, se realizó mediante un programa de cálculo elaborado en Excel, que permitía acceder a la resolución gráfica de las curvas de utilizabilidad para los diferentes



intervalos de una hora en cada mes, obteniéndose de este modo una curva de utilizabilidad horaria media mensual,  $\phi$  vs.  $X_C$ , para cada hora en un mes determinado.

En resumen, la obtención de las curvas de utilizabilidad horaria requiere de la determinación experimental de los parámetros característicos del colector, el cálculo de un nivel de irradiancia crítico basado en las condiciones de operación ( $T_e$ ), y la agregación de datos de irradiancia promedio horarios para determinar la fracción de potencia utilizable por encima de ese umbral. El resultado se grafica como una curva que permite una evaluación rápida del desempeño del colector.

### **Tasa de calor útil**

Para una hora y mes determinado, por ejemplo, de 10 a 11 AM en marzo, la tasa de energía útil promedio a largo plazo ( $\dot{q}_{u-i}$ ) puede expresarse como:

$$\dot{q}_{u-i} = A_c F_R (\tau\alpha) \bar{I}_T \phi \quad (11)$$

Para obtener la tasa de calor útil ( $\dot{q}_u$ ) durante un período extendido (por ejemplo, un mes) a partir de la utilizabilidad horaria, se suman las contribuciones horarias para todas las horas entre el amanecer y el atardecer, y se multiplica por el número de días ( $n$ ) en el mes:

$$\dot{q}_u = n \sum_{\substack{\text{horas} \\ \text{de sol}}} q_{u-i} \quad (12)$$

### **Parámetros del Colector. Test de Eficiencia Térmica.**

Los parámetros del colector motivo de este estudio,  $F_R U_L$  y  $F_R (\tau\alpha)$ , son características físicas primarias del colector y se tomaron de un trabajo anterior (Barral et al., 2017), en el cual se describe el ensayo realizado al colector de tubos evacuados, siguiendo las normas ANSI/ASHRAE STANDARD 93-2003.

El ensayo realizado permitió computar la eficiencia instantánea del colector,  $\eta$ , a partir de la ecuación 13, donde todos los términos que allí figuran son datos conocidos o se midieron durante el ensayo.

$$\eta = \dot{m} c_p \frac{(T_s - T_e)}{A_c I_T} \quad (13)$$

El numerador representa la potencia de calentamiento que recibe el agua al circular por el colector,  $\dot{q}_u$ , mientras que el denominador computa la potencia radiativa recibida en el plano del colector. Si bien el término  $\eta$ , indica rendimiento térmico instantáneo, para la determinación del mismo, el colector debe estar operando en estado estacionario, con el flujo másico recomendado por el fabricante, o el que establezca la norma en su defecto

Si en la ecuación (13), reemplazamos el numerador,  $\dot{q}_u$ , por lo indicado en la ecuación (1), obtenemos la ecuación (14), la cual presenta una relación lineal entre el rendimiento térmico del colector y una variable en abscisas dada por una diferencia de temperatura entre la temperatura de entrada del fluido y la temperatura ambiente, dividida por la irradiancia global incidente en el plano del colector. Por lo tanto, de acuerdo a la ecuación 13, el valor de  $F_R (\tau\alpha)$  será la ordenada al origen, mientras que  $F_R U_L$  vendrá dada por el valor de la pendiente.

$$\eta = F_R (\tau\alpha) - F_R U_L \frac{(T_e - T_a)}{I_T} \quad (14)$$

A continuación, se resume el proceso de realización del test, que permitió determinar los parámetros del colector. La descripción exhaustiva del ensayo, puede consultarse el artículo Barral et al., 2017.

El ensayo para determinar el rendimiento del colector solar de tubos evacuados, requirió un pre-acondicionamiento del sistema antes de cada medición, ya que alcanzar el estado estacionario que requiere el test, en este tipo de colectores, es un proceso lento como consecuencia de la alta inercia térmica. La mejor estrategia encontrada para alcanzar el estado estacionario, consistió en estabilizar previamente el manifold, esto implicaba hacer circular agua por el colector y mantenerlo cubierto por una media sombra hasta que las temperaturas de entrada y salida se estabilizaran con una diferencia de 1 °C. Simultáneamente, de acuerdo al punto del ensayo a determinar, se calentaba agua en un tanque de 400 litros hasta la temperatura de entrada deseada. Una vez estabilizado el colector, se retira la media sombra, y comienza a circular por el colector, el agua proveniente del tanque, en estas condiciones el agua, comienza a calentarse por efecto de la radiación solar.

Cada medición se realizó repitiendo el proceso de estabilización y verificando que las temperaturas de entrada y salida del agua, así como en el cabezal, permanezcan constantes durante unos minutos antes de registrar los datos. Con el sistema en régimen estable, se realiza la medición de la irradiancia solar global, mediante un piranómetro EKO y se registra la temperatura en la entrada y salida del manifold.

La eficiencia se calcula con la ecuación 13, donde todos los términos que allí figuran son datos conocidos o se miden durante el ensayo y luego se grafican los puntos mostrados en la figura 2, por último, mediante técnicas de regresión lineal, se obtiene la recta ajustada de la eficiencia térmica del colector de acuerdo al modelo de Hottel-Whillier-Bliss (ecuación 14) y de ésta última, el valor de los parámetros, siendo  $F_R U_L = 4,99$  (°C m<sup>2</sup>/W) y  $F_R (\tau\alpha) = 0,576$ .

Las pruebas se realizaron a razón de un punto por día al mediodía solar, de modo de poder asegurar irradiancia estable y controlando la constancia, tanto de la temperatura ambiente como la temperatura de entrada del agua.

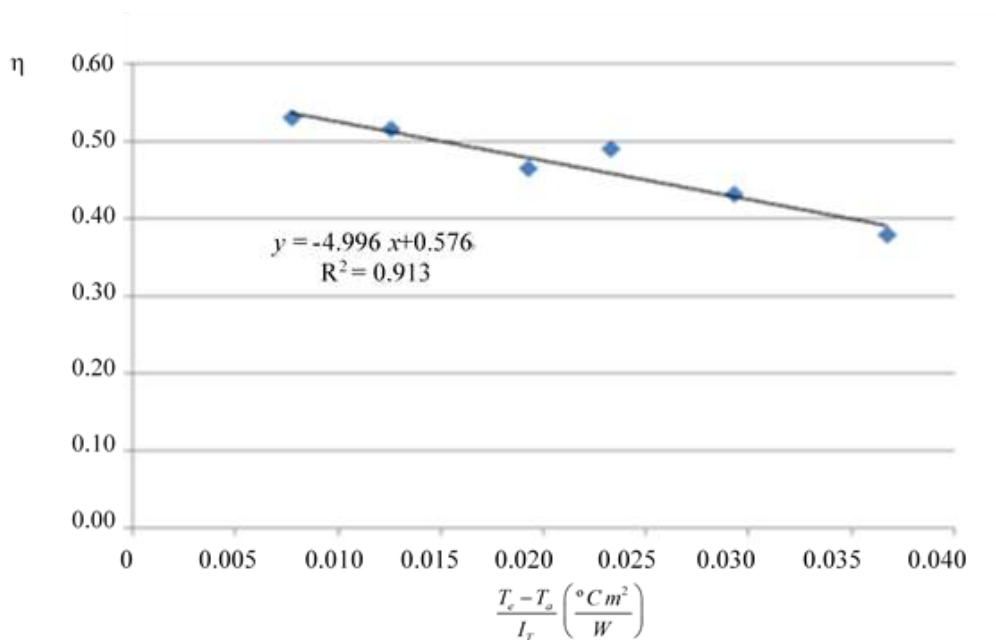


Figura 2. Curva de rendimiento térmico del colector “water in glass”, pensado como colector de placa plana en funcionamiento de estado estacionario tomada de Barral et al., 2007

## RESULTADOS OBTENIDOS

A partir de las ecuaciones (5) y (8) se calculó la utilizabilidad horaria y diaria y se las representó gráficamente vs.  $X_C$ , calculada a partir de la ecuación (10).

Las figuras 3 y 4, muestran los resultados obtenidos para los meses de enero y julio respectivamente, y la curva límite para días idénticos, que modela un escenario teórico donde no existe variación en la irradiancia solar incidente y la utilizabilidad cae bruscamente a cero cuando el  $X_C=1$ .

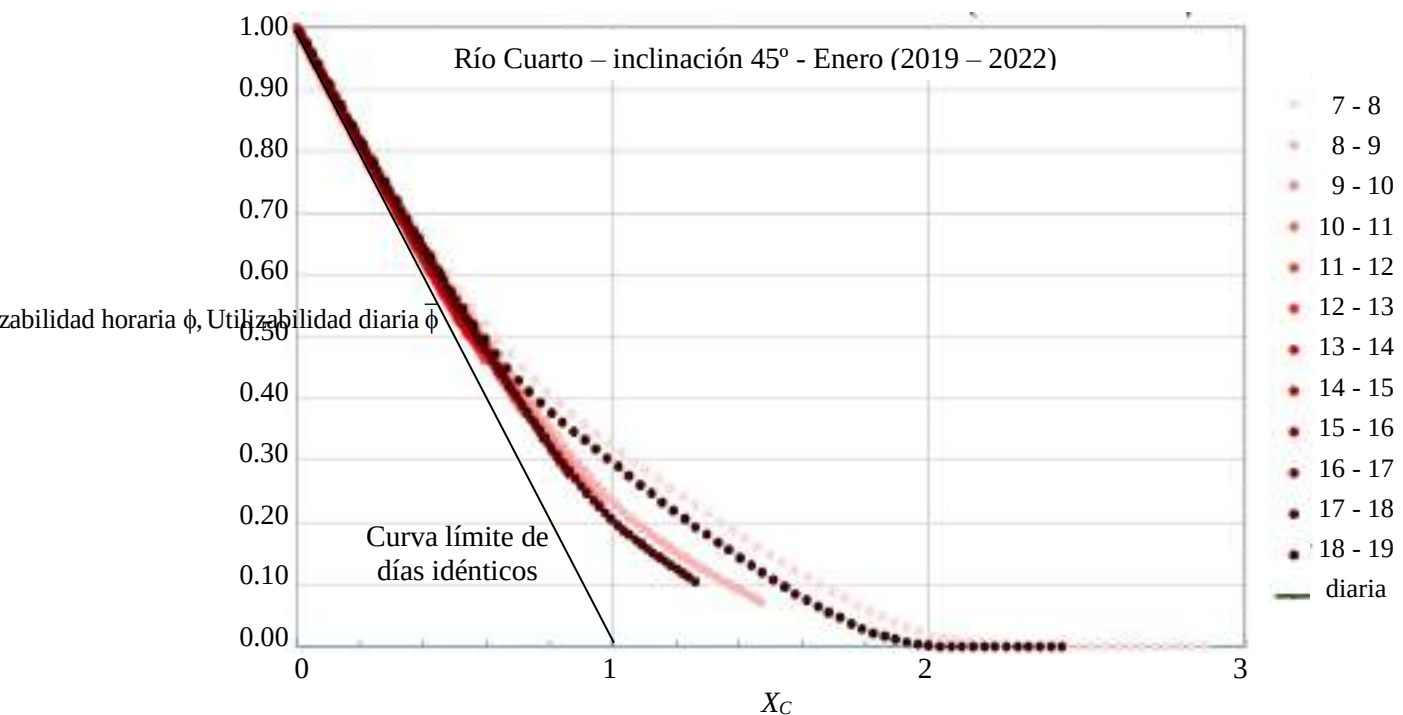


Figura 3. Curva de utilizabilidad horaria y diaria para el mes de enero

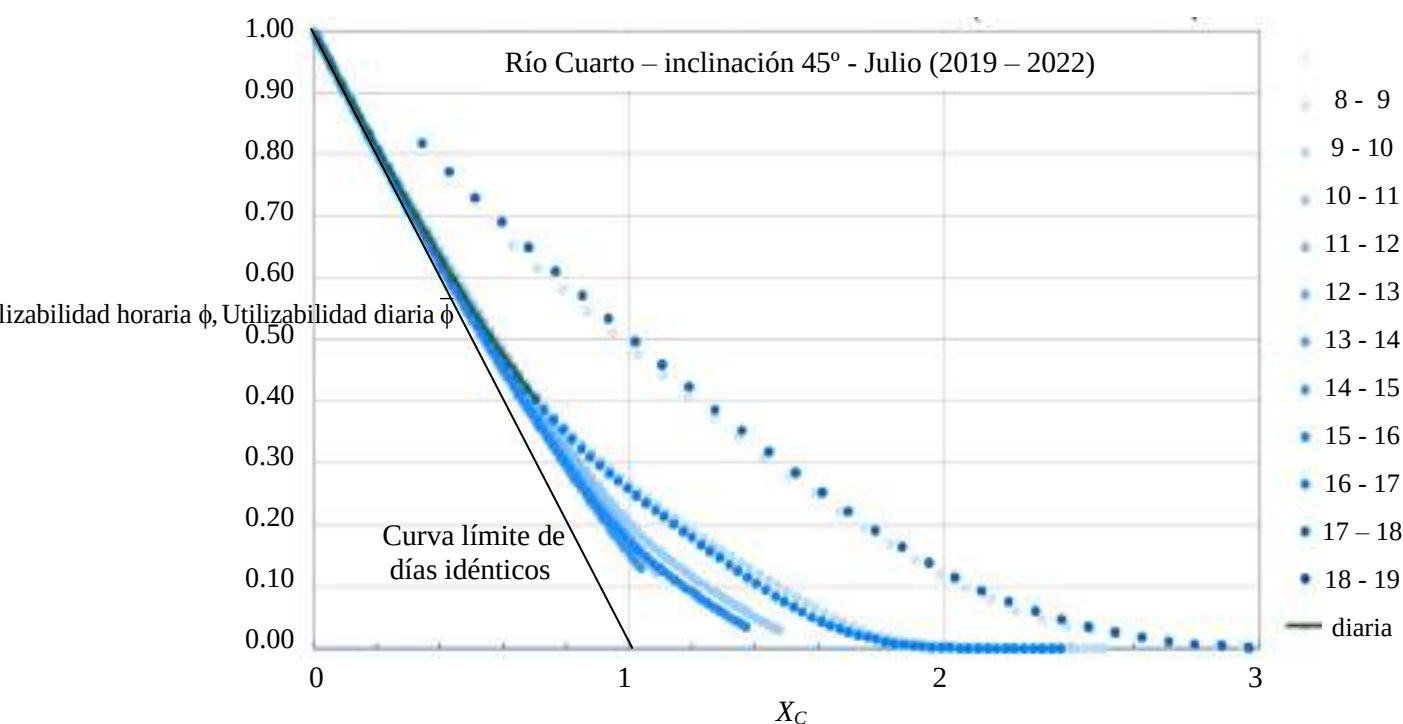


Figura 4. Curva de utilizabilidad horaria y diaria para el mes de julio

Se graficaron para los meses de enero (figura 3) y julio (figura 4), la utilizabilidad diaria y horaria, desde las 7:00 h hasta las 19:00 h para el mes de enero, mientras que, para el mes de julio debido al menor número de horas de sol, se presentan los resultados desde las 9:00 hasta las 19:00 h.

Las figuras 5 y 6, presentan la utilizabilidad horaria para dos períodos horarios diferentes y para todos los meses del año.

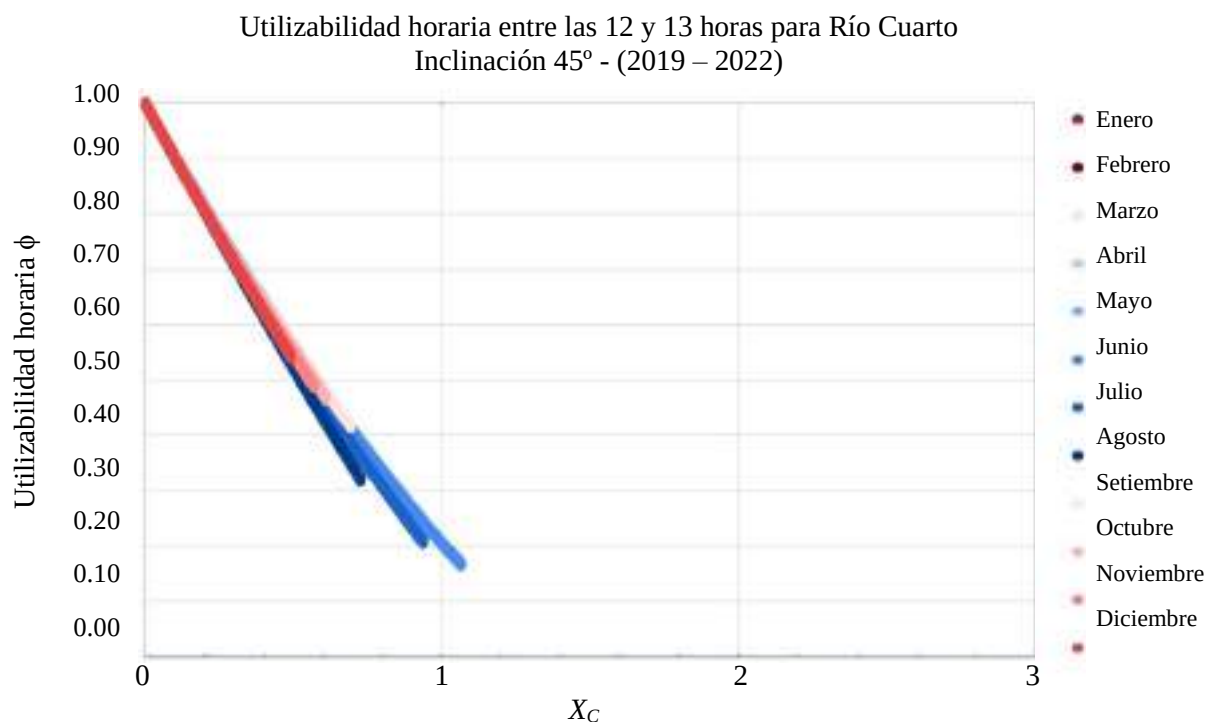


Figura 5. Curva de utilizabilidad horaria (12:00 h – 13:00 h) para todos los meses del año

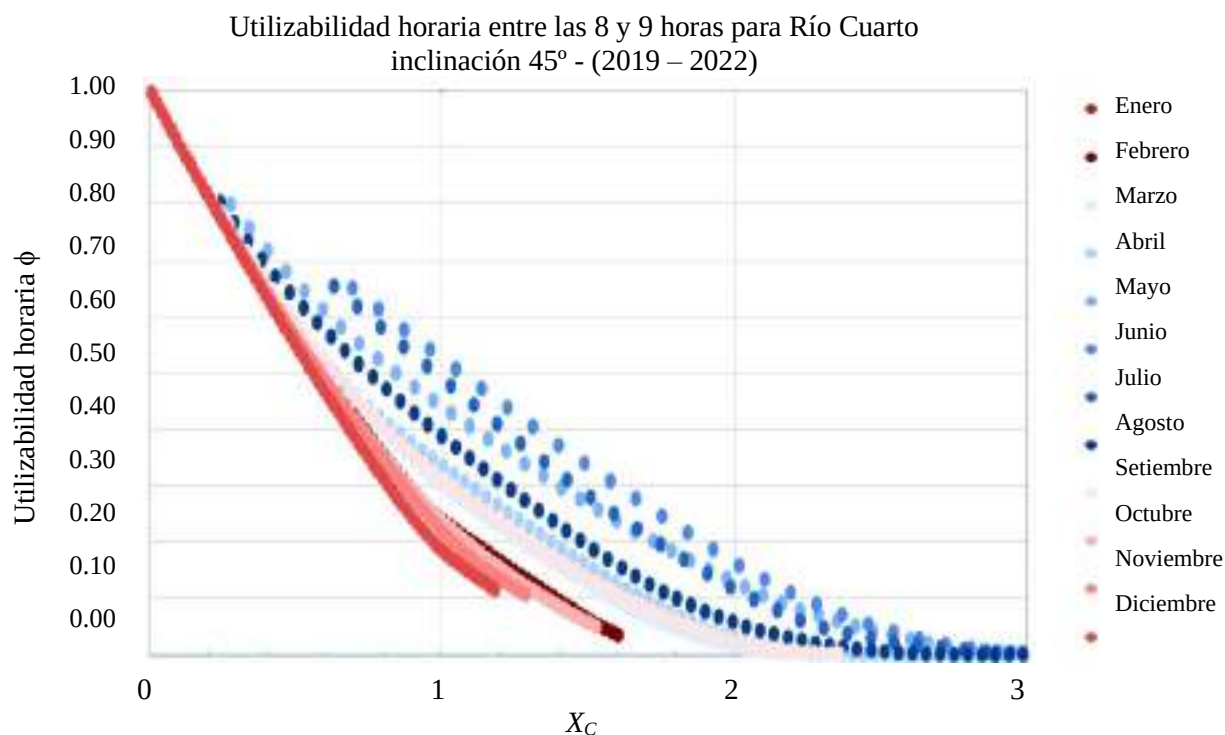


Figura 6. Curva de utilizabilidad horaria (12:00 h – 13:00 h) para todos los meses del año

## DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS Y CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos y de la discusión de los mismos, es posible concluir que la metodología de la utilizabilidad es una herramienta que puede aplicarse a los colectores solares de tubos evacuados del tipo “water in glass” para predecir el comportamiento de los mismos a largo plazo.

La diferencia entre las curvas límite para días idénticos y las curvas de utilizabilidad mostradas en las figuras 3 y 4, permiten advertir que, para la ciudad de Río Cuarto, no es adecuado suponer una intensidad de irradiancia constante a largo plazo, ya que las curvas de utilizabilidad para valores de  $X_C$  mayores a aproximadamente 0.5, se alejan considerablemente de la curva límite para días idénticos.

Las curvas de utilizabilidad horaria obtenidas para un mes determinado (figuras 3 y 4) son muy similares a las curvas generadas a partir de datos diarios, especialmente en un rango de  $\pm 2.5$  horas del mediodía solar, tal como lo sugieren Karatasou et al. (2006).

De las curvas de utilizabilidad mostradas en las figuras 3 y 4, y de acuerdo a las ecuaciones (11) y (12), se evidencia que la tasa de calor útil o potencia neta del colector, disminuye a medida que aumenta  $X_C$ . Esto puede explicarse debido a que el desempeño del colector, para una temperatura ambiente fija, decae con el aumento de la temperatura de entrada del agua, debido a que aumentan las pérdidas con el medio. Otro modo de analizar este comportamiento, es que al aumentar la temperatura de entrada y permanecer fija la temperatura ambiente, aumenta la irradiancia crítica,  $I_C$  (ecuación 3), y se requiere un nivel de irradiancia más alto para que el colector sea útil, entonces, una menor fracción de la irradiancia total disponible estará por encima de ese umbral crítico.

De acuerdo a las figuras 5 y 6, es posible afirmar que la distribución de las curvas de utilizabilidad depende de la época del año. Para épocas del año más frías, las curvas de utilizabilidad se extienden hacia la derecha. Esto se debe a dos razones, por un lado, durante las épocas más frías del año, disminuye la irradiancia global horaria promedio mensual y por el otro, debido a la dependencia del umbral crítico de irradiancia con la temperatura ambiente que, para una misma temperatura de entrada, la diferencia ( $T_e - T_a$ ) aumenta en épocas más frías, como consecuencia de las temperaturas ambientes más bajas.

La forma de las curvas obtenidas en todas las figuras, permite concluir que el método de la utilizabilidad se aplica a procesos no lineales caracterizados por una entrada fluctuante y un umbral por encima del cual existe una relación lineal de entrada a salida.

Por otro lado, si bien utilizabilidad es una herramienta que ha evolucionado en los últimos años (Njoku et al., 2020), aplicándose a numerosos sistemas solares y validándose en diversas regiones, el método tiene la limitación de requerir un nivel de irradiancia crítica constante, lo que equivale a suponer, que la diferencia ( $T_e - T_a$ ) permanece constante.

Otra limitación, es que la utilizabilidad solo proporciona la tasa de calor útil, pero no la calidad. Esto significa que no puede modelar fenómenos como la estratificación de tanques de almacenamiento, que requieren el conocimiento de la temperatura fluctuante de salida del colector. Por ello, el método de utilizabilidad se utiliza a menudo solo para calcular un límite superior o inferior en el rendimiento del sistema, para el cual es apropiado un nivel crítico constante. Sin embargo, sigue siendo una herramienta valiosa para el diseño y la optimización de sistemas solares térmicos.

## NOMENCLATURA

|                    |                                                                                     |
|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| $A_c$              | área efectiva del colector ( $m^2$ )                                                |
| $c_p$              | calor específico del agua ( $Joule\ kg^{-1}/^{\circ}C$ )                            |
| $F_R$              | factor de remoción de calor del colector (adimensional)                             |
| $F_R (\tau\alpha)$ | ordenada al origen de la recta de eficiencia instantánea (adimensional)             |
| $F_R U_L$          | pendiente de la recta de eficiencia instantánea ( $W/m^2\ ^{\circ}C$ )              |
| $\bar{H}$          | irradiancia total diaria promedio mensual sobre superficie inclinada ( $W\ h/m^2$ ) |

|                 |                                                                                                                                                        |
|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $I_T$           | Irradiancia solar o potencia instantánea del flujo de radiación solar que incide sobre una superficie inclinada por unidad de área (W/m <sup>2</sup> ) |
| $\bar{I}_T$     | Irradiancia global horaria media mensual sobre superficie inclinada (W/m <sup>2</sup> )                                                                |
| $I_c$           | Irradiancia solar crítica (W/m <sup>2</sup> )                                                                                                          |
| $\dot{m}$       | caudal másico que circula por el colector (kg/s)                                                                                                       |
| $n$             | cantidad de días en un mes                                                                                                                             |
| $N$             | número de observaciones o datos                                                                                                                        |
| $\dot{q}_u$     | tasa de recolección de energía útil (W)                                                                                                                |
| $\dot{q}_{u-i}$ | tasa de energía útil promedio a largo plazo para una hora y mes determinado (W)                                                                        |
| $\bar{Q}_i$     | recolección de energía promedio a largo plazo para una hora específica (W h)                                                                           |
| $\bar{Q}_{u-i}$ | recolección de energía promedio mensual a largo plazo para un período horario específico (W h)                                                         |
| $T_e$           | temperatura de entrada del fluido (°C)                                                                                                                 |
| $T_s$           | temperatura de salida del fluido (°C)                                                                                                                  |
| $T_a$           | temperatura ambiente (°C)                                                                                                                              |
| $U_L$           | coeficiente global de pérdidas térmicas del colector (W/ °C m <sup>2</sup> )                                                                           |
| $X_C$           | relación de intensidad crítica (adimensional)                                                                                                          |
| $\Delta t$      | intervalo de tiempo de 1 hora                                                                                                                          |
| $\phi$          | utilizabilidad horaria (adimensional)                                                                                                                  |
| $\bar{\phi}$    | utilizabilidad diaria (adimensional)                                                                                                                   |
| $(\tau\alpha)$  | producto transmitancia-absortancia (adimensional)                                                                                                      |
| $\eta$          | eficiencia instantánea del colector (adimensional)                                                                                                     |

## REFERENCIAS

- Armenta-Deu, C., De Andrés, M. C. (1991). Correlation of a New Utilizability Function to Experimental Data for Southwestern Europe. *Renewable Energy*, 1(5/6), 571-582.
- Barral, 9. R., Lucchini, J. M., & Garnica, J. H. (2017). Cálculo de sistemas de calentamiento de agua activos que utilizan colectores de tubos evacuados del tipo water-in-glass. *ASADES Acta de la XL Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente*, 5, 03.69-03.80.
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes* (Fourth Edition). John Wiley and Sons, Inc.
- Kalogirou, S. A. (2024). Chapter 11 - Designing and Modeling Solar Energy Systems. En *Solar Energy Engineering* (pp. 601-712). Elsevier Inc.
- Karatasou, S., Santamouris, M., Geros, V. (2006). On the calculation of solar utilizability for south oriented flat plate collectors tilted to an angle equal to the local latitude. *Solar Energy*, 80(12), 1600-1610.
- Klein, S. A., Beckman, W. A. (1984). Review of Solar Radiation Utilizability. *ASME Journal of Solar Energy Engineering*, 106(4), 393-402.
- Liu, B. Y. H. y Jordan, R. C. (1963). A Rational Procedure for Predicting The Long-Term Average Performance of Flat-Plate Solar-Energy Collectors. *Solar Energy* 7
- Njoku, M. C., Nwaji, G. N., Ofong, I., Ogueke, N. V., Anyanwu, E. E. (2020). Evaluation of Flat-Plate Solar Thermal Collector Daily Utilizability for Some Nigerian Cities. *Journal of Engineering Research and Application*, 10(2), 12-21.
- Pontin, M., Lema, A., Morseto, J., & Ruestsch, L. (2012). Funcionamiento Eficiente de un Colector Solar Plano con el Método de la utilizabilidad. *CADI* 2012.
- Qiu, S., Ruth, M., Ghosh, S. (2015). Evacuated tube collectors: A notable driver behind the solar water heater industry in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 580-588.
- Suehrcke, H; McCormick P. G. (1989). Solar radiation utilizability. *Solar Energy*. Volume 43, Issue 6, Pages 339-345

**APPLICATION OF THE UTILIZABILITY METHOD FOR THE ENERGY EVALUATION  
OF “WATER-IN-GLASS” TYPE EVACUATED TUBE SOLAR COLLECTORS: AN  
EXPERIMENTAL METHODOLOGICAL APPROACH BASED ON CLIMATIC DATA  
FROM RÍO CUARTO**

**ABSTRACT** The prediction of long-term performance is a fundamental aspect in the design and optimization of solar thermal systems. Within this framework, the utilizability method serves as a valuable analytical tool. The present study reports the application of both the hourly and daily utilizability approaches to an evacuated tube solar collector without thermal storage. Although the method requires a constant critical radiation level, this constraint is alleviated when implemented in systems exhibiting high thermal inertia, such as water-in-glass collectors. By integrating the collector's performance parameters with the utilizability method and experimental climatic data from Río Cuarto, this work provides an accurate estimation of the long-term energy contribution. The study presents a detailed description of the experimental infrastructure, the mathematical formulation, and the analysis of the results, from which conclusions are drawn regarding the long-term performance of the collector in the specific location of Río Cuarto. The resulting utilizability curves constitute a practical tool for assessing the fraction of incident solar energy that can be effectively harnessed, depending on the operating conditions and the required radiation threshold.

**Keywords:** utilizability, energy evaluation, critical radiation threshold.



## **ROL DEL HÁBITAT CONSTRUIDO EN LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA COMUNITARIA. CASO DE ESTUDIO EN SAN JUAN, ARGENTINA**

**Alción Alonso Frank, Guillermina Ré**

Instituto Regional de Planeamiento y Hábitat, Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Diseño,  
Universidad Nacional de San Juan (IRPha-CONICET-UNSJ).

Tel.: +54(0)264 423 2395 / 3259 Int. 318 - <http://www.irpha.faud.unsj.ar>

E-mails: [afrank@faud.unsj.edu.ar](mailto:afrank@faud.unsj.edu.ar), [guillerminare@faud.unsj.edu.ar](mailto:guillerminare@faud.unsj.edu.ar)

**RESUMEN:** El sector energético-ambiental se encuentra en un proceso de transformación permanente, impulsado por el cambio climático y la limitación de recursos fósiles. En respuesta a esta problemática, las comunidades energéticas surgen como un modelo innovador que redefine la generación y el consumo, lo cual promueve la sostenibilidad, la descentralización y la resiliencia. En este marco, el presente trabajo evalúa el potencial de generación renovable de una comunidad propuesta, constituida por un establecimiento educativo público y un barrio de vivienda social en San Juan, Argentina. Se aplica una metodología cuantitativa que combina modelación computacional mediante el “Calculador Solar” con análisis urbano-arquitectónico para estimar la generación energética. Los resultados evidencian que la producción solar fotovoltaica supera el consumo del edificio escolar y posibilita la implementación de un esquema de autoconsumo colectivo que incluye unidades residenciales. Además, se cuantifica la reducción de emisiones contaminantes, subrayando la viabilidad técnica y ambiental de éstas en zonas urbanas con condiciones climáticas favorables. Se concluye que las edificaciones ejecutadas por el Estado poseen un rol estratégico en la transición hacia hábitats sustentables, especialmente a través de la inclusión del concepto de generación distribuida comunitaria como mecanismo para promover la autogestión energética y la participación colectiva en el manejo de recursos renovables.

**Palabras clave:** energía solar fotovoltaica, comunidad energética, edificio escolar, vivienda social, transición energética, sostenibilidad.

### **INTRODUCCIÓN**

La crisis ambiental global manifestada en el avance del cambio climático, la pérdida de biodiversidad y la escasez de recursos naturales, demanda una reconsideración urgente de los modelos de desarrollo, poniendo especial énfasis en el sector energético debido a su impacto directo en las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) (FARN, 2019). Este sector es responsable de más de dos tercios de las emisiones globales de GEI, situándolo como el epicentro de los debates y soluciones necesarios para lograr una mayor sostenibilidad y habitabilidad del planeta (Vargas Ruiz, 2023). Por lo tanto, la energía no sólo representa el núcleo del desafío climático, sino que también es un componente esencial para su resolución (IPCC, 2020; ONU, 2025). A lo largo del tiempo, los sistemas energéticos cambian de forma paulatina; no obstante, la urgencia provocada por la crisis climática descrita demanda implementar con prontitud modelos renovados para la generación y el uso de la energía (Chemes et al., 2024). Ello, fundamentalmente, en un contexto en el cual está sucediendo una expansión energética, en lugar de una transición hacia esquemas eficientes basados en energías limpias (Bertinat y Chemes, 2023).

En este marco, la generación distribuida de energía basada en fuentes renovables se instala como uno de los pilares de la citada transición (Levy et al., 2021). Las tecnologías renovables, como la solar fotovoltaica, destacan por su capacidad para reducir las emisiones contaminantes y descentralizar el suministro energético, disminuyendo la dependencia de combustibles fósiles y fortaleciendo la



resiliencia de las comunidades (Padrones Bacallado, 2023; Vargas Ruiz, 2023). El aprovechamiento local de estos recursos, sumado a los avances tecnológicos, posibilita una mayor autonomía energética y la participación activa de los usuarios en los procesos de generación, consumo y gestión energética (Kazimierski, 2020; Palacios Ferrer, 2024).

Dentro de este nuevo horizonte, la comunidad energética, al constituirse como una figura jurídica emergente, representa un mecanismo eficaz para enfrentar el cambio climático, impulsando la transformación del sistema energético y promoviendo un modelo sostenible, equitativo e integrador (Falcón Pérez, 2023). Las mismas, entendidas como microrredes comunitarias, pueden llevar a cabo múltiples actividades, como producir, consumir, almacenar, compartir o vender energía, haciendo frente a la pobreza energética (Ulloa de Souza y Rodríguez Gámez, 2025; Hidalgo Cifuentes, 2022; IDAE, s/f). En consecuencia, el modelo de autoconsumo colectivo descrito, satisface sus necesidades y participa activamente en los mercados energéticos, incluso realiza intercambios de energía en sistemas de diversa complejidad (Galera Rodrigo, 2023). Por tanto, estas comunidades aprovechan distintos métodos de obtención de energía limpia con un objetivo claro, el cual es fomentar la descentralización energética, reducir la dependencia de los combustibles fósiles y promover una menor huella ambiental (Zhang, 2023). A su vez, retomando a Padrones Bacallado (2023), las vastas ventajas se centran en el incremento de la eficiencia energética, el fortalecimiento del empleo local, la reducción de la vulnerabilidad frente a cortes de suministro o fluctuaciones de mercado, la cooperación, la innovación social y el desarrollo de proyectos colectivos de alto impacto territorial. Uno de los elementos centrales de estas comunidades es su capacidad para situar a la ciudadanía en el centro del nuevo paradigma y en la sostenibilidad de sus territorios, dándole un rol clave en la propiedad, financiación, operación colectiva y toma de decisiones relativas a la energía (Lode et al., 2022).

La discusión teórica sobre el concepto y funcionamiento de estas comunidades se enriquece fundamentalmente por aportes de investigadoras como Baigorrotegui (2018a, 2018b; 2019; 2021 en Chemes et al., 2024), quien distingue diversas formas y dimensiones de estas organizaciones, además de que analiza sus dinámicas y la integración energética regional. En América Latina están vinculadas tanto al fomento del desarrollo sostenible como a la protección integral de la vida y las comunidades (Baigorrotegui y Chemes, 2023). En esta línea, en Argentina, los avances normativos son decisivos para consolidar el desarrollo de estas iniciativas. En 2023, la Secretaría de Energía de la Nación emite la Resolución 608/23, la cual establece un marco normativo específico para la Generación Distribuida Comunitaria, en complemento de la Ley 27.424 (Ministerio de Economía, 2025). Esta resolución armoniza y extiende regulaciones a nivel nacional para las provincias adheridas, basándose en experiencias previas implementadas en Santa Fe y Córdoba (Chemes et al., 2024). Su objetivo principal es reconocer formalmente la figura de usuarios generadores comunitarios y crear condiciones para la administración conjunta de proyectos de generación renovable conectados a la red de distribución, permitiendo además la medición y distribución equitativa de créditos energéticos entre los participantes. Esta nueva regulación introduce dos categorías denominadas “Usuarios Generadores Comunitarios” (UG-C) y “Usuarios Generadores Comunitarios Virtuales” (UG-CV). Estas figuras permiten a aquellos usuarios sin acceso a un espacio físico o capital propio integrarse al régimen nacional, superando las limitaciones para constituirse como Usuarios Generadores individuales. En el caso de los UG-C, los participantes establecen y comunican su porcentaje de participación en el proyecto, recibiendo una compensación económica proporcional a la energía que cada uno aporta a la red. Por otro lado, los UG-CV mantienen las características anteriores, pero añaden la capacidad de realizar mediciones en tiempo real tanto de la energía inyectada al sistema como del consumo individual de los miembros. Esto posibilitaría un autoconsumo virtual, optimizando la eficiencia y la rentabilidad del proyecto para todos sus integrantes. El carácter eminentemente colaborativo y autogestionado de estas comunidades permitiría experimentar nuevos modelos de apropiación tecnológica y de inclusión energética, que podrían impulsar las transformaciones profundas en la matriz energética y en la gobernanza local de los recursos energéticos (Palacios Ferrer, 2024).

En este contexto, las instituciones públicas y, particularmente, los edificios escolares adquieren protagonismo, conformando un espacio de aprendizaje conjunto que trasciende los límites formales de la institución (De Manuel Jerez et al., 2025). El potencial de generación renovable colectiva en ámbitos educativos no sólo permite el autoconsumo, sino también la posibilidad de aportar excedentes a otras

demandas, como ser a edificios residenciales próximos, enmarcado en normativas vigentes en la materia (Alonso Frank y Ré, 2022; Menéndez Sánchez y Fernández Gómez, 2022). Concebir a las escuelas como polos activos de generación y distribución renovable contribuye a un cambio tecnológico, social, político y cultural (Linares Ochoa, 2025). Así mismo, conduce a reforzar la capacidad de resiliencia, preparación, adaptación y reacción frente al cambio climático, con el fin de minimizar los riesgos e impactos de comunidades más vulnerables (Sono Hernández et al., 2024).

Por lo expuesto precedentemente, repensar el papel de las instituciones públicas desde la perspectiva de la generación distribuida comunitaria se presenta como un paso fundamental para transitar hacia un futuro energético más sostenible, justo y resiliente. Las experiencias, normativas y aportes teóricos revisados confirman la potencialidad de este enfoque, así como la capacidad de las comunidades energéticas para transformar la matriz energética y promover una ciudadanía más participativa e informada frente a los desafíos ambientales contemporáneos. De esta manera, en el presente trabajo se evalúa el potencial de generación fotovoltaica de una comunidad propuesta, constituida por un establecimiento educativo público y un conjunto residencial social en San Juan, Argentina, con el fin de destacar el rol ejemplar que pueden desempeñar las edificaciones ejecutadas por el Estado en avanzar hacia hábitats construidos sustentables. En base a ello, en futuras investigaciones se prevé profundizar en el diseño y dimensionamiento del sistema en su conjunto.

## **METODOLOGÍA**

La metodología empleada, de tipo cuantitativa, se limita a la estimación del potencial de generación energética de sistemas solares fotovoltaicos mediante modelación computacional asistida por la herramienta “Calculador Solar” (Secretaría de Energía, 2025), sin abordar el cálculo de elementos adicionales tales como inversores de tensión, configuraciones de conexión u otros componentes. El análisis se sustenta en parámetros esenciales definidos por la irradiación solar incidente, adecuadamente corregida según la inclinación y orientación de los módulos en referencia a la latitud específica del área de estudio. Esta aproximación se complementa con una evaluación exhaustiva de las características morfológicas, arquitectónicas y urbanas del caso de estudio, que posibilitan una selección óptima de las superficies disponibles para la implementación fotovoltaica. Por su parte, el inventario de áreas potenciales abarca cubiertas planas, así como inclinadas con orientación predominante hacia el norte, detallando el estado físico de las mismas, para garantizar la factibilidad técnica de la instalación.

Se selecciona un sistema basado en módulos monocristalinos de alta potencia (550 Wp), tomando en cuenta criterios rigurosos de eficiencia energética, viabilidad técnica y actualización tecnológica. La determinación de la generación anual integra, a su vez, registros reales de consumo energético provenientes de Naturgy San Juan (2025) junto con estudios previos de los autores, lo cual asegura fidelidad y aplicabilidad al modelado. En la fase de diseño, se realiza un análisis detallado del emplazamiento y se tipifican las cubiertas de los distintos bloques del caso de estudio, calculándose la capacidad máxima instalada factible para cada una según sus características específicas. Posteriormente, se evalúa el balance energético para identificar si los excedentes generados pueden sustentar un esquema de autoconsumo colectivo que agrupe a una escuela y a viviendas sociales.

Para completar el análisis, se cuantifica el impacto ambiental preliminar mediante el cálculo de las toneladas de dióxido de carbono equivalente evitadas, producto de la reducción de emisiones por el uso de energía limpia. Para ello se utiliza el “Calculador Solar”, que entre sus diversas aplicaciones proporciona información detallada en referencia al sistema de generación fotovoltaica propuesto.

Por último, se destaca que el presente estudio asume un marco normativo prospectivo que contempla la eventual incorporación de los modelos UG-C y UG-CV, definidos en la Resolución 608/23, la cual complementa la Ley Nacional 27.424, con el fin de explorar el potencial operativo y comunitario en el contexto local. De dichos modelos, se selecciona en lo específico al UG-CV, dado que el mismo contempla la monitorización en tiempo real tanto de la energía que se inyecta a la red como del consumo individual registrado por cada uno de los participantes. Ello se fundamenta en las características de uso de las edificaciones objeto de estudio.

## CASO DE ESTUDIO

Es fundamental destacar que San Juan se inserta en el marco normativo establecido por la Ley Nacional N° 27.424, sancionada en 2017, que regula y promueve la generación distribuida de energías renovables con destino al autoconsumo en Argentina. En este contexto, la provincia aprueba la Ley 1878-A en 2018, la cual declara de interés técnico y social la implementación de generación distribuida a partir de fuentes renovables. Esta normativa provincial, junto con la disponibilidad local de recursos naturales y la infraestructura industrial existente, favorece la expansión progresiva de dichos proyectos a escala local, consolidando su rol como pionera y referente en la adopción de tecnologías energéticas sustentables en el país. En este marco, la presente propuesta de comunidad energética está constituida por un establecimiento educativo y un barrio social ejecutado por el Instituto Provincial de la Vivienda. Este trabajo resulta particularmente relevante porque se centra en los dos modelos fundamentales para la incorporación de sistemas fotovoltaicos, los cuales presentan una estructura sencilla que facilita su replicación y adaptación a diversos tipos de construcciones, conduciendo potencialmente a su expansión en aplicaciones futuras (Padrones Bacallado, 2023).

En primer lugar, fundado en 1965, el Colegio Central Universitario "Mariano Moreno" (CCUMM) constituye una emblemática institución educativa de nivel secundario con orientación preuniversitaria, dependiente de la Universidad Nacional de San Juan (Figura 1). Su propuesta pedagógica enfatiza la integración del conocimiento teórico con la práctica cotidiana, estimulando a los jóvenes a desarrollar actitudes basadas en el respeto, el compromiso social y la conciencia ambiental, ejes fundamentales que orientan su formación integral. En consonancia, impulsa diversas iniciativas institucionales que buscan promover la participación activa y el compromiso social de sus estudiantes. Entre estas destacan "Creando Acciones Solidarias", que incentiva proyectos de ayuda comunitaria y el innovador "Rescate de Residuos Tecnológicos", enfocado en la gestión sustentable y el reciclaje de materiales electrónicos. Su oferta académica integra saberes científicos, sociales y artísticos para responder a los desafíos del mundo actual, promoviendo la innovación pedagógica y el uso de tecnologías digitales como herramientas para enriquecer el proceso de enseñanza-aprendizaje. Por lo expuesto, el CCUMM se constituye como un referente educativo dinámico y comprometido con la formación holística de sus estudiantes, que apoya, no sólo el desarrollo académico, sino también fomenta valores éticos y sociales esenciales para la construcción de una sociedad más justa, participativa y sostenible.



*Figura 1: Colegio Central Universitario Mariano Moreno. Fotografías del frente del edificio (orientación sur) y del patio central (orientación norte). Fuente: Elaboración propia.*

En segundo lugar, se toma un barrio social conformado por 540 unidades funcionales distribuidas en 48 bloques edilicios (Figura 2), cuyo perfil de consumo es analizado por Alonso Frank y Michaux (2022). Tanto el CCUMM como el barrio objeto de estudio se emplazan en la banda urbana de la Ciudad de San Juan, cuyos índices urbanísticos resultan los más altos de la misma (Kurbán et al., 2017).



Figura 2: Barrio social objeto de estudio. Planta y fotografías. Fuente: Elaboración propia.

Por último, se destaca que la provincia posee abundante recurso solar, con niveles diarios promedio de radiación solar global horizontal de 7,33 kWh/m<sup>2</sup> entre octubre y marzo y de 3,95 kWh/m<sup>2</sup> durante abril a septiembre, así como una heliofanía efectiva que varía entre 4 y 9 horas diarias según la ubicación y la época del año (Bianchi y Cravero, 2010; Montenegro, 2019).

### **Perfil de consumo del establecimiento CCUMM**

Conforme datos suministrados por Naturgy San Juan (2025), se tiene un consumo anual de 88774 kWh, con una mínima en el mes de enero de 2396 kWh y máxima en el mes de noviembre de 10912 kWh (Figura 3).

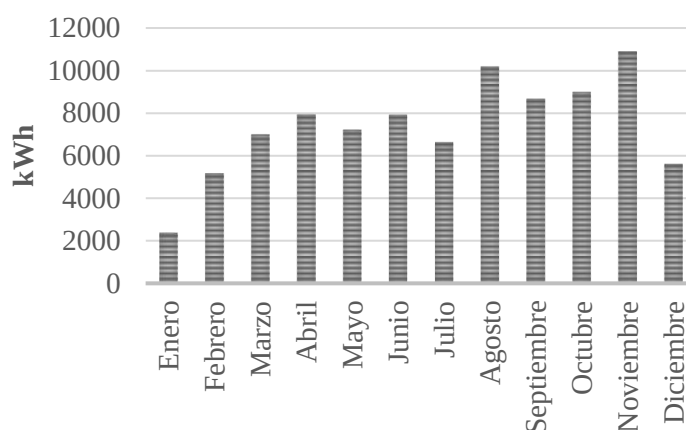


Figura 3: Perfil de consumo del establecimiento CCUMM. Fuente: Naturgy San Juan (2025).

De acuerdo a la Figura 3 y en línea con lo analizado por Ré et al. (2018), en los meses de verano el consumo es inferior al de los meses de invierno. Ello se asocia a un menor uso de las instalaciones de diciembre a febrero producto de la disminución de las actividades por el cierre del ciclo lectivo.

### **Perfil de consumo del barrio social**

El barrio social está compuesto por edificios de 9 y 12 unidades funcionales, que en conjunto alcanzan 540 unidades. Del perfil de consumo analizado por Alonso Frank y Michaux (2022) se deducen los resultados que se indican en Figura 4.

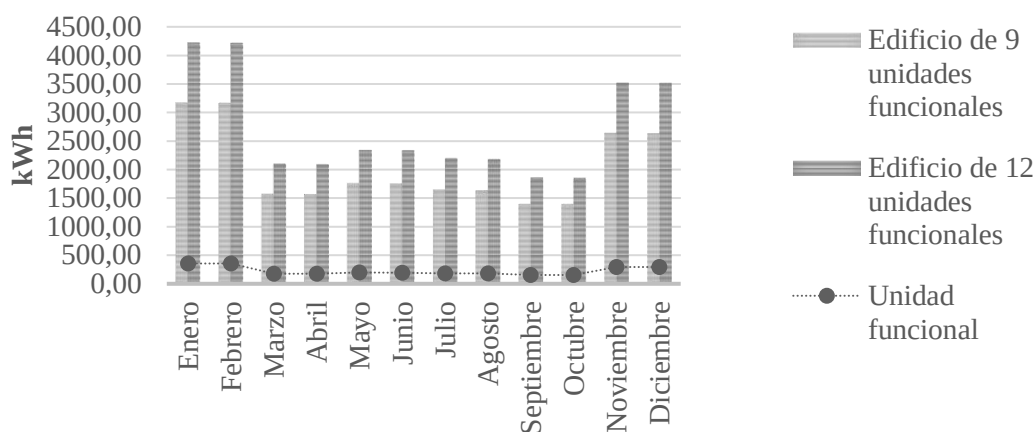


Figura 4: Perfil de consumo del barrio social. Fuente: Alonso Frank y Michaux (2022).

Como se puede observar, en contraposición al CCUMM, en los meses de verano el consumo es pronunciadamente mayor que en los meses de invierno. De acuerdo a Alonso Frank y Kuchen (2017), ello guarda correspondencia con el mayor uso de sistemas de climatización, atendiendo a las condiciones climáticas locales.

## SISTEMA GENERADOR FOTOVOLTAICO

En el presente estudio, el diseño de una instalación fotovoltaica se centra en maximizar la energía solar captada anualmente. Esto implica una optimización cuidadosa tanto en la orientación como en el ángulo de inclinación de los paneles solares. Para ello, es fundamental realizar un análisis exhaustivo del emplazamiento, considerando la latitud geográfica, la superficie disponible y posibles obstrucciones que puedan generar sombras. La cantidad de energía generada anualmente por los paneles solares está determinada por los ángulos de inclinación y orientación adoptados, resultando la disposición hacia el norte como la opción óptima para instalaciones ubicadas en el hemisferio sur (Secretaría de Energía, 2019). Conforme Secretaría de Energía (2025), en una ubicación con una latitud cercana a  $31^\circ$ , como es el caso de San Juan, se recomienda ajustar la inclinación del panel a un valor similar, aunque se pueden ponderar modificaciones estacionales para mejorar la captación en períodos específicos. En cuanto al espaciamiento, esto es, la distancia entre los paneles y cualquier elemento circundante, se calcula en dirección perpendicular al plano del módulo, considerando la altura de los obstáculos y el ángulo solar crítico (Secretaría de Energía, 2019). Esta separación es esencial para evitar el sombreado, ya que la presencia de sombras reduce significativamente la energía directa recibida y puede inducir la formación de puntos calientes que deterioran las celdas fotovoltaicas a largo plazo, afectando su vida útil (Pérez, 2024; Coña Mira, 2024). Para esta evaluación, se emplean herramientas como diagramas solares o software especializado que permiten simular y prever los efectos del sombreado anual. Complementariamente, aunque el diseño ideal minimiza las sombras, la incorporación de tecnologías como optimizadores de potencia y microinversores puede ayudar a mitigar parcialmente los impactos negativos en escenarios donde la presencia de obstáculos es inevitable, como en ciertas configuraciones arquitectónicas o restricciones ambientales (Niño Sierra, 2025).

En este contexto, con el fin de dar respuesta a los consumos descriptos en la comunidad objeto de estudio, se propone la instalación de módulos solares monocristalinos PERC de 550 Wp, 21.3% de eficiencia, dimensiones de 228 x 113cm y 27,5kg por unidad (LV ENERGY, 2025). Su selección se fundamenta en la óptima relación generación y precio (Vargas Ruiz, 2023). Esta tecnología asegura buen desempeño aún en condiciones de nubosidad parcial y es ideal para sistemas interconectados urbanos. La cantidad y disposición de paneles se dimensiona respecto a la superficie disponible en el CCUMM, acorde a las características de la envolvente arquitectónica. De esta manera se aprovechan las cubiertas inclinadas orientación norte (Sector A), junto con las cubiertas horizontales de los bloques de dos niveles (Sector B) (Figura 5).



Figura 5: Disposición de la instalación solar fotovoltaica en el establecimiento CCUMM. Fuente: Elaboración propia (2025).

En el Sector A se disponen un total de 204 paneles solares fotovoltaicos de 550 Wp cada uno (=112,2 kWp), mientras que, en el B, un total de 43 (= 23,6 kWp), resultando una instalación con un total de 247 paneles, esto es, una potencia total instalada de 135,8 kWp. Ello conforma una generación energética que se indica en Figura 6, de acuerdo al cálculo efectuado con el Calculador Solar elaborado por la Secretaría de Energía de la Nación. Se pone en valor que el mismo se constituye en una herramienta que permite obtener estimaciones precisas acerca de la producción anual de energía, considerando la radiación solar promedio local.

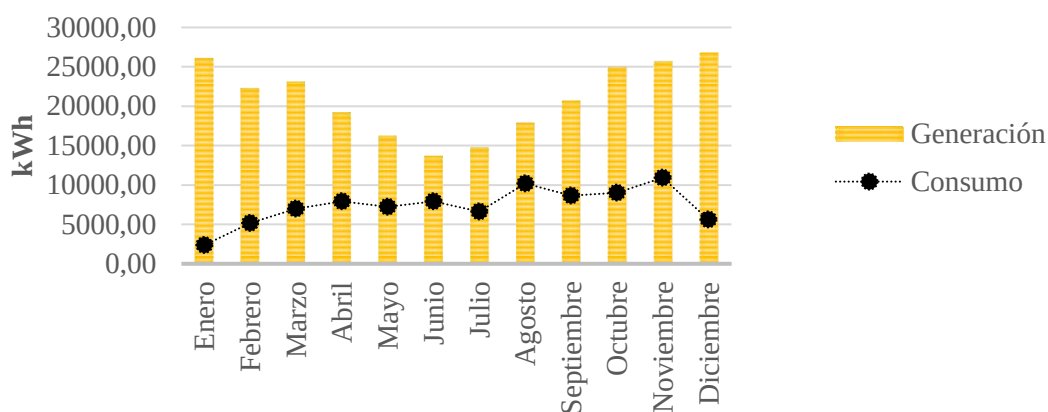


Figura 6: Generación solar fotovoltaica versus consumo energético del establecimiento CCUMM. Fuente: Elaboración propia (2025).

Como se puede observar en Figura 6, el CCUMM tiene un potencial de generación renovable que supera el consumo del mismo. Se constata con ello, que los edificios dedicados a actividades educativas representan una excelente oportunidad para el desarrollo de comunidades energéticas, incluso a nivel vecinal, lo que permite optimizar el aprovechamiento de la energía (Alonso Frank y Ré, 2022; Palacios Ferrer, 2024). En esta línea, en Figura 7 se detalla, en valores absolutos, la cantidad de unidades funcionales que puede abastecerse con la misma, mediante el modelo de UG-CV. De esta manera, los excedentes energéticos generados por el CCUMM se reducen al destinarse parcialmente para satisfacer la demanda de las unidades funcionales pertenecientes al barrio social, vinculadas a la comunidad energética. En esta línea se destaca que, puesto que la provincia no adopta formalmente el Decreto 608/23, este estudio se basa en un marco regulatorio anticipatorio que considera la posible adopción futura de estos modelos, con el propósito de evaluar las capacidades operativas y comunitarias dentro del entorno local.



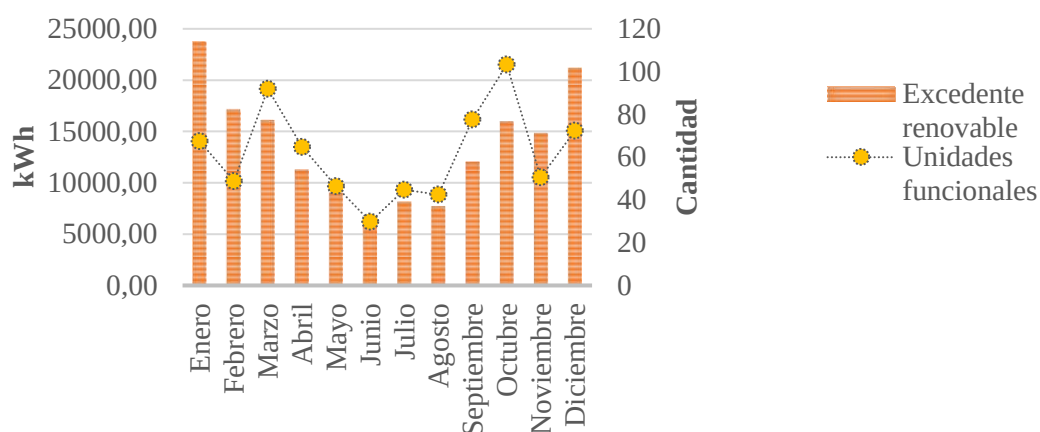


*Figura 7: Excedente de generación solar fotovoltaica del establecimiento CCUMM y cantidad de unidades funcionales que pueden ser potencialmente abastecidas por autoconsumo virtual. Fuente: Elaboración propia (2025).*

Siguiendo a Palacios Ferrer (2024), la correlación temporal entre la generación fotovoltaica en edificaciones dedicadas a actividades educativas y el consumo energético de unidades residenciales asociadas, presenta un potencial relevante para optimizar la operación de comunidades energéticas. Esto debido a que los perfiles de demanda y producción se manifiestan en intervalos horarios complementarios. De esta manera, el CCUMM permite abastecer un promedio de 62 (del total de 540) unidades funcionales del barrio en estudio. En este aspecto, es relevante analizar el concepto de autoconsumo en sistemas comunitarios mediante la figura UG-CV, la cual representa una ventaja sustancial frente a modelos aislados. El autoconsumo colectivo permite optimizar la utilización de excedentes generados por fuentes renovables, distribuyéndolos eficientemente entre los miembros de la comunidad. A su vez, la medición en tiempo real del consumo y generación facilitan una gestión energética colaborativa y transparente. De este modo, el mismo se configura como un mecanismo técnico-social clave para maximizar los beneficios derivados de la generación distribuida renovable (Camacho Morales et al., 2024).

Por último, el Calculador Solar proporciona información detallada sobre la reducción de emisiones de GEI asociada con la instalación propuesta. En este caso específico, la herramienta estima que la implementación del sistema genera un ahorro significativo de aproximadamente 134,5 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente. Este dato refleja el impacto positivo y tangible que tiene la adopción de tecnologías solares en la mitigación del cambio climático, contribuyendo así a la sostenibilidad ambiental y a la reducción de la huella de carbono del proyecto.

## DISCUSIONES

El enfoque desde el hábitat construido, junto con la incorporación de normativas emergentes específicas para la generación distribuida comunitaria, subraya la importancia de las políticas públicas como facilitadoras y potenciadoras de estos proyectos. En este sentido, la propuesta contribuye a consolidar un marco científico y normativo que legitima y promueve la autogeneración energética comunitaria, lo que representa un avance significativo a nivel regional al alinear los objetivos locales con la agenda global de sostenibilidad y mitigación del cambio climático. A su vez, la generación y consumo colectivo propuestos permiten disminuir la huella ambiental producto de la reducción de 134,5 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente y mitigar la pobreza energética, aspectos críticos para el desarrollo económico y social. La complementariedad temporal entre la generación en un establecimiento escolar en respuesta a su consumo junto con el de unidades funcionales de un barrio social se traduce en una mayor eficiencia operativa y en un modelo replicable y escalable, aspectos que denotan originalidad y robustez técnica. Esta unicidad no sólo amplía la aplicabilidad del concepto de comunidad energética bajo la forma de microrredes dentro del modelo de generación distribuida en contextos urbanos sustentables, sino que también posiciona al trabajo como un referente para futuras implementaciones en provincias con características climáticas similares.

En complemento, es fundamental reconocer que la consolidación de comunidades energéticas abarca tanto los aspectos tecnológicos y de infraestructura, como un compromiso intenso con las dinámicas sociales y comunitarias. La efectividad y sostenibilidad de estos proyectos dependen, en gran medida, del fortalecimiento del tejido social, la participación activa y el empoderamiento de los miembros de la comunidad. Esta dimensión social implica procesos de educación, construcción de confianza, diálogo inclusivo y adaptaciones culturales que son esenciales para facilitar la apropiación colectiva de la energía y garantizar una gobernanza compartida. Por ende, el desarrollo de comunidades energéticas constituye una práctica profundamente interdisciplinaria, donde la interacción entre tecnología, política y sociedad resulta clave para impulsar transiciones energéticas justas y resilientes.

En consecuencia, la presente investigación abre la puerta para una participación ciudadana más activa y un empoderamiento comunitario, factores esenciales para la sostenibilidad ambiental y la resiliencia energética. Así, el estudio aporta evidencia técnica en un marco normativo tangible, a la vez que refuerza el paradigma de la energía como un bien común que puede y debe ser gestionado en forma colaborativa.

## **CONCLUSIONES**

El presente estudio demuestra el importante rol que desempeña el hábitat construido en la implementación de modelos innovadores de generación distribuida comunitaria, específicamente en el contexto de San Juan, Argentina. La integración de un edificio escolar público con un conjunto residencial social para la generación y consumo colectivo de energía fotovoltaica constituye una estrategia novedosa que contribuye significativamente a la mitigación de la huella ambiental local y a la mejora de la eficiencia energética operativa. Este enfoque colaborativo y autogestionado mejora la sustentabilidad técnica y presenta beneficios sociales relevantes para comunidades vulnerables. Además, se reafirma la importancia de un entorno regulatorio adecuado, como el establecido recientemente en Argentina, que facilite y reglamente la generación distribuida comunitaria, asegurando la viabilidad y sustentabilidad de estos proyectos a mediano y largo plazo. La complementariedad entre los perfiles de consumo y generación permite optimizar el uso de la energía renovable, mientras que el uso de tecnologías de medición y gestión en tiempo real, propio de estos modelos, fortalece la transparencia y eficiencia del sistema.

Por último, se destaca el potencial de replicar y escalar la presente propuesta en otras regiones con condiciones climáticas similares, sentando un precedente importante para la transición energética regional hacia sistemas descentralizados, democráticos y sostenibles. Al respecto, el fortalecimiento de la participación ciudadana en este tipo de proyectos contribuye a construir comunidades más resilientes y empoderadas frente al cambio climático, posicionando al país como un referente en el impulso de políticas públicas que integren aspectos técnicos, sociales y ambientales para un desarrollo energético justo y sostenible.

## **FUENTES DE FINANCIAMIENTO**

El presente trabajo se enmarca en los proyectos de investigación de la Universidad Nacional de San Juan CICITCA 2023-2025 “Metodología de evaluación y calificación de la sustentabilidad ambiental para escuelas. Aplicación en casos de estudio del Área Metropolitana de San Juan” bajo la dirección de la Mg. Arq. Ré y codirección de la Dra. Arq. Alonso Frank y PRONIS 2025-2026 “Eficiencia energética en viviendas sociales de San Juan: Estrategias proyectuales para un futuro sustentable” bajo la dirección de la Dra. Arq. Alonso Frank.

## **AGRADECIMIENTOS**

Se agradece a la Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Diseño de la Universidad Nacional de San Juan por la contribución en el financiamiento de la investigación en el marco de los proyectos descriptos.

## REFERENCIAS

- Alonso Frank A. y Ré, M.G. (2022). Establecimientos escolares: Potenciales centros de generación de energía renovable. Casos de estudio en Ciudad de San Juan, Argentina. *Revista PENSUM*, 8, 1-19.
- Alonso Frank, A. y Michaux, M. C. (2022). Incorporación de energías renovables en el hábitat popular de San Juan, Argentina. *Revista Arquitecto*, 20, 78-86.
- Alonso Frank, A. y Kuchen, E. (2017). Estado del uso de artefactos de consumo de energía eléctrica en período cálido en edificios residenciales en altura en la Ciudad de San Juan – Argentina. En XL Congreso ASADES, 5, 07.13-07.20.
- Baigorrotegui B., G. (2019). Destabilization of Energy Regimes and Liminal Transition through Collective Action in Chile. *Energy Research & Social Science*, 55, 198-207.
- Baigorrotegui, G. (2018a). Comunidades energéticas en la Patagonia: Tan lejos y tan cerca del extractivismo. *Estudios Avanzados*.
- Baigorrotegui, G. (2018b). Comunidades energéticas en Latinoamérica. Notas para situar lo abigarrado de prácticas energocomunitarias. En *¿Conectar o Desconectar? Comunidades energéticas y transiciones hacia la sustentabilidad* (pp. 197-222).
- Baigorrotegui, G. (2021). Comunidades energéticas y pensamiento amerindio desde las roturas del COVID-19. *Revista Polis e Psique*, 11(SPE), 177-203.
- Baigorrotegui, G. y Chemes, J. (2023). Comunidades energéticas latinoamericanas. Sostenedoras de transiciones que mantienen y reparan la vida. *Energía y Equidad*, 7.
- Bertinat, P. J. y Chemes, J. (2023). El camino de la transición energética en Argentina. *Energía y Equidad*, 7.
- Bianchi, A. R. y Cravero, S. A. (2010). *Atlas climático digital de la República Argentina*. INTA, 1° ed.
- Camacho Morales, O. A., Vásquez Torres, N. J., Rey Peña, N. M., García Orrego, S., Aponte, J. E., Baquero Maldonado, J. A., Pineda Guzman, J. A., Forero Portela, J., Walteros Ruiz, Y., Ávila, A. K., Gámez Peñaranda, Á., Kohl, U., Hernández Delgado, A. V. y Agreda Botina, J. C. (2024). Metodología General Estrategia Nacional Comunidades Energéticas. Ministry of Mines and Energy, Colombia. <https://www.minenergia.gov.co/documents/13312/Metodologia-General-Estrategia-Nacional-Comunidades-Energeticas-2024.pdf>
- Chemes, J., Garrido, S., Aguiar, D. y Rullo, P. (2024). Comunidades energéticas en Argentina: relevamiento de normativas y proyectos. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 28.
- Chemes, J., Garrido, S., Bertinat, P. y Arraña, I. (2024). Reconstrucción de trayectoria y alianzas socio-técnicas de la generación distribuida en Santa Fe (2013-2020). *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 28, 356-368.
- Coña Mira, P. (2024). *Estudio experimental del comportamiento de placas fotovoltaicas en relación a fallas tipo hotspot*. (Doctoral dissertation, Universidad Tecnológica Metropolitana).
- De Manuel Jerez, E., González-Arriero, C., y Donadei, M. (2025). Construyendo la comunidad energética Torreblanca Ilumina desde el aprendizaje-servicio. *Revista de Fomento Social*, (311), 47-78.
- Falcón Pérez, C. E. (2023). Las comunidades energéticas como iniciativas emergentes que luchan contra el cambio climático. *Actualidad Jurídica Ambiental*, 136, 1-58.
- Galera Rodrigo, S. (2023). Autoconsumo colectivo:(mucho) más allá de los tejados. *Cuadernos de derecho local*, 55-81.
- Hidalgo Cifuentes, M. (2022). *Estudio de viabilidad de una comunidad energética*. (Master dissertation, Universidad Europea de Madrid)
- IDEA (s/f). [en línea] Comunidades energéticas. Dirección URL: <https://www.idae.es/ayudas-y-financiacion/comunidades-energeticas> [consulta: 8 de agosto de 2025]
- IPCC (2020). [en línea] Energy is at the heart of the solution to the climate challenge. Dirección URL: <https://www.ipcc.ch/2020/07/31/energy-climatechallenge/> [consulta: 8 de agosto de 2025]
- FARN – Fundación Ambiente y Recursos Naturales (2019). *Informe Ambiental 2019*. Premio Adriana Schiffrin “Jóvenes por el Ambiente” 17° Convocatoria.
- Kazimierski, M. (2020). *La transición energética como oportunidad de descentralización y desconcentración. Un acercamiento al potencial de la generación distribuida de energía renovable en Argentina y su aplicación en San Juan*. (Magister dissertation, Universidad de Buenos Aires).
- Kurbán, A., Cúnsulo, M., Papparelli, A. y Montilla, E. (2017). Distribución espacial de la urbanización en el oasis de Tulum: Área metropolitana de San Juan. *El Ojo del Cóndor*, 27–29.

- Linares Ochoa, R. L. (2025). *Comunidades Ecosistémicas y transición energética: Bio-Educación comunitaria y los derechos energéticos en Las zonas rurales de Ciudad Bolívar*. (Grade dissertation, Universidad Pedagógica Nacional).
- Levy, A., Messina, D. y Contreras Lisperguer, D. (2021). *Definiciones del sector eléctrico para la incorporación de las energías renovables variables y la integración regional en América Latina y el Caribe*. CEPAL. Dirección URL: <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/46120321-fd1d-4b75-a24a-b3b92c7e880b/content> [consulta: 8 de agosto de 2015]
- Ley N° 27.424 (2017). Régimen de Fomento a la generación distribuida de energía renovable integrada a la red eléctrica pública. Buenos Aires, Argentina. Recuperado de <https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/ley-27424-305179>
- Ley Provincial N°1.878-A (2018). Adhesión a la Ley N° 27.424. San Juan, Argentina. <http://www.saij.gob.ar/1878-local-san-juan-se-declara-interes-tecnico-social-generacion-distribuida-energia-electrica-partir-fuentes-energia-> Recuperado de [http://www.probiomasa.gob.ar/\\_pdf/ley1878\\_SanJuan.pdf](http://www.probiomasa.gob.ar/_pdf/ley1878_SanJuan.pdf)
- Lode, M. L., te Boveldt, G., Coosemans, T. y Ramirez Camargo, L. (2022). A transition perspective on Energy Communities: A systematic literature review and research agenda. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 163, 1-12.
- LV ENERGY (2025). Módulo solar monocristalino PERC de 550 Wp. Dirección URL: <http://www.lv-energy.com/#!/producto/17/> [consulta: 1 de agosto de 2025]
- Maskova, I., Rabadán, M. S., Amengual, L. L., Horrach, E. G. y Salom, J. (2022). *Análisis del potencial de las instalaciones fotovoltaicas sobre cubierta para la creación de una comunidad energética ciudadana en el distrito de innovación de Llevant*. In CIES 2022-XVIII Congreso Ibérico y XIV Congreso Iberoamericano de Energía Solar, 67.
- Menéndez Sánchez, J. y Fernández Gómez, J. (2022). Comunidades Energéticas: Casos De Estudio. *Cuadernos Orkestra*, 1-125.
- Ministerio de Economía (2025). *Generación Distribuida: se incorporó al usuario-generador comunitario en el marco normativo*. Dirección URL: <https://www.argentina.gob.ar/> [consulta: 1 de agosto de 2025]
- Montenegro, M. (2019). *San Juan y su política de desarrollo de la energía fotovoltaica*. Dirección URL: <http://sisanjuan.gob.ar/interes-general/2019-10-07/18102-san-juan-y-su-politica-de-desarrollo-de-la-energia-fotovoltaica> [consulta: 4 de abril de 2020]
- Niño Sierra, W. J. (2025). *Análisis a estrategias de optimización energética en sistemas de energía solar fotovoltaica para aplicaciones residenciales: Un enfoque comparativo*. (Grade dissertation, Universidad, Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD)
- ONU (2025) [en línea] Energías renovables: energías para un futuro más seguro. Dirección URL: <https://www.un.org/es/climatechange/raising-ambition/renewable-energy> [consulta: 1 de agosto de 2025]
- Padrones Bacallado, A. J. (2023). *Estudio de comunidad energética en edificios*. (Grade dissertation, Universidad de La Laguna).
- Palacios Ferrer, J. A. (2024). *Estudio de la sostenibilidad y energías renovables en comunidades energéticas*. (Doctoral dissertation, Universidad de Valladolid).
- Pérez, D. (2024). *Energía solar térmica. Fundamentos, tecnologías y aplicaciones*. Marcombo.
- Ré, G., Filippín C. y Blasco Lucas, I. (2018). Consumos energéticos de gas natural y electricidad de edificios escolares del Área Metropolitana de San Juan, Argentina. Análisis estadístico en función de variables arquitectónicas. *Revista Hábitat Sustentable*. Vol. 8, N°2, pp. 105-115
- Secretaría de Energía (2019). *Manual de Generación Distribuida Solar Fotovoltaica*. Buenos Aires.
- Secretaría de Energía (2025). Calculador solar: Autoconsumo residencial. Disponible en: <https://calculadorsolar.minem.gob.ar/calculador>.
- Sono Hernández, J., Neyra López, C., Rosas Lezama, R. y Lema Martínez, Y. (2024). *Educación ciudadana para la sostenibilidad ambiental: recomendaciones de política en el marco del Proyecto Educativo Nacional al 2036*. Ministerio de Educación, Perú.
- Ulloa de Souza, R. C. y Rodríguez Gámez, M. (2025). Prosumidores y comunidades energéticas en Ecuador: viabilidad y potencial. *Revista Social Fronteriza*, 5(4), e-828. [https://doi.org/10.59814/resofro.2025.5\(4\)828](https://doi.org/10.59814/resofro.2025.5(4)828)
- Vargas Ruiz, M. (2023). *Diseño de una comunidad energética local (CEL) Estudio de caso en el Campus de Moncloa de la UPM*. (Doctoral dissertation, ETSI\_Diseno).

- Zhang, C. (2023). *Aspectos económicos de la transición a un sistema energético bajo en emisiones*. (Doctoral dissertation, Universidad Rey Juan Carlos).
- Zarate Cugat, G. (2025). *Estudio técnico económico de viabilidad de instalación fotovoltaica frente a fotovoltaica combinada con PVT*. (Grade dissertation, Universidad Miguel Hernández de Elche).

## **THE ROLE OF THE BUILT ENVIRONMENT IN COMMUNITY DISTRIBUTED GENERATION. CASE STUDY IN SAN JUAN, ARGENTINA**

**ABSTRACT** The energy-environmental sector is undergoing a process of permanent transformation, driven by climate change and the limitation of fossil resources. In response to this problem, energy communities are emerging as an innovative model that redefines generation and consumption, promoting sustainability, decentralization, and resilience. Within this framework, this study evaluates the renewable generation potential of a proposed community consisting of a public educational establishment and a social housing neighborhood in San Juan, Argentina. A quantitative methodology is applied that combines computational modeling using the “Solar Calculator” with urban-architectural analysis to estimate energy generation. The results show that solar photovoltaic production exceeds the consumption of the school building, enabling a collective self-consumption scheme that includes residential units. In addition, the reduction in pollutant emissions is quantified, highlighting the technical and environmental viability of these in urban areas with favorable climatic conditions. It is concluded that buildings constructed by the State play a strategic role in the transition to sustainable habitats, especially through the inclusion of the concept of community distributed generation as a mechanism to promote energy self-management and collective participation in the management of renewable resources.

**Keywords:** photovoltaic solar energy, energy community, school building, social housing, energy transition, sustainability.

## AVANCES Y DESAFÍOS EN LA IMPLEMENTACIÓN DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICA DISTRIBUIDA EN LA CNEA

**Juan Plá<sup>1,2,3</sup>, Mariela Videla<sup>1</sup>, Ismael Eyra<sup>1,4</sup>, Claudio G. Bolzi<sup>1</sup>, Juan I. Pérez<sup>1</sup>,  
Sebastián Muñoz<sup>1</sup>, Julio C. Durán<sup>1,5</sup>, Mónica Martínez Bogado<sup>1,2,5</sup>**

<sup>1</sup>Departamento Energía Solar, CNEA

<sup>2</sup>Instituto de Nanociencia y Nanotecnología, CONICET-CNEA

<sup>3</sup>Instituto de Tecnología Prof. Jorge Sábato, CNEA-UNSAM

<sup>4</sup>Centro de Investigación Hábitat y Energía CIHE, FADU-UBA

<sup>5</sup>Escuela de Ciencia y Tecnología, UNSAM

Tel. +54 11 6772 7837 – e-mail: [monicamartinez@cnea.gob.ar](mailto:monicamartinez@cnea.gob.ar)

**RESUMEN:** La tecnología solar fotovoltaica se ha convertido en un actor principal en la transición hacia una matriz eléctrica limpia y sostenible a nivel global. Argentina ha experimentado un crecimiento sostenido en este sector, impulsado por leyes y regulaciones nacionales y provinciales, además de sus compromisos internacionales para reducir las emisiones y combatir el cambio climático. La Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) ha asumido un compromiso en este ámbito mediante proyectos de inversión en sistemas de generación fotovoltaica distribuida. Estos proyectos buscan cumplir con las Leyes Nacionales 27.191, de fomento a las fuentes renovables, y 27.424, que regula la generación distribuida. Uno de sus principales objetivos es instalar sistemas fotovoltaicos conectados a la red de baja tensión en edificios públicos de la CNEA, con la meta de proveer cerca del 8 % del consumo eléctrico anual. En este trabajo se presentan los avances del último año en estos proyectos, incluyendo actividades de investigación, cambios en la legislación, y perspectivas futuras. También se abordan las dificultades enfrentadas. Se espera que estos proyectos continúen, reforzando la contribución del sector público, a través de la CNEA, en la transición energética del país.

**Palabras clave:** energía solar fotovoltaica, generación distribuida, transición energética, responsabilidad ambiental institucional.

### INTRODUCCIÓN

La tecnología solar fotovoltaica (FV) se ha establecido a nivel global como la principal fuente de generación eléctrica de bajas emisiones, compitiendo económicamente a su vez con las denominadas fuentes convencionales. La evolución del crecimiento de la potencia instalada de solar FV, producto de las políticas de promoción e inversión llevadas a cabo por numerosos países en las últimas décadas, se observa en la Figura 1. El hito del TW de potencia instalada acumulada fue alcanzado durante 2022, mientras que en 2024 dicha potencia se duplicó en exceso llegando a los 2,2 TW. Sin embargo, este notable crecimiento no es suficiente para limitar el aumento de la temperatura global a 1,5°C, establecido en el Acuerdo de París, para lo cual es necesario multiplicar varias veces este valor (Haegel et al, 2023; Jäger-Waldau, 2025). Según el escenario actualizado desarrollado por la IEA (*International Energy Agency*) conducentes a emisiones netas igual a cero (*Net Zero Emissions*, NZE) en 2050, las fuentes renovables deberían dar cuenta del 59 % de la energía generada en 2030 y arriba del 88 % en 2050, para valores totales de 23.337 TWh y 70.936 TWh respectivamente (Jäger-Waldau, 2025). La previsión en particular para la generación por solar FV asciende a 9.212 TWh en 2030, para un total de 6,7 TW instalados (Jäger-Waldau, 2025), es decir 3 veces el valor de 2024.



La Argentina no ha sido ajena a esta tendencia general, y desde 2006 ha instrumentado diversas iniciativas de legislación nacional tendientes a la promoción de las energías renovables, así como también lo hicieron varios estados provinciales. Estas decisiones políticas facilitaron la adopción de tecnologías de generación de energía renovable, entre ellas la energía solar FV. La Figura 2 muestra la evolución de la participación de las diferentes fuentes de energía en la matriz eléctrica entre los años 1996 y 2024 (CAMMESA, 2025). Se observa una fuerte predominancia de las centrales térmicas (combustibles fósiles) y un crecimiento sostenido, a partir del año 2018, de las fuentes renovables que incluyen, entre otras, las energías eólica, solar e hidráulica, esta última con potencias de hasta 50 MW según lo establecido en la Ley 27.191. Las centrales hidroeléctricas de potencia superior a 50 MW se consideran aparte. La generación con fuentes renovables en 2024 totalizó 22.877 GWh, de los cuales 3.941 GWh (17,2 %) fueron de origen solar FV (CAMMESA, 2025).

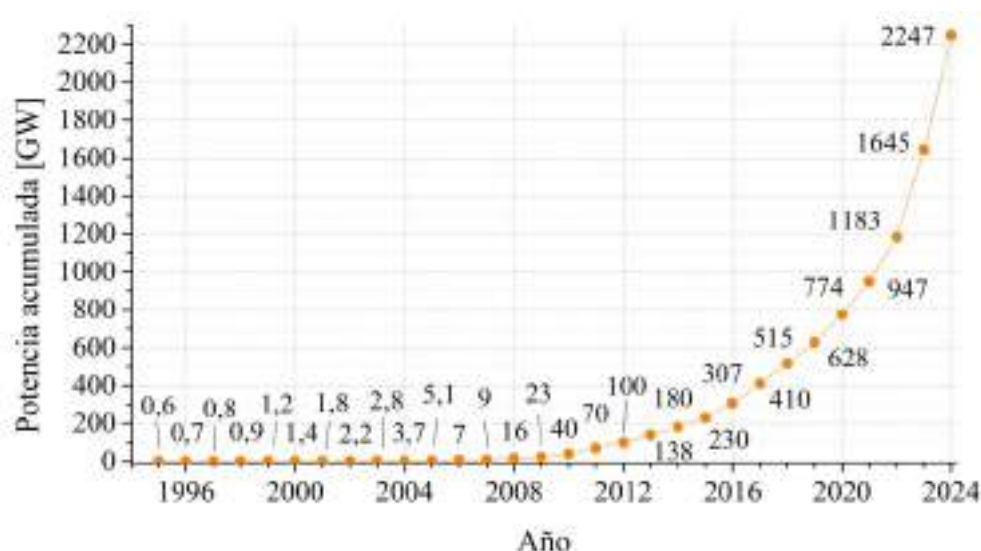


Figura 1: Evolución de la potencia instalada de Energía Solar Fotovoltaica global (1995-2024). Elaboración propia a partir de datos extraídos de REN21 (2013), REN 21 (2024), e IEA (2025).

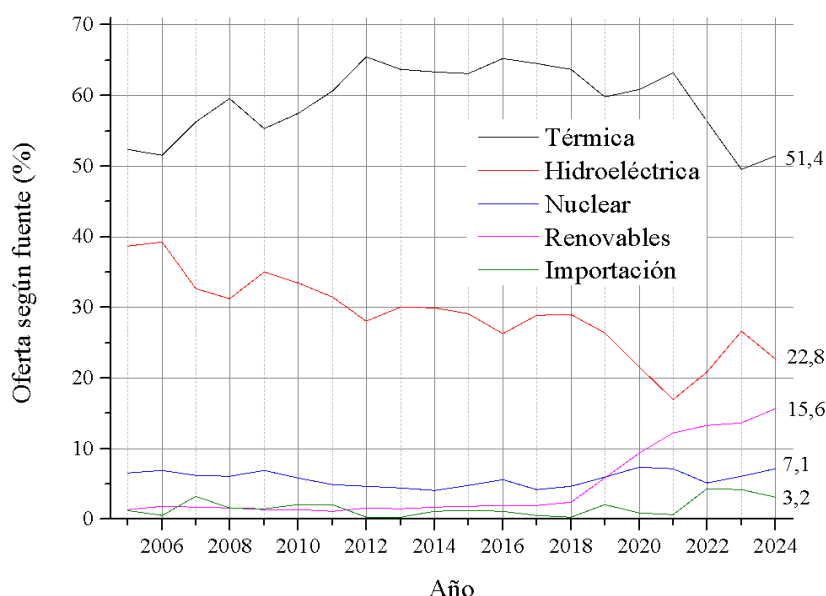


Figura 2: Evolución de la contribución de cada fuente de generación eléctrica a la oferta de energía en 2005-2023. Hidroeléctrica se refiere a centrales de potencia (>50 MW). Elaboración propia a partir de datos extraídos de CAMMESA (2025).

La potencia total de centrales FV en operación a mayo de 2025 ascendió a 2.177 MW, instalada principalmente en el noroeste del país (854 MW) y en la región cuyana (835 MW). Por su parte, la generación distribuida mediante fuentes renovables ha tenido un cierto avance, aún incipiente, ya sea en



forma de pequeñas plantas con potencias entre 100 kW y 500 kW (PROINGED, 2025; EE, 2025) o en instalaciones de usuarios del sistema eléctrico. Asimismo, en el marco de la Ley 27.424 de promoción de la generación distribuida mediante fuentes renovables (ver siguiente sección), a junio de 2025 había en el país 2.918 usuarios-generadores, con una potencia total instalada de aproximadamente 78 MW (MECON, 2025).

En este artículo se da cuenta de los avances realizados en la CNEA en generación FV distribuida, como parte del aporte institucional a la concreción de los objetivos de las leyes nacionales vigentes mencionadas. En referencia a este contexto, se pasa revista a las novedades en la legislación y regulación referidas a dicha tecnología. Se incluyen, asimismo, las actividades de investigación y desarrollo llevadas a cabo en el último año relacionadas con los sistemas FV instalados, así como las dificultades y desafíos que se encontraron durante el desenvolvimiento de la actividad.

## **GENERACIÓN DISTRIBUIDA - LEGISLACIÓN Y REGULACIÓN**

La Ley 27.424, promulgada a fin del año 2017 y reglamentada mediante el Decreto 986/2018, estableció un régimen de fomento para la generación distribuida mediante energías renovables, que habilita a los usuarios a instalar sistemas de generación de electricidad a partir de fuentes renovables conectados a la red eléctrica pública para autoconsumo e inyección de excedentes. A fines de 2024, el Régimen de Generación Distribuida (Ley 27.424) contaba con 18 jurisdicciones adheridas y 330 Distribuidoras y Cooperativas inscriptas en la plataforma, según datos del Reporte Anual 2024 (MECON, 2025). Las provincias de Santa Fe y Santiago del Estero se encuentran adheridas al régimen nacional pero aún no registran distribuidoras o cooperativas inscriptas. Si bien la ley nacional contempla diferentes fuentes renovables, la generación distribuida en áreas urbanas se encuentra ampliamente dominada por la energía solar fotovoltaica (en el país y en el mundo en general), por tratarse de una tecnología modular, económica, sin partes móviles, libre de ruido y fácilmente integrable en la edificación.

El Decreto DNU 70/2023 del Poder Ejecutivo Nacional de diciembre de 2023 (DNU, 2023), derogó los artículos 16 al 37 de la Ley 27.424, correspondientes a los siguientes capítulos:

- Capítulo V – Fondo Fiduciario para el Desarrollo de la Generación Distribuida
- Capítulo VI – Beneficios promocionales
- Capítulo VII – Régimen de fomento de la industria nacional

La eliminación de todas las herramientas de promoción previstas originalmente en la Ley 27.424, “Régimen de fomento a la generación distribuida de energía renovable integrada a la red eléctrica pública”, modificó drásticamente el espíritu de la ley.

Con anterioridad a la ley nacional, algunas jurisdicciones desarrollaron regulaciones para la generación distribuida. Santa Fe fue la primera provincia en habilitar la generación eléctrica distribuida en baja tensión para usuarios particulares, en el año 2013, y en 2024 adhirió a la Ley 27.424 (SF, 2024). Posteriormente se sumaron, en 2014 la provincia de Salta, que hasta el momento no adhirió a la Ley 27.424, y la provincia de Mendoza, que adhirió a la Ley 27.424 (MZA, 2018). En Videla et al. (2023) puede verse una descripción de las diferentes regulaciones sobre generación distribuida mediante energías renovables en las jurisdicciones del país con mayor desarrollo de esta tecnología.

En lo referente a cuestiones técnicas, la Asociación Electrotécnica Argentina (AEA) emitió en el año 2015 la Reglamentación AEA 90364-7-712 (AEA, 2015), “Sistemas de suministro de energía mediante paneles solares fotovoltaicos”, que no contempla sistemas con acumulación de energía. En la actualidad, se encuentra en etapa de desarrollo una actualización de dicha reglamentación, AEA 90364-7-712 Edición 02, que amplía el alcance de la Edición 2015 incluyendo sistemas de almacenamiento de energía. Asimismo, a mediados de 2025 la AEA emitió la reglamentación AEA 90364-8-2 “Instalaciones eléctricas de prosumidores en baja tensión” (AEA, 2025), basada en la IEC 60364-8-82:2022 (IEC, 2022), que se aplica a instalaciones conectadas o no a una red de distribución capaces de operar con fuentes de alimentación y/o unidades de almacenamiento locales.

Por su parte, el Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM) publicó, en el año 2023, la Norma IRAM 210025, Energía solar – Inversores bidireccionales para la conexión a la red de distribución – Requisitos generales (IRAM, 2023).

## **GENERACIÓN FOTOVOLTAICA DISTRIBUIDA EN LA CNEA**

A fin de contribuir a dar cumplimiento a lo establecido en las Leyes 27.191 y 27.424, desde el año 2021 la CNEA ejecuta Proyectos de Inversión (BAPIN) para la instalación de sistemas de generación FV distribuida en los Centros Atómicos Constituyentes (CAC) y Ezeiza (CAE), con el objetivo principal de proveer alrededor del 8 % del consumo eléctrico anual con fuentes renovables. En contribuciones anteriores (Durán et al., 2023; Durán et al., 2024) se presentaron los alcances, objetivos y contribuciones específicas a la sustentabilidad y eficiencia energética de dichos proyectos. En lo que sigue, se presentan los avances y novedades registrados entre mediados de 2024 y 2025.

Las restricciones presupuestarias imperantes en la administración pública nacional (APN), sumadas al cambio de autoridades, tuvieron como consecuencia el cierre de uno de los proyectos de inversión (el centrado en el Centro Atómico Constituyentes, CAC) sin haber cumplido la totalidad de los objetivos del mismo. En cuanto a la potencia instalada, la misma se encuentra en el nivel consignado en Durán et al., 2024, es decir en algo menos de la mitad de la potencia prevista originalmente. El segundo proyecto de inversión, centrado en el Centro Atómico Ezeiza (CAE), tuvo en 2025 presupuesto no nulo por primera vez, aunque el mismo se agotó en el pago de deudas con los proveedores, principalmente por la diferencia de cambio luego de la fuerte devaluación del peso ocurrida en diciembre de 2023.

No obstante, a la espera de un refuerzo presupuestario, se iniciaron expedientes de compra dirigidos a la adquisición de equipamiento de laboratorio y componentes para futuras instalaciones. Una de ellas corresponde a la propuesta de estudiar los beneficios bioclimáticos de instalaciones fotovoltaicas BIPV (integradas a la arquitectura), consignada en las contribuciones anteriores ya citadas. Para dicho estudio, se prevé la adquisición de sensores de temperatura y humedad (con el trámite de compra avanzado) y de una estructura metálica para una pequeña instalación piloto de 15 kW con orientación este-oeste, de manera que permita cubrir con sombras continuas producidas por la instalación un porcentaje importante de la cubierta plana del edificio que ocupa la guardia y el centro de cómputos del CAE. Asimismo, se encuentra en trámite además la adquisición de módulos FV (60 kW), e inversores FV (50 kW), así como de un trazador I-V que permitirá la caracterización eléctrica de módulos y cadenas de módulos *in-situ*.

### ***Análisis de la generación y simulación de un sistema FV de 20 kW***

El monitoreo de la energía generada resulta de interés al efecto de la evaluación de la contribución de los sistemas FV instalados a la satisfacción del consumo de los edificios de los Centros Atómicos de la CNEA, al mismo tiempo que permite estimar la eficiencia de estos sistemas y mantener alertas tempranas por posibles fallos.

Como ejemplo de esta tarea, en la Figura 3 se muestra la generación mensual de una de las instalaciones, que corresponde al sistema de 20 kW ubicado en el edificio 40 del CAC para los meses de enero a julio de 2025.

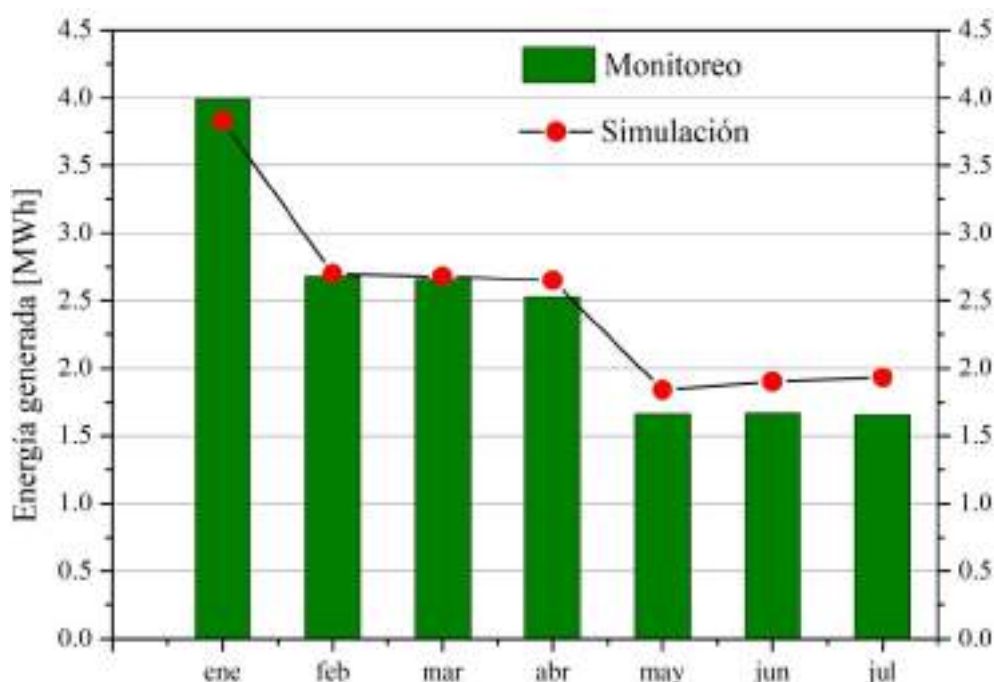


Figura 3: Generación mensual entre enero y julio de 2025 del sistema ubicado en el edificio 40 del CAC. La línea representa la energía obtenida por simulación mediante el programa PVSyst.

El monitoreo de la energía generada fue realizado a partir de los datos provistos por el inversor de dicha instalación, mientras que la simulación fue realizada utilizando el programa PVSyst a partir de datos de radiación solar global sobre plano horizontal registrados en el sitio.

Respecto a las diferencias entre generación y simulación observadas anteriormente (Durán et al., 2024), en este caso se revisaron en la simulación las distancias entre hileras de módulos FV, y además se incluyeron las producidas por la estructura edilicia circundante no consideradas en la citada contribución. Las diferencias entre la generación medida y la simulada observadas en los meses centrados en el solsticio de invierno (mayo, junio y julio), parecerían indicar que las pérdidas por sombras obtenidas por simulación no se ajustan completamente a la realidad. Se requiere por lo tanto revisar la ubicación y altura de la edificación contigua (o cercana) así como los desniveles en la cubierta, a fin de detectar el posible origen de las diferencias identificadas. Otra posible fuente de estas diferencias, a explorar, es la eventual falta de coincidencia en la configuración de las cadenas de módulos con la efectivamente instalada, así como en el modelado interno del módulo asumido por PVSyst.

#### ***Ensayo de módulos fotovoltaicos afectados por eventos meteorológicos***

Se aplicaron procedimientos basados en ensayos bajo norma desarrolladas por el Departamento Energía Solar de la CNEA para el ensayo de módulos FV (caracterización eléctrica e inspección visual por electroluminiscencia) con el objetivo de evaluar el estado de los módulos de una de las instalaciones (50 kW, Edificio 42, CAC) involucrados en los graves daños (ver Figura 4) producidos durante el evento meteorológico extremo ocurrido el 17/12/2023 (Durán et al., 2024). Los resultados obtenidos se presentan en las siguientes secciones.

#### ***Caracterización eléctrica***

Para medir la característica eléctrica corriente-tensión ( $I$ - $V$ ) se utilizó un simulador solar pulsado de gran área (*Large Area Pulsed Solar Simulator, LAPSS*) Alpha-Omega y una celda de referencia calibrada *Solar World*. La medición se realizó a temperatura ambiente ( $21 \pm 1$  °C) y una irradiancia de  $1 \text{ kW/m}^2$ .



Figura 4. Estado del ala oeste del sistema de 50 kW (Edificio 42, CAC) consecuencia del temporal del día 17/12/2023.

Se caracterizaron un total de 23 módulos marca Amerisolar de 445 W de potencia nominal, uno de los cuales no tiene uso previo y se utilizó como módulo de referencia. Las curvas  $I$ - $V$  obtenidas fueron corregidas a las condiciones normalizadas de temperatura ( $25^{\circ}\text{C}$ ), obteniéndose de las mismas los parámetros eléctricos  $P_{\text{MAX}}$  (potencia máxima),  $V_{\text{OC}}$  (tensión de circuito abierto),  $I_{\text{SC}}$  (corriente de cortocircuito) y  $FF$  (factor de forma). Se calcularon luego las desviaciones porcentuales de cada parámetro  $P$  respecto a los valores correspondientes al módulo de referencia ( $P_0$ ) según la expresión:

$$\Delta P = 100 * \frac{P - P_0}{P_0} \quad (1)$$

Los valores obtenidos se muestran en la Tabla 1. La tendencia que se observa es que básicamente todos los parámetros eléctricos de los módulos ensayados muestran valores inferiores (es decir diferencias porcentuales negativas) respecto a aquellos correspondientes al módulo de referencia, destacándose  $P_{\text{MAX}}$  con -4,3 % en promedio.

Las desviaciones estándar de los promedios son relativamente altas, sobre todo en el caso de  $P_{\text{MAX}}$  y  $FF$  (ver Tabla 1), lo cual se debe a casos puntuales de módulos donde se verifica una degradación arriba (o muy arriba) del promedio. Utilizando como criterio de exclusión una desviación porcentual de  $P_{\text{MAX}}$  mayor al 4 % (que excluye los módulos 6, 11, 12, 20, y 22), los parámetros mantienen la misma tendencia pero con una desviación estándar menor y por debajo del promedio con la excepción del  $FF$ , donde excluidos los casos más graves, en promedio se mantiene esencialmente invariante. Esto se puede ver en las cantidades identificadas con (\*) en la Tabla 1. La desviación porcentual de  $P_{\text{MAX}}$  utilizado como criterio de exclusión, se basa en el hecho de que este parámetro muestre una clara degradación respecto al correspondiente al módulo de referencia, y en particular es consistente con la tolerancia declarada por el fabricante para  $P_{\text{MAX}}$  ( $\pm 3\%$ ).

#### **Inspección visual por electroluminiscencia**

Se adquirieron imágenes de electroluminiscencia (EL) de los mismos 23 módulos Amerisolar caracterizados eléctricamente, utilizando valores cercanos a la corriente de cortocircuito ( $I_{\text{SC}}$ ) y al 10 % de la  $I_{\text{SC}}$  de acuerdo con lo indicado en la norma IEC TS 60904-13 (IEC, 2018).

El análisis exhaustivo de las imágenes está en curso al momento de escribir este trabajo. Se seleccionaron, como ejemplo, las imágenes de EL (adquiridas al 100 % de  $I_{\text{SC}}$ ) de los módulos en los que se observó mayor degradación en  $P_{\text{MAX}}$  (módulos 6, 11, 12, 20, y 22 consignados en la Tabla 1); dichas imágenes se muestran en la Figura 5. Una primera observación es que en todos los casos se encuentran defectos extendidos en una gran cantidad de celdas, defectos que van desde roturas múltiples

en los casos más extremos (módulos 6, 11, y 22) hasta fisuras que atraviesan el ancho de lado a lado. También se observa, en casos aislados, celdas con poca o nula emisión, indicativa de una pobre performance electrónica y por lo tanto eléctrica.

En términos generales, se encuentra una correlación entre el número de celdas con defectos y la degradación de  $P_{MAX}$ , siendo la misma (ver Tabla 1) para el módulo 6, -9,3 %, módulo 11, -27,4 %, módulo 12, -4,2 %, módulo 20, -4,5 %, y módulo 22, -9,2 %.

*Tabla 1: Desviaciones porcentuales, respecto al módulo de referencia, de los parámetros eléctricos de los módulos ensayados en condiciones estándar*

| Módulo               | $\Delta P_{MAX}$ | $\Delta V_{OC}$ | $\Delta I_{SC}$ | $\Delta FF$ |
|----------------------|------------------|-----------------|-----------------|-------------|
| 1                    | -2,1             | -1,4            | -0,9            | 0,1         |
| 2                    | -2,5             | -0,8            | -1,3            | -0,3        |
| 3                    | -3,1             | -1,2            | -2,3            | 0,4         |
| 4                    | -1,7             | -0,4            | -1,4            | 0,0         |
| 5                    | -3,0             | -1,2            | -2,8            | 0,9         |
| 6                    | -9,3             | -0,5            | -3,5            | -5,6        |
| 7                    | -2,8             | -0,4            | -1,9            | -0,5        |
| 8                    | -2,2             | -0,9            | -1,5            | 0,2         |
| 9                    | -3,2             | -1,3            | -2,4            | 0,5         |
| 10                   | -2,1             | -1,2            | -1,1            | 0,2         |
| 11                   | -27,4            | -2,3            | -8,1            | -19,1       |
| 12                   | -4,2             | -0,7            | -1,3            | -2,3        |
| 13                   | -3,1             | -0,3            | -1,3            | -1,6        |
| 14                   | -2,0             | -0,2            | -0,8            | -1,0        |
| 15                   | -1,1             | 0,7             | -2,2            | 0,4         |
| 16                   | -4,0             | -1,4            | -2,9            | 0,3         |
| 17                   | -1,9             | -0,8            | -1,1            | 0,1         |
| 18                   | -2,9             | -1,2            | -2,6            | 0,9         |
| 19                   | -3,4             | -1,2            | -2,6            | 0,3         |
| 20                   | -4,5             | -0,1            | -1,7            | -2,7        |
| 21                   | -3,1             | -0,9            | -2,3            | 0,1         |
| 22                   | -9,2             | -1,2            | -4,0            | -4,3        |
| Promedio             | -4,3             | -0,8            | -2,2            | -1,4        |
| Desviación Estándar  | 5,5              | 0,6             | 1,6             | 4,2         |
| Promedio*            | -2,5             | -0,8            | -1,7            | 0,1         |
| Desviación Estándar* | 0,9              | 0,6             | 0,8             | 0,6         |

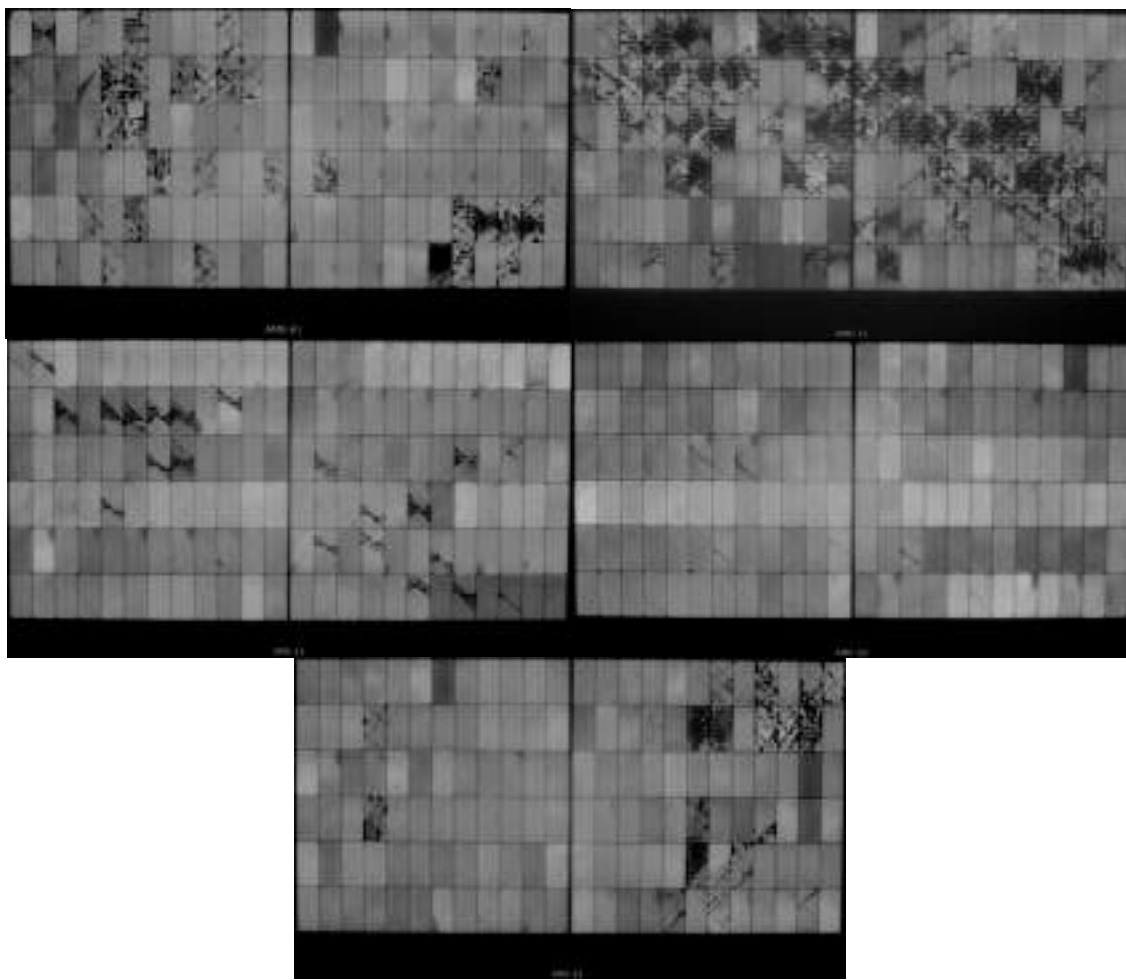


Figura 5. Imágenes de electroluminiscencia de 5 módulos Amerisolar para corrientes cercanas al 100 % de  $I_{sc}$  (ver texto). De izquierda a derecha y desde arriba hacia abajo, las imágenes corresponden a los módulos 6, 11, 12, 20, y 22.

### **Evaluación mecánica estructural**

Para la reconstrucción del ala oeste del sistema fotovoltaico de 50 kW previamente mencionado, y sobre la base de los datos de velocidad y dirección del viento obtenidos *in situ*, así como de las simulaciones realizadas, se definieron las condiciones de carga que guiarán el nuevo dimensionamiento estructural de la instalación. Actualmente se analizan dos alternativas principales:

1. Replicar el sistema de contrapesos existente, incrementando el peso por módulo a 140 kg
2. Avanzar en la construcción de una estructura metálica fijada directamente a la losa mediante tacos químicos, con disposición vertical de los módulos (*portrait*)

En ambos casos, los paneles serán fijados por el lado largo, conforme al criterio técnico establecido en Durán et al., 2024. Como alternativa se podrán considerar otras ubicaciones apropiadas y cercanas al inversor que potencialmente impliquen una menor carga dinámica debida al viento.

Cabe aclarar que en la instalación original los módulos FV estaban fijados mediante grampas por el lado corto (ingeniería de detalle realizada por la empresa contratista, sin especificaciones en el pliego), y que esta configuración es desaconsejada dado que tiene una menor resistencia a la carga del viento (JinKoSolar, 2025).

Por otra parte, la hipótesis planteada de una influencia importante en la velocidad del viento de la topografía del sitio de emplazamiento de los módulos en el ala oeste, ubicado en las cercanías de la torre del acelerador de iones pesados TANDAR del CAC, fue verificada a partir de la colaboración con el

Grupo AeroMat de la Gerencia Materiales de la Gerencia de Área Energía Nuclear de la CNEA la CNEA. Se realizaron cálculos aplicando las ecuaciones dadas en el Reglamento Argentino de Acción del Viento sobre las Construcciones (CIRSOC 102-2005), considerando además el denominado *efecto colina* para dar cuenta de la perturbación introducida por la torre del acelerador TANDAR, y utilizando CFD (*Computational Fluid Dynamics*) para simular las condiciones reales a partir de las ecuaciones de Navier-Stokes.

En ambos casos se verifica que la velocidad del viento proveniente de la dirección SO se ve sensiblemente incrementada por la topografía del sitio. Sin embargo, cabe destacar lo siguiente. La aplicación del reglamento CIRSOC da un máximo de aumento en la cercanía de la torre y una progresiva disminución a medida que aumenta la distancia a dicha torre, en forma simétrica a su geometría. Contrariamente, la aplicación de CFD resulta en una estela que se inicia poco antes de la cresta de la torre y se extiende hacia la zona donde se encontraban ubicados los módulos. En este último caso, el aumento de velocidad tiene un máximo del 37% (González, 2024).

## **DIFICULTADES ENCONTRADAS**

### ***Nueva falla en el inversor en el sistema del Instituto Dan Beninson***

El día 23/3/2025 volvió a fallar el seguidor C del inversor del sistema ubicado en el Instituto Dan Beninson (IDB) del CAE (ver Durán et al., 2024), el cual controlaba el paralelo de dos cadenas de 16 módulos cada una. La inspección de la instalación volvió a resultar en que no había problemas en el cableado y que las cadenas de módulos presentaban condiciones de funcionamiento normales, mientras que el seguidor C presentaba virtualmente un cortocircuito. Si bien desde el punto de vista de sus especificaciones técnicas el inversor (SMA Sunny Tripower X25, de 25 kW) estaba dentro de las condiciones de operación admitidas, se concluyó que la falla probable estaba relacionada con la fatiga de los semiconductores que manejan la potencia del seguidor C, aunque no puede descartarse que el problema haya sido una descarga atmosférica. A fin de prevenir la repetición de la misma falla, se modificó la configuración de las cadenas de módulos para tener una distribución más equilibrada de la potencia entre los 3 seguidores.

Se volvió a ejecutar la garantía del proveedor para el reemplazo del equipo. Su instalación se encuentra en trámite en el momento de escribir el presente trabajo.

### ***Problemas presupuestarios***

Los proyectos BAPIN a que hace referencia este trabajo corresponden a dos actividades presupuestarias de la CNEA. El proyecto centrado en el CAC ha recibido un flujo de recursos razonable entre 2022 y 2023, no tuvo ejecución en 2024 debido al cambio de la política de la institución en el marco de la fuerte restricción presupuestaria en la APN ya mencionada, y fue dado de baja en 2025. Paralelamente, el proyecto centrado en el CAE ha tenido un presupuesto nulo desde su creación hasta 2024. En 2025 el presupuesto asignado se agotó en el pago de deudas a proveedores y no impactó positivamente en las actividades asociadas al proyecto.

## **CONCLUSIONES**

La experiencia adquirida en el desarrollo de las actividades en la CNEA en generación distribuida por medio de energía solar fotovoltaica ha dado lugar a una serie de aprendizajes que se resumen a continuación.

Por un lado, resulta necesaria una correcta evaluación de las estructuras y contrapesos, teniendo en cuenta la topografía particular del sitio de la instalación FV y su influencia en la carga mecánica dada por el viento. En particular, se observa como conveniente el uso de fijaciones por los lados largos de los módulos FV en los casos de módulos de más de 2 m de largo, que representan la tendencia dominante en el mercado. La aparición de fisuras en los módulos FV puede deberse a las importantes oscilaciones de los módulos en presencia de vientos, incluso leves, consecuencia de sistemas de fijación no apropiados.



Asimismo, la evaluación y seguimiento de la energía generada instalaciones FV mediante comparaciones con simulaciones permiten detectar fallas prematuramente, definir necesidad de limpieza y analizar pérdidas por sombras, en algunos casos evitables con un diseño apropiado.

Se considera conveniente también definir procedimientos de recepción de módulos FV mediante ensayos eléctricos y observación por electroluminiscencia, a fin de detectar parámetros fuera de rango.

En referencia a los proyectos BAPIN mencionados, los mismos tienen como objeto el cumplimiento de las leyes nacionales vigentes para la generación de energía a partir de fuentes renovables, a la vez que contribuyen a la concreción de los compromisos ambientales asumidos por el país, y a la adopción de la tecnología solar FV en aplicaciones urbanas. También asumen la responsabilidad institucional de la CNEA como gran consumidor de energía eléctrica, al mismo tiempo que genera conocimiento local, y forma recursos humanos especializados.

Las restricciones presupuestarias impusieron un freno importante a la actividad desarrollada en el último año, esperándose una reversión al menos parcial de esta situación en el corto plazo.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración y aportes de Sebastián Muñoz, Javier Fernández Vázquez, Marcelo Ramírez, José María Olima, Carlos Rinaldi, Alejandro Krautner, Oscar Romanelli, Agustín Marconi, y Juan N. Cox, en la realización del presente trabajo. La colaboración del grupo AeroMat de la Gerencia Materiales de la CNEA, en particular de su director Lucio Ponzoni, y de Fernando Espósito del CAE, es merecedor también del agradecimiento de los autores.

## REFERENCIAS

- AEA (2015). AEA 90364-7-712. Sistemas de suministro de energía mediante paneles solares fotovoltaicos. Edición 2015. Asociación Electrotécnica Argentina. Dirección URL: <https://aea.org.ar/producto/aea-90364-7-712-lugares-y-locales-especiales-sistemas-de-suministro-de-energia-mediante-paneles-solares-fotovoltaicos-edicion-2015/>
- AEA (2025). AEA 90364-8-2 Eficiencia energética en las instalaciones eléctricas de baja tensión. Sección 2 – Prosumidores en BT. Edición 2025. Asociación Electrotécnica Argentina. Dirección URL: <https://aea.org.ar/producto/aea-90364-8-eficiencia-energetica-en-las-instalaciones-electricas-de-baja-tension-seccion-2-prosumidores-de-bt/>
- CAMMESA (2025). Informe Anual 2024. Mercado Eléctrico Mayorista. Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico. Dirección URL: <https://cammesaweb.cammesa.com/informes-y-estadisticas/>
- CIRSOC (2005). CIRSOC 102-2005. Reglamento Argentino de Acción del Viento sobre las Construcciones. Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles.
- DNU (2023). Bases para la Reconstrucción de la Economía Argentina. Poder Ejecutivo Nacional, Decreto de Necesidad y Urgencia N° 70/2023, 21 de diciembre de 2023. Dirección URL: <https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/decreto-70-2023-395521>
- Durán J.C., Eyra I., Godfrin E.M., Krautner A., Martínez Bogado M., Plá J., Raggio D., Videla M. (2023). Avances en proyectos de generación fotovoltaica distribuida en la CNEA: un aporte al cumplimiento de las leyes 27.191 y 27.424. Acta de la XLV Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente 10, 134-143.
- Durán J.C., Eyra I., Krautner A., Plá J., Videla M., Bolzi C.G., Pérez J.I., Martínez Bogado M. (2024). Avances en proyectos de inversión para la generación eléctrica distribuida con sistemas fotovoltaicos en la CNEA. Acta de la XLVI Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente 11, 126-137.
- EE (2025). Provincia de Buenos Aires licita 5 nuevos parques solares bajo el PROINGED. Energía Estratégica, 25 de Julio de 2025. Dirección URL: <https://www.energiaestrategica.com/provincia-de-buenos-aires-licita-5-nuevos-parques-solares-bajo-el-proinged/>

- González S.E. (2024). Análisis del efecto del viento en el desprendimiento de paneles solares en el techo del TANDAR del Centro Atómico Constituyentes. Trabajo final, Ingeniería Ambiental, Departamento de Ciencia y Tecnología, Universidad Nacional de Tres de Febrero (UNTREF).
- Haegel N.M. et al. (2023). Photovoltaics at multi-terawatt scale: Waiting is not an option. *Science* 380, 6640, 39-42. <https://doi.org/10.1126/science.adf6957>
- IEA (2025). Snapshot of Global PV Markets 2025. International Energy Agency - Photovoltaic Power Systems Programme. April 2025. Dirección URL: <https://iea-pvps.org/snapshot-reports/snapshot-2025/>
- IEC (2018). IEC TS 60904-13:2018. Photovoltaic devices - Part 13: Electroluminescence of photovoltaic modules. International Electrotechnical Commission. Dirección URL: <https://webstore.iec.ch/en/publication/26703>
- IEC (2022). IEC 60364-8-82:2022. Low-voltage electrical installations - Part 8-82: Functional aspects - Prosumer's low-voltage electrical installations. International Electrotechnical Commission. Dirección URL: <https://webstore.iec.ch/en/publication/66287>
- IRAM (2023). IRAM 210025. Energía solar. Inversores bidireccionales para la conexión a la red de distribución. Requisitos generales. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Dirección URL: <https://catalogo.iram.org.ar/#/normas/detalles/13057>
- Jäger-Waldau A. (2025). Snapshot of photovoltaics - March 2025. *EPJ Photovoltaics* 16, 22. <https://doi.org/10.1051/epjpv/2025012>
- JinkoSolar (2025). JinKoSolar Photovoltaic Modules - Installation Manual. Dirección URL: <https://www.jinkosolar.com/en/site/dwinstall>
- MECON (2025). Generación Distribuida en Argentina. Reporte Anual 2024. Ministerio de Economía. Dirección URL: [https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/reporte\\_anual\\_2024.pdf](https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/reporte_anual_2024.pdf)
- MZA (2018). Ley 9084 – Régimen de Fomento a la Generación Distribuida de Energía Renovable Integrada a la Red Eléctrica Pública, Provincia de Mendoza. Dirección URL: <https://argentinambiental.com/legislacion/mendoza/ley-9084-regimen-fomento-la-generacion-distribuida-energia-renovable-integrada-la-red-electrica-publica/>
- PROINGED (2025). Proyectos. Programa Provincial de Incentivos a la Generación de Energía Distribuida (PROINGED). Subsecretaría de Energía, Ministerio de Infraestructura y Servicios Públicos, Provincia de Buenos Aires. Dirección URL: <https://www.proinged.org.ar/proyectos/>
- REN21 (2013). Renewables 2013 Global Status Report, editado por REN21, Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, ISBN 978-3-9815934-0-2. Dirección URL: [https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2013\\_Full-Report\\_English.pdf](https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2013_Full-Report_English.pdf)
- REN21 (2024). Renewables 2024 Global Status Report, Energy Supply, editado por REN21, Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, ISBN 978-3-948393-15-1. Dirección URL: [https://www.ren21.net/gsr2024\\_SUPPLY\\_report/](https://www.ren21.net/gsr2024_SUPPLY_report/)
- SF (2024). Prosumidores. Ley Provincial N.º 14259, Provincia de Santa Fe. Dirección URL: <https://www.santafe.gob.ar/boletinoficial/ver.php?seccion=2024/2024-04-26ley14259-2024.html>
- Videla M., Krautner A., Eyra I., Durán J.C., Plá J. (2023). Estado actual del desarrollo de la generación fotovoltaica distribuida en Argentina. *Ciencia e Investigación*, Tomo 73, N° 1, 54-71. Dirección URL: <https://aargentinapciencias.org/publicaciones/revista-cei-3/>

## **PROGRESS AND CHALLENGES IN THE IMPLEMENTATION OF DISTRIBUTED PHOTOVOLTAIC GENERATION AT THE CNEA**

**ABSTRACT:** Photovoltaic solar technology has become a key player in the global transition to a clean and sustainable electricity grid. Argentina has experienced sustained growth in this sector, driven by national and provincial laws and regulations, in addition to its international commitments to reduce emissions and combat climate change. The National Atomic Energy Commission (CNEA) has contributed in this area through investment projects in distributed photovoltaic generation systems. These projects seek to comply with National Laws 27.191, promoting renewable sources, and 27.424, regulating distributed generation. One of their main objectives is to install photovoltaic systems connected to the low-voltage grid in CNEA public buildings, with the goal of supplying approximately 8% of annual electricity consumption. This paper presents the progress made in these projects over the

past year, including research activities, changes in legislation, and future prospects. The challenges faced are also addressed. These projects are expected to continue, strengthening the contribution of the public sector through the CNEA to the energy transition of the country.

**Keywords:** Photovoltaic solar energy, distributed generation, energy transition, institutional environmental responsibility.

## CELDA SOLARES DE PEROVSKITAS PARA USOS EN DISPOSITIVOS MÓVILES Y APLICACIÓN EN INTERIORES

**Victoria A. Gómez Andrade<sup>1,2</sup>, Nina Bonnet<sup>1,3</sup>, Manuel Racca<sup>1,3</sup>, Camila Colomb<sup>1,3</sup>,  
Micaela Perez<sup>1</sup>, Francisco N. Calderón Acosta<sup>1</sup>, Martha Díaz Salazar<sup>2,4</sup>, M. Dolores Perez<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Departamento Física de la Materia Condensada – Centro Atómico Constituyentes - GIyA – CNEA

<sup>2</sup>Instituto de Nanociencia y Nanotecnología (INN) – CONICET - CNEA

<sup>3</sup>Departamento de Física – FCEyN – UBA

<sup>4</sup>Departamento Energía Solar - Centro Atómico Constituyentes - GIyA – CNEA

Tel. 011-6772-7129 e-mail: [mariadoloresperez@cnea.gob.ar](mailto:mariadoloresperez@cnea.gob.ar)

**RESUMEN:** Este trabajo tuvo como objetivo desarrollar y evaluar celdas solares de perovskita para aplicaciones fotovoltaicas en interiores, con potencial uso en dispositivos portátiles y sistemas IoT. Se estudiaron dos composiciones activas, MAPI y triple catión, caracterizando espectralmente dos lámparas LED de baja potencia (RB y MW) y fabricando celdas en configuración n-i-p mediante un método de un solo paso. La morfología de las películas se analizó por microscopía electrónica de barrido, y el desempeño fotovoltaico se evaluó mediante curvas *J-V* bajo iluminación estándar AM 1.5G y en condiciones de baja irradiancia (200–1000 lux). Los resultados evidenciaron que ambas perovskitas logran eficiencias de conversión de potencia superiores a las medidas a 1 sol, atribuibles a su buena adaptación espectral a fuentes artificiales y baja recombinación no radiativa. La composición MAPI presentó mayores eficiencias globales gracias a su mayor fotocorriente y tamaño de grano, mientras que la de triple catión se vio limitada por menores factores de forma. Las lámparas RB ofrecieron un mejor desempeño que las MW, destacando la importancia del espectro de emisión. En conclusión, estas celdas muestran un alto potencial para alimentar dispositivos autónomos y optimizar la recolección de energía en entornos de baja iluminación.

**Palabras clave:** celdas solares de perovskita, iluminación de interiores, IoT

### INTRODUCCIÓN

La transición hacia fuentes de energía renovable constituye un desafío central para enfrentar la crisis climática y diversificar las matrices energéticas a nivel global. En este contexto, las celdas solares de perovskita (CSP) han emergido como una tecnología fotovoltaica de vanguardia, con eficiencias de conversión superiores al 25% y con un potencial de fabricación a bajo costo en comparación con tecnologías convencionales basadas en silicio (Song et al., 2017 y Guo et al., 2017). Su alta versatilidad y compatibilidad con procesos de baja temperatura y bajo consumo energético las posicionan como una alternativa estratégica para ampliar el acceso a la generación eléctrica limpia y descentralizada.

Por otra parte, el internet de las cosas, “*Internet of Things*” IoT es un sistema de dispositivos informáticos conectados a Internet, máquinas mecánicas y digitales, objetos o incluso animales o personas que portan identificadores únicos que pueden recopilar y transferir datos a través de una red sin necesidad de interacciones de persona a persona o de persona a computadora. Con una estimación de alrededor de 75 mil millones de dispositivos IoT para 2025, (Mathews et al., 2019 y Guo et al., 2023) se prevé que IoT se expanda rápidamente en los próximos años. Dado que la mayoría de los sensores de IoT funcionan a través de redes inalámbricas, la creación de un sistema de energía fuera de la red permitirá una fácil integración de los sensores y puede reducir los costos de instalación. Las baterías son ahora la principal fuente de energía portátil para los sensores de IoT, pero cargar y reemplazar las



Esta obra está bajo Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

baterías generalmente conduce a un mayor consumo de energía y perturbaciones en la transferencia de datos. En este sentido, los dispositivos fotovoltaicos de interiores o “*indoor photovoltaics*” (IPV, por sus siglas en inglés) móviles, utilizan de manera eficiente la luz artificial en espacios donde no se puede aprovechar la luz solar (oficina, casa, entre otras). La energía generada por la IPV puede suministrar energía confiable y permitir comunicaciones fluidas en redes inalámbricas de IoT.

Las celdas solares de perovskitas se están consolidando como las candidatas más prometedoras para aplicaciones fotovoltaicas en interiores por diversas razones fundamentales. En primer lugar, presentan una excelente capacidad de adaptación espectral a las fuentes de luz artificial comunes en ambientes interiores —como LED y lámparas fluorescentes—, lo que les permite mantener altos niveles de eficiencia bajo condiciones de baja irradiancia (Guo et al., 2023 y Wang et al., 2021). Además, sus altos coeficientes de absorción y su capacidad para funcionar eficientemente a tensiones más altas en comparación con otras tecnologías, como las celdas orgánicas o de silicio amorfo, las posicionan como una opción técnicamente ventajosa (Lee et al., 2019 y Kim et al., 2019).

Por otro lado, las perovskitas pueden ser procesadas mediante técnicas de bajo costo y temperatura relativamente baja, lo cual es compatible con sustratos flexibles y favorece su integración en dispositivos portátiles, sensores IoT y otros sistemas electrónicos de baja potencia (Wojciechowski et al., 2022). Esta versatilidad en el diseño y fabricación también abre la puerta a aplicaciones comerciales emergentes, como etiquetas inteligentes, sistemas de monitoreo autónomos y dispositivos electrónicos autosuficientes (Mathews et al., 2019).

Finalmente, su rápido desarrollo científico ha permitido superar en poco tiempo muchas de las limitaciones iniciales en términos de estabilidad y toxicidad, gracias a avances en encapsulado, composiciones libres de plomo y estructuras arquitectónicas más robustas (Pecunia et al., 2021). Todo esto convierte a las perovskitas en una plataforma tecnológicamente atractiva y económicamente viable para el desarrollo de soluciones fotovoltaicas eficientes y sostenibles en entornos interiores.

El estudio de las celdas solares para el aprovechamiento de iluminación interior resulta cada día más relevante por lo que muchos grupos de investigación a nivel mundial se vuelcan a esta línea de trabajo. Diversos tipos de dispositivos fotovoltaicos diseñados para IPV han sido reportados, con respuesta a fuentes de luz artificial de distintas intensidades y espectros de emisión. A diferencia de las celdas solares para exteriores, que se evalúan bajo una condición estándar bien definida (AM1.5G, 100 mW/cm<sup>2</sup>), los IPV carecen hasta el momento de un protocolo de medición estandarizado. En su lugar, se han empleado múltiples fuentes lumínicas para estimar la eficiencia de conversión de potencia (PCE) en estos dispositivos (Li et al., 2015). En este contexto, el desarrollo de metodologías precisas y reproducibles para la caracterización de IPV resulta esencial para una evaluación confiable de su desempeño.

En este trabajo inicialmente presentaremos la caracterización sistemática de las lámparas utilizadas para la posterior caracterización de las celdas solares en condiciones de iluminación en interiores. Para el estudio de la eficiencia de las celdas bajo condiciones de interior se adquirieron dos lámparas de baja potencia denominadas RB y MW por sus siglas en inglés (*blue-red* y *mint-white*, respectivamente). Estas lámparas son comúnmente utilizadas para los cultivos en invernaderos debido a la mejor respuesta fotosintética de las plantas. En estos entornos, donde se requiere ventilación forzada para el control térmico, se plantea la posibilidad de aprovechar la energía lumínica residual para alimentar ventiladores mediante celdas fotovoltaicas, optimizando así el rendimiento energético del sistema global.

Asimismo, se presentará el desarrollo de celdas solares de perovskitas implementando dos materiales de naturaleza diferente, MAPbI<sub>3</sub> y Cs<sub>0.05</sub>(FA<sub>0.83</sub>MA<sub>0.17</sub>)<sub>0.95</sub>Pb(I<sub>0.83</sub>Br<sub>0.17</sub>)<sub>3</sub>. Se presentará la respuesta de ambos dispositivos bajo iluminación estándar AM1.5G y bajo iluminación artificial de baja potencia (200-1000lux).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Estudio de las lámparas de interior

Los espectros de las lámparas RB y MW fueron medidos paralelamente con el luxómetro y el espectrómetro de manera de calibrar la potencia de las lámparas para la distinta iluminancia expresada en cantidad de “lux”. En la Figura 1a se presentan los espectros normalizados de ambas lámparas y en la Figura 1b se presenta la correlación entre iluminancia y potencia obtenida al integrar cada espectro para las distintas intensidades de iluminación. Para ambas lámparas se observa una correlación lineal de la irradiancia con la iluminancia. Cabe destacar que, para un mismo valor de iluminancia, la lámpara RB ofrece mayor potencia que la MW debido principalmente a las diferencias en la zona de respuesta del luxómetro. El rango de máxima respuesta del luxómetro utilizado se encuentra en 500-600nm que es precisamente la zona de mayor intensidad de la lámpara MW y donde la lámpara RB tiene un mínimo. Es por esto que, el luxómetro como instrumento, tiende a subestimar la potencia de la lámpara RB debiendo aumentar la potencia de esta para obtener la misma iluminancia.

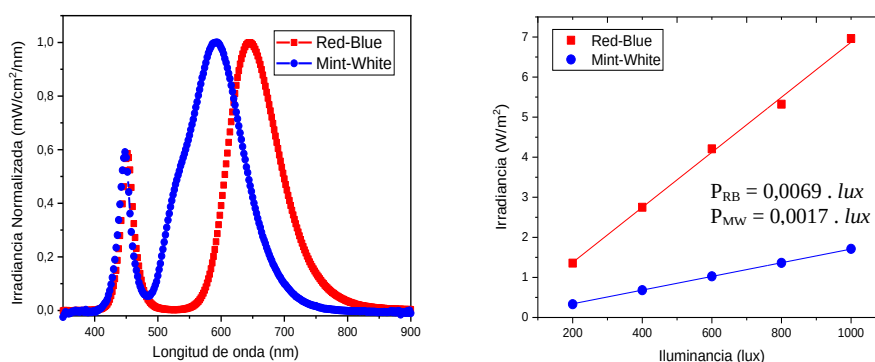


Figura 1: a) Espectros de las lámparas RB y MW; b) calibración de la irradiancia correspondiente para cada valor de iluminancia de ambas lámparas.

### Celdas solares de perovskitas

Se fabricaron celdas solares de perovskitas en la configuración n-i-p utilizando MAPbI<sub>3</sub> y Cs<sub>0.05</sub>(FA<sub>0.83</sub>MA<sub>0.17</sub>)<sub>0.95</sub>Pb(I<sub>0.83</sub>Br<sub>0.17</sub>)<sub>3</sub> como materiales ópticamente activos según el procedimiento descrito en la sección experimental. La estructura de celda se presenta como en el esquema de la Figura 2a. Por simplicidad, de aquí en más se denominará “MAPI” y perovskita “triple catión” a ambos materiales respectivamente. El desempeño de estas bajo iluminación estándar AM1.5G está presentada en la Figura 2b donde se observa la respuesta J-V de las celdas iluminadas.

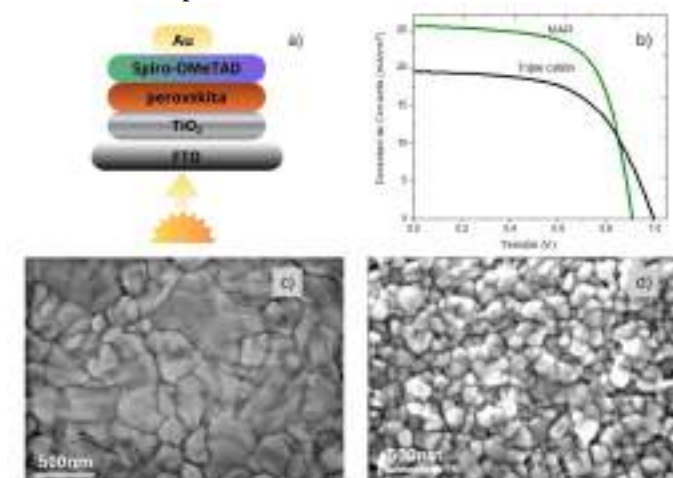


Figura 2: a) Esquema: Estructura de capas de las celdas solares b) Curvas J-V bajo iluminación estándar AM1.5G a potencia de 1 sol de irradiancia de celdas solares empleando perovskitas MAPI y triple catión. Imágenes SEM de la superficie superior de las películas de perovskita. c) MAPI d) Triple catión

**Tabla 1: Parámetros eléctricos de las celdas extraídos de la respuesta J-V bajo 1 sol de iluminación estándar AM1.5G para ambos materiales de perovskita. Voc: tensión de circuito abierto; Jsc: corriente de cortocircuito; FF: factor de forma; PCE: eficiencia de fotoconversión.**

| Perovskita    | Voc (V) | Jsc (mA/cm <sup>2</sup> ) | FF (%) | PCE (%) |
|---------------|---------|---------------------------|--------|---------|
| MAPI          | 0,91    | 25,60                     | 66,32  | 15,37   |
| Triple catión | 0,99    | 19,50                     | 58,57  | 11,30   |

La celda de perovskita MAPI presenta una eficiencia significativamente superior a la de triple catión, atribuible principalmente a su mayor fotocorriente. Aunque la tensión a circuito abierto (Voc) de la celda de triple catión es más elevado y cercano a 1 V, este incremento se produce a expensas de una reducción en el factor de forma (FF), consecuencia de una mayor resistencia en serie y de un aumento en los procesos de recombinación. Las micrografías obtenidas por microscopía electrónica de barrido (SEM), mostradas en las Figuras 2c y 2d, revelan que el tamaño de grano de la perovskita MAPI ( $\approx 400$  nm) es sustancialmente mayor que el de la perovskita de triple catión ( $\approx 200$  nm). Esta diferencia se asocia a la mayor sensibilidad de la síntesis de la perovskita de triple catión a la humedad ambiente, lo que dificulta la obtención de películas de alta calidad y mayor tamaño de grano. Un menor tamaño cristalino implica una mayor área superficial y, en consecuencia, un mayor número de defectos en los bordes de grano. Dichos defectos actúan como centros de recombinación no radiativa, reduciendo la cantidad de fotoportadores colectados y, por ende, la corriente de cortocircuito (Jsc), lo que repercute negativamente en la eficiencia de conversión de potencia. Siendo que las bandas prohibidas de ambos materiales resultan en valores muy similares (1,59 y 1,61 eV para MAPI y Triple Catión respectivamente) no podemos concluir que la diferencia en la mayor fotocorriente se deba a las propiedades electrónicas de los materiales sino a las características morfológicas que facilitan la colección de portadores en lugar de su generación.

#### **Respuesta de las celdas bajo iluminación de interiores**

Ambos dispositivos fotovoltaicos fueron evaluados bajo condiciones de iluminación interior utilizando las lámparas RB y MW previamente descritas, variando la intensidad de iluminación incidente. Las curvas J-V correspondientes se presentan en la Figura 3: las partes (a) y (b) muestran los resultados para la celda con perovskita MAPI, mientras que las partes (c) y (d) corresponden a la celda con perovskita triple catión. Los parámetros fotovoltaicos extraídos de estas curvas se resumen en las Tablas 2 y 3, para ambas composiciones y tipos de lámpara.



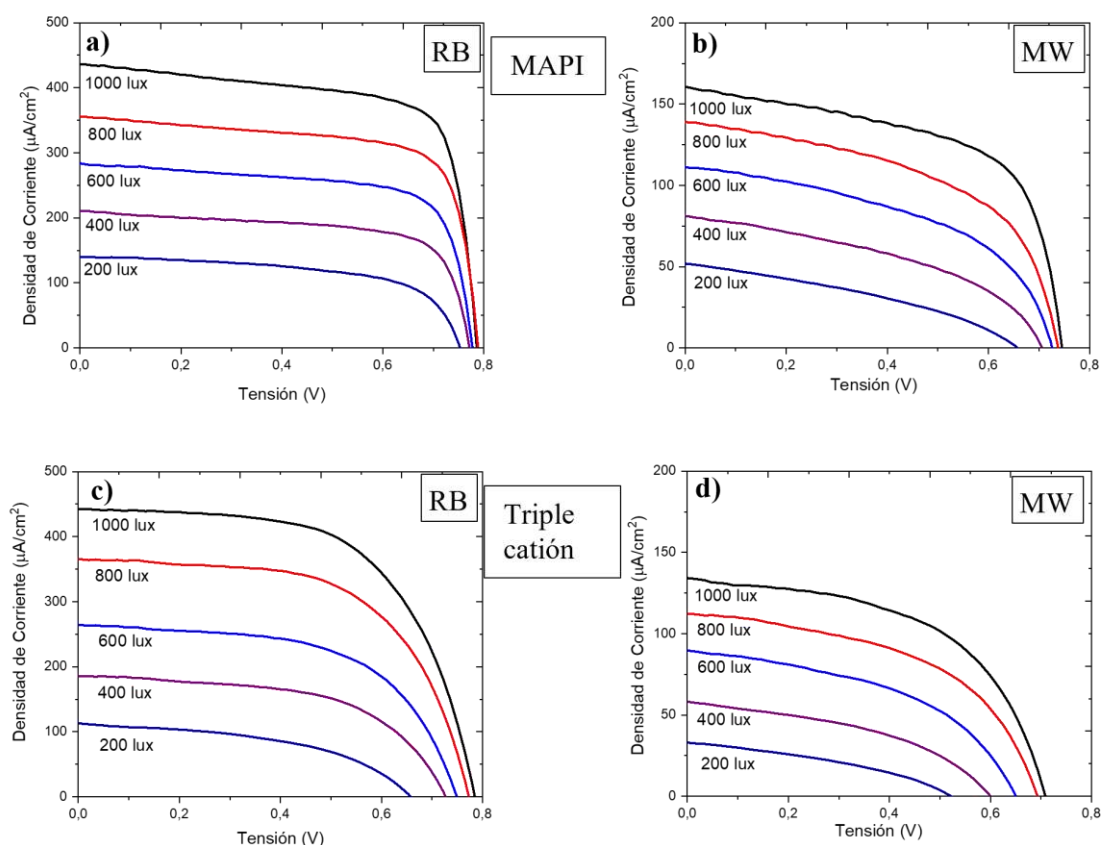


Figura 3: Curvas densidad de corriente vs. tensión para distintos niveles de iluminación. a) Celda MAPI bajo iluminación con lámpara RB, b) Celda MAPI bajo iluminación con lámpara MW, c) Celda Triple Cation bajo iluminación con lámpara RB, d) Celda Triple Cation bajo iluminación con lámpara MW.

Se observa que, bajo cualquier condición de iluminación interior, las eficiencias de conversión de potencia (PCE) de ambas perovskitas superan ampliamente a las registradas bajo la irradiancia estándar de un sol (AM1.5G,  $100 \text{ mW}/\text{cm}^2$ ). Este comportamiento se atribuye principalmente a la alta movilidad de portadores de carga en condiciones de bajo flujo fotónico (Kumari et al., 2024, Kang et al., 2024), favorecida por la baja densidad de defectos y la limitada recombinación no radiativa. Asimismo, las perovskitas muestran una respuesta espectral más adecuada en el rango de emisión de las fuentes de iluminación interior, siendo esta más favorable bajo la lámpara RB que bajo la lámpara MW.

El espectro de la fuente lumínica influye directamente en el factor de forma (FF) de las celdas solares, al modificar los procesos de recombinación y transporte de portadores en el dispositivo. Bajo la lámpara RB, cuyo espectro presenta máximos coincidentes con las bandas de absorción de la perovskita, el FF tiende a incrementarse. Esto se explica porque las longitudes de onda óptimas favorecen tanto la generación como la extracción eficiente de portadores de carga, reduciendo las pérdidas por recombinación.

En contraste, el espectro más amplio de la lámpara MW incluye longitudes de onda menos eficientemente absorbidas o que promueven mayores procesos de recombinación, lo cual conduce a una disminución del FF. En consecuencia, la distribución energética de iluminación afecta el equilibrio entre la generación y la recombinación de portadores, alterando la forma de la curva  $J$ - $V$  y reduciendo el FF. Si bien la lámpara RB emite una mayor potencia radiante, al comparar condiciones de iluminancia equivalente (lux) se observa en general una respuesta superior de las celdas bajo esta fuente, reflejada en factores de forma más altos respecto a los obtenidos con la lámpara MW. En este último caso, la reducción del FF impacta negativamente en la eficiencia global.

En particular, la celda con perovskita MAPI exhibe un incremento de eficiencia desde 35,85 % hasta 48,49 % al disminuir la iluminancia de 1000 a 200 lux bajo la lámpara RB. Sin embargo, esta tendencia se invierte con la lámpara MW, donde la eficiencia desciende de 43,03 % a 38,84 % al reducir la irradiancia. En el caso de la celda con perovskita de triple catión, la eficiencia decrece con la iluminancia para ambas lámparas, siendo la disminución más pronunciada bajo la fuente MW, fenómeno asociado principalmente a la reducción del  $V_{oc}$ . La correlación entre el  $V_{oc}$  y, por consiguiente, los procesos de recombinación con los diferentes espectros de las lámparas, así como la influencia de la irradiancia emitida, requiere un análisis más profundo que considere el campo óptico en las capas constitutivas, la movilidad de portadores y las pérdidas resistivas tanto en el volumen (*bulk*) como en las interfaces.

Por otro lado, la densidad de corriente de cortocircuito muestra una dependencia lineal con la intensidad de iluminación, como se puede apreciar en la Figura 4. Existe una correlación directa entre la potencia radiante (en  $W/m^2$ ) y el valor absoluto de  $J_{sc}$ . Por ejemplo, una irradiancia de  $1,38 W/m^2$  (correspondiente a 200 lux con la lámpara RB) genera una  $J_{sc}$  de  $0,143 mA/cm^2$ , mientras que  $1,7 W/m^2$  (equivalente a 1000 lux con la lámpara MW) da lugar a una  $J_{sc}$  de  $0,162 mA/cm^2$ . Esto indica que, a potencias comparables, ambas fuentes de iluminación generan corrientes similares, validando la linealidad del comportamiento fotoeléctrico en el régimen de baja iluminación.

*Tabla 2: Parámetros de celda extraídos de la respuesta J-V bajo distintas potencias de iluminación de las lámparas RB y MW de la celda solar conteniendo perovskita MAPI.*

| Lámpara | LUX  | $V_{oc}$ (V) | $J_{sc}$ ( $mA/cm^2$ ) | FF (%) | PCE (%) |
|---------|------|--------------|------------------------|--------|---------|
| RB      | 1000 | 0,779        | 0,440                  | 72,77  | 35,85   |
|         | 800  | 0,779        | 0,359                  | 73,50  | 38,61   |
|         | 600  | 0,765        | 0,287                  | 71,75  | 37,46   |
|         | 400  | 0,765        | 0,212                  | 70,52  | 41,53   |
|         | 200  | 0,737        | 0,143                  | 62,65  | 48,49   |
| MW      | 1000 | 0,737        | 0,162                  | 61,88  | 43,03   |
|         | 800  | 0,737        | 0,140                  | 54,87  | 41,43   |
|         | 600  | 0,723        | 0,113                  | 53,70  | 42,54   |
|         | 400  | 0,709        | 0,082                  | 47,32  | 40,25   |
|         | 200  | 0,653        | 0,052                  | 37,81  | 38,84   |

*Tabla 3: Parámetros de celda extraídos de la respuesta J-V bajo distintas potencias de iluminación de las lámparas RB y MW de la celda solar conteniendo perovskita triple catión.*

| Lámpara | LUX  | $V_{oc}$ (V) | $J_{sc}$ ( $mA/cm^2$ ) | FF (%) | PCE (%) |
|---------|------|--------------|------------------------|--------|---------|
| RB      | 1000 | 0,779        | 0,445                  | 61,16  | 30,46   |
|         | 800  | 0,765        | 0,368                  | 61,40  | 32,49   |

|    |      |       |       |       |       |
|----|------|-------|-------|-------|-------|
|    | 600  | 0,737 | 0,266 | 59,90 | 27,86 |
|    | 400  | 0,723 | 0,187 | 57,53 | 28,29 |
|    | 200  | 0,653 | 0,113 | 48,90 | 26,67 |
| MW | 1000 | 0,695 | 0,134 | 55,89 | 30,42 |
|    | 800  | 0,695 | 0,115 | 50,97 | 29,85 |
|    | 600  | 0,638 | 0,090 | 48,05 | 26,82 |
|    | 400  | 0,596 | 0,059 | 43,29 | 22,22 |
|    | 200  | 0,512 | 0,033 | 39,26 | 20,02 |

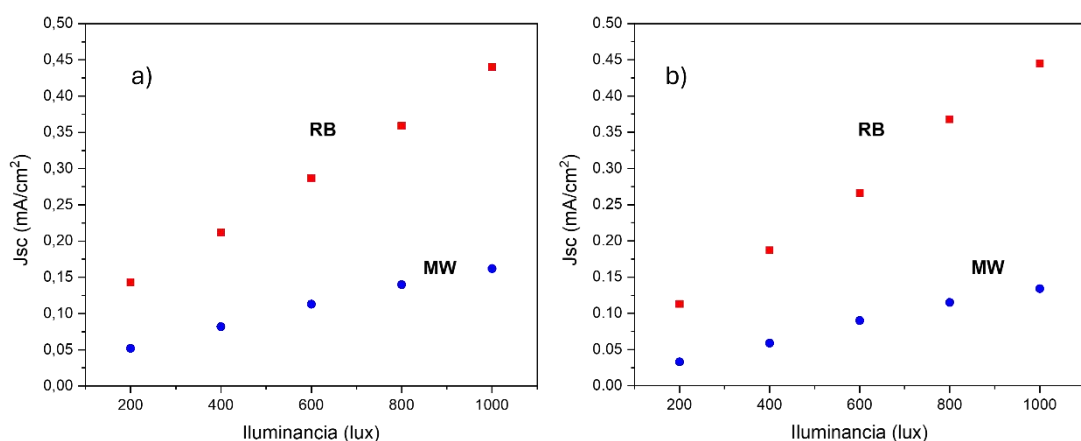


*Figura 4: Dependencia de la corriente de cortocircuito con la iluminancia expresada en lux para ambas lámparas. a) celda solar conteniendo MAPI y b) celda solar conteniendo perovskita de triple catión.*

El desarrollo de celdas solares de perovskita para aplicaciones en interiores ha avanzado, a su vez, más rápidamente que el destinado a operación en exteriores. (Dagar et al., 2018, Cheng et al., 2019, Le et al., 2024, Muhammad et al., 2022 y Dong et al., 2019) No obstante, los resultados no siempre son fácilmente comparables debido a las diferentes condiciones de medida, tales como la iluminancia (200–1000 lx) y el espectro (LED de luz blanca con distintas temperaturas de color o lámparas fluorescentes) (Lübke et al., 2021). El dispositivo mejor certificado hasta la fecha alcanzó una PCE del 44,7 % bajo 1000 lx ( $338,2 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ ) de una lámpara fluorescente U30, (Ma et al., 2024) atribuida a una pasivación dual mediante una solución de yoduro de oleilamonio en cloroformo. Otro dispositivo de alta eficiencia se desarrolló mediante pasivación doble con aditivos basados en guanidinio y feniletilamina, alcanzando una PCE del 40,1 % bajo LED blanco cálido con 824,5 lux ( $301,6 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ ) (He et al., 2021). Los dispositivos reportados por Li et al. lograron 42,1 % y 39,2 % al ser iluminados con LED blanco de 3000 K bajo 1000 lux ( $280 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ ) y 500 lux, respectivamente (Li et al., 2024). En nuestro trabajo, fabricamos dispositivos en arquitectura n-i-p (vidrio/FTO +  $\text{TiO}_2$  mesoporosa como capa electrónica, perovskita como capa activa (MAPI o triple catión), Spiro-MeOTAD como HTL y Au como electrodo) y caracterizamos espectralmente dos lámparas LED de baja potencia (denominadas RB y MW) para correlacionar iluminancia con potencia de iluminación; con esta metodología demostramos que, además de la iluminancia, la composición espectral tiene un papel crítico en el desempeño. Bajo iluminación interior nuestros dispositivos alcanzaron eficiencias de conversión de potencia muy superiores a las medidas bajo 1 sol (%PCE AM1.5G : MAPI 15,37 %; triple catión 11,30 %), siendo la MAPI la que

presentó el mejor comportamiento global, alcanzando hasta 48,49 % de PCE a 200 lux con la lámpara RB (y 35,85 % a 1000 lux con RB; 43,03 % a 1000 lux con MW), mientras que la perovskita triple catión mostró valores máximos del orden de 32,5 % (32,49 % a 800 lux con RB) y  $\approx 30,4$  % a 1000 lux con ambas fuentes. Estos resultados se correlacionan con diferencias morfológicas (MAPI mostró granos  $\approx 400$  nm frente a  $\approx 200$  nm del triple catión) y con un mayor factor de forma y  $J_{sc}$  bajo la lámpara RB, lo que evidencia la importancia de un diseño de perovskita y de la armonización de condiciones de medida (tipo de fuente, espectro y forma de reportar la irradiancia) para lograr comparaciones fiables y un desempeño óptimo en aplicaciones interiores.

## MÉTODOS EXPERIMENTALES

### *Fabricación de celdas solares*

Los sustratos de vidrio/FTO (TEC™ 7, MSE Supplies) se limpiaron con un detergente alcalino acuoso en ultrasonido durante 10 min y posteriormente se sumergieron en una mezcla 1:1 de etanol e isopropanol. Los sustratos se trataron con plasma de microondas durante 5 s. Sobre los sustratos limpios se depositaron 50  $\mu$ L de una solución de BL solanorix. El depósito se realizó por *spin coating* a 2000rpm/10s y 5000rpm/20s y se realizó un tratamiento térmico a 550°C/1hora. A continuación, se depositó una capa mesoporosa de TiO<sub>2</sub> mediante *spin coating* a 2000rpm/10s y 5000rpm/20s, utilizando 60  $\mu$ L de una solución de TiO<sub>2</sub> nanocristalino (600uL de la solución madre/1.5ml Etanol), se sinterizó a 550°C por 30min.

Las películas de perovskita se fabricaron mediante el método de un solo paso, empleando una relación estequiométrica de los precursores PbI<sub>2</sub>, MAI, FAI, PbBr<sub>2</sub>, MABr y CsI para cada caso. Los reactivos se disuelven en una mezcla solvente DMF:DMSO en una relación 9:1.

La solución precursora de perovskita se depositó sobre la capa de TiO<sub>2</sub> mediante *spin coating* a 4000 rpm durante 50 s, aplicando clorobenceno como antisolvente durante el giro. Finalmente, las películas se recocieron a 100 °C durante 2 min. Durante el depósito, la humedad relativa dentro de la cámara de *spin coating* se redujo utilizando aire seco.

Para la capa transportadora de huecos se utilizó una solución compuesta por 91,1 mg de Spiro-MeOTAD disueltos en 35,93  $\mu$ L de *tert*-butilpiridina (Sigma Aldrich), 17,5  $\mu$ L de una solución madre de sal Li-TFSI (520 mg/mL, Sigma Aldrich) y 8,93  $\mu$ L de una solución madre de Co (FK209 Co (III)TFSI) (15mg/40 $\mu$ L) disuelta en 1 mL de clorobenceno y acetonitrilo (Merck). Esta solución se depositó sobre la perovskita por *spin coating* a 3000 rpm durante 20 s. Finalmente, se depositaron 130 nm de oro mediante evaporación térmica en alto vacío ( $P_{back} = 10^{-6}$  torr) a una velocidad constante de 5 nm/s.

### *Caracterización*

Para la medición de la irradiancia espectral de distintas las lámparas se empleó un espectrorradiómetro FieldSpec® 4 Standard-Res (ASD Inc., USA), un equipo portátil de alta precisión diseñado para mediciones de reflectancia, radiancia e irradiancia. El instrumento cubre un rango espectral de 350 a 2500 nm, con un intervalo de muestreo de 1,4 nm entre 350 y 1000 nm, y de 2 nm entre 1001 y 2500 nm. La resolución espectral es de 3 nm a 700 nm y 10 nm a 1400/2100 nm.

La morfología se caracterizó mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) utilizando un microscopio Carl Zeiss NTS-SUPRA 40.

Las curvas de tensión-corriente se obtuvieron utilizando un Autolab/PGSTAT101. Como fuente de luz AM1.5G se empleó un simulador solar clase ABB (LCS-100, Oriel), fijando la intensidad equivalente a 1 sol mediante una celda de referencia calibrada de silicio.

## CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos confirman que las celdas solares de perovskita, tanto de MAPI como de triple catión, presentan un desempeño notable bajo iluminación interior, con eficiencias de conversión de potencia significativamente superiores a las medidas bajo condiciones estándar de un sol (AM1.5G). Esta mejora se atribuye a su alta movilidad de portadores, baja densidad de defectos y adecuada

adaptación espectral a fuentes de luz artificial. Entre los dos materiales estudiados, las celdas de MAPI mostraron mayores eficiencias globales, principalmente por su elevada fotocorriente, mientras que las de triple catión, se vieron limitadas por menores factores de forma debido a mayores pérdidas resistivas y recombinación. El análisis morfológico mediante SEM reveló que el mayor tamaño de grano en MAPI favorece una menor densidad de defectos y una mejor recolección de portadores, lo que explica en parte su mejor desempeño.

El estudio comparativo bajo dos fuentes de iluminación interior (RB y MW) evidenció que el espectro de emisión y la potencia radiante influyen significativamente en la respuesta fotovoltaica. En general, las lámparas RB propiciaron un mejor rendimiento, con factores de forma más altos y un comportamiento más estable frente a la variación de la irradiancia, especialmente en las celdas MAPI. Asimismo, se observó una dependencia lineal de la corriente de cortocircuito con la potencia incidente, indicando un comportamiento predecible en el régimen de baja iluminación. Estos resultados resaltan el potencial de optimizar tanto la arquitectura de las celdas como la adecuada selección de las fuentes lumínicas disponibles en el mercado, así como la adaptación de los materiales absorbentes a sus espectros de emisión, con el fin de impulsar el desarrollo de dispositivos electrónicos autónomos y sistemas IoT alimentados mediante dispositivos fotovoltaicos de interiores.

## FUENTES DE FINANCIAMIENTO

PROYECTOS DE DESARROLLO E INNOVACIÓN TECNOLÓGICA - CyTEB: Ciencia y Tecnología en Energías Bonaerenses (2023) – PROINGED I  
*Celdas solares de perovskitas para usos en dispositivos móviles y aplicación en interiores*

PIP 2023-2025 GI (11220220100489CO)

*Estudio de la degradación de perovskitas híbridas por métodos ópticos*

## AGRADECIMIENTOS

Se desea agradecer la operación del SEM de la Dra. M. Claudia Marchi del CEMA – FCEyN. Se agradece al Depto. Energía Solar de la CNEA por el equipamiento necesario para la caracterización de las celdas solares y la evaporadora de metales.

## REFERENCIAS

- Cheng, R., Chung, C.-C., Zhang, H., Liu, F., Wang, W.-T., Zhou, Z., Wang, S., Djurišić, A. B., y Feng, S.-P. (2019). Tailoring triple-anion perovskite material for indoor light harvesting with restrained halide segregation and record high efficiency beyond 36 %. *Advanced Energy Materials*, 9 (38), 1901980.
- Dagar, J., Castro-Hermosa, S., Lucarelli, G., Cacialli, F., y Brown, T. M. (2018). Highly efficient perovskite solar cells for light harvesting under indoor illumination via solution processed SnO<sub>2</sub>/MgO composite electron transport layers. *Nano Energy*, 49, 290-299.
- Dong, C., Li, M., Zhang, Y., Wang, K.-L., Yuan, S., Igbari, F., Yang, Y., Gao, X., Wang, Z.-K., y Liao, L.-S. (2020). Lead oxalate-induced nucleation retardation for high-performance indoor and outdoor perovskite photovoltaics. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 12 (1), 836-843.
- Guo, Z., Jena, A. K. y Miyasaka, T. (2023). Halide Perovskites for Indoor Photovoltaics: The Next Possibility. *ACS Energy Letters* 8 (1), 90–95.
- He, X., Chen, J., Ren, X., Zhang, L., Liu, Y., Feng, J., Fang, J., Zhao, K., y Liu, S. (2021). 40.1 % record low-light solar-cell efficiency by holistic trap-passivation using micrometer-thick perovskite film. *Advanced Materials*, 33 (27), 2100770.
- Kang, S. B., Patil, P., Yoon, G. W., Han, G. S., Jung, H. S., y Kim, D. H. (2024). Study of interface engineering on perovskite-based indoor photovoltaics for powering Internet-of-Things. *Chemical Engineering Journal*, 502, 157973.
- Kim, S., Jahandar, M., Jeong, J. H. y Lim, D. C. (2019). Recent Progress in Solar Cell Technology for Low-Light Indoor Applications. *Current Alternative Energy* 3 (1), 3–17.

- Kumari, P., Prasanthkumar, S., y Lingamallu, G. (2024). Recent progress on perovskite based indoor photovoltaics: Challenges and commercialization. *Solar Energy*, 284, 113049.
- Le, T. S., Chuyko, I. A., Luchnikova, L. O., Ilicheva, K. A., Sukhorukova, P. K., Balakirev, D. O., Saratovsky, N. S., Alekseev, A. O., Kozlov, S. S., Muratov, D. S., Voronov, V. V., Gostishchev, P. A., Kiselev, D. A., Ilina, T. S., Vasilev, A. A., Polyakov, A. Y., Svidchenko, E. A., Maloshitskaya, O. A., Luponosov, Y. N., y Saranin, D. S. (2024). Tailoring wetting properties of organic hole-transport interlayers for slot-die-coated perovskite solar modules. *Solar RRL*, 8 (22), 2400437.
- Lee, H. K. H., Barbé, J. y Tsoi, W. C. (2020). Organic and perovskite photovoltaics for indoor applications. *Solar Cells and Light Management: Materials, Strategies and Sustainability*. 355–388. Elsevier.
- Li, Y., Grabham, N. J., Beeby, S. P. y Tudor, M. J. (2015). The effect of the type of illumination on the energy harvesting performance of solar cells, *Solar Energy*, 111, 21-29.
- Li, Y., Nie, T., Ren, X., Wu, Y., Zhang, J., Zhao, P., Yao, Y., Liu, Y., Feng, J., Zhao, K., Zhang, W., y Liu, S. (2024). In Situ Formation of 2D Perovskite Seeding for Record-Efficiency Indoor Perovskite Photovoltaic Devices. *Advanced Materials*, 36 (3), 2306870.
- Lübke, D., Hartnagel, P., Angona, J., y Kirchartz, T. (2021). Comparing and quantifying indoor performance of organic solar cells. *Advanced Energy Materials*, 11 (34), 2101474.
- Ma, Q., Wang, Y., Liu, L., Yang, P., He, W., Zhang, X., Zheng, J., Ma, M., Wan, M., Yang, Y., Zhang, C., Mahmoudi, T., Wu, S., Liu, C., Hahn, Y.-B., y Mai, Y. (2024). One-step dual-additive passivated wide-bandgap perovskites to realize 44.72%-efficient indoor photovoltaics. *Energy & Environmental Science*, 17 (5), 1637-1644.
- Mathews, I., Kantareddy, S. N., Buonassisi, T. y Peters, I. M. (2019). Technology and Market Perspective for Indoor Photovoltaic Cells. *Joule* 3 (6), 1415–1426.
- Muhammad, B. T., Kar, S., Stephen, M., y Leong, W. L. (2022). Halide perovskite-based indoor photovoltaics: recent development and challenges. *Materials Today Energy*, 23, 100907.
- Pecunia, V., Occhipinti, L. G. y Hoyer, R. L. Z. (2021). Emerging Indoor Photovoltaic Technologies for Sustainable Internet of Things. *Advanced Energy Materials* 11 (29), 2100698.
- Song, Z., McElvany, C. L., Phillips, A. B., Celik, I., Krantz, P. W., Wathage, S. C., Liyanage, G. K., Apul, D., y Heben, M. J. (2017). A technoeconomic analysis of perovskite solar module manufacturing with low-cost materials and techniques. *Energy & Environmental Science*, 10 (6), 1297-1305.
- Wang, K.-L., Zhou, Y.-H., Lou, Y.-H. y Wang, Z.-K. (2021). Perovskite indoor photovoltaics: opportunity and challenges. *Chemical Science*, 12, 11936–11954.
- Wojciechowski, K. y Forgács, D. (2022). Commercial Applications of Indoor Photovoltaics Based on Flexible Perovskite Solar Cells. *ACS Energy Letters*. 7 (10), 3729–3733.

## PEROVSKITE SOLAR CELLS FOR USE IN MOBILE DEVICES AND INDOOR APPLICATIONS

**ABSTRACT** This work aimed to develop and evaluate perovskite solar cells for indoor photovoltaic applications, with potential use in portable devices and IoT systems. Two active compositions, MAPI and triple cation, were studied by performing spectral characterization of two low-power LED lamps (RB and MW) and fabricating n-i-p architecture cells through a one-step method. Film morphology was analyzed using scanning electron microscopy, and photovoltaic performance was assessed through J–V curves under standard AM1.5G illumination and low irradiance conditions (200–1000 lux). The results showed that both perovskites achieved power conversion efficiencies higher than those measured under 1 sun, attributable to their good spectral match with artificial light sources and low non-radiative recombination. The MAPI composition exhibited higher overall efficiencies due to its greater photocurrent and larger grain size, whereas the triple cation composition was limited by lower fill factors. RB lamps yielded better performance than MW lamps, highlighting the importance of emission spectrum. In conclusion, these cells demonstrate high potential for powering autonomous devices and optimizing energy harvesting in low-light environments.

**Keywords:** perovskite solar cells, indoor illumination, IoT

## CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE COCINA MEJORADA A LEÑA PARA LOS CERROS DE SALTA

**Valentín Becchio, Laura A. Mosconi, Carolina Subelza, Karla M. Pérez Domínguez,  
Pablo R. Dellicompagni**

Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO, UNSa – CONICET). Av. Bolivia 5150, A4400FVY, Salta, Argentina.

Tel. 54-0387-4255579 – Fax 54-0387-4255489. E-mail: [valentin.becc2@gmail.com](mailto:valentin.becc2@gmail.com)

**RESUMEN:** Este trabajo presenta los resultados del proceso de construcción, evaluación y apropiación de un prototipo de cocina mejorada a leña denominada “Cocina Martina”, pensada para su implementación en la región de los Cerros de Salta. Esta tecnología busca abordar las problemáticas del uso de fogones abiertos dentro de las cocinas de los hogares en los cerros, cuestión que puede repercutir en problemas de salud y un alto consumo de leña. Se hace foco en evaluar su rendimiento en relación con el consumo de leña, para lo que se implementó una Prueba de Ebullición de Agua a partir de la cual se obtuvieron parámetros como el tiempo empleado para hervir agua, consumo específico de leña, eficiencia de la cocción y potencia de la cocción. Se realizó la misma prueba en un fogón tradicional pudiendo así comparar ambos resultados. Se logró observar que la Cocina Martina logra reducir considerablemente el consumo de leña en relación con el método tradicional, cuestión que concuerda con la experiencia de la familia usuaria luego de un año de uso del prototipo. Se cuenta así con una tecnología que cumple con sus principales metas y tiene alto potencial de replicación en la región de los Cerros de Salta y otros territorios rurales.

**Palabras clave:** Cocinas mejoradas a leña, metodología WBT, tecnología apropiada.

### INTRODUCCIÓN

Al adentrarse en los cerros de Salta, y en otras zonas rurales de la provincia, se evidencia que la cocina es el centro social en el interior de las unidades domésticas. Resulta ser un espacio en el que el ojo no acostumbrado, lagrimea casi al instante. No por un hecho trágico, sino por el humo que desprende el fogón. Ese fogón donde se cocina la comida que en muy poco tiempo será motivo de reunión familiar, ese fogón que irradia calor durante los días más fríos y es testigo de interminables charlas, ese fogón que se encuentra rodeado de paredes de adobe, techo de paja y aire espeso característico de las viviendas en estos lugares.

Las condiciones de vida en los parajes rurales de los cerros están marcadas por la complejidad de acceso a servicios en general. Contar con agua, energía, acceso a salud o educación, entre otros, representa desafíos a los que se enfrentan muchas familias en su día a día, quienes implementan múltiples estrategias para resolverlos. Si nos enfocamos en el acceso a la energía, vemos que la leña es el principal combustible utilizado en los hogares para la cocción de alimentos y la calefacción de los espacios. Es novedoso ver una cocina con garrafa, no necesariamente porque sea en sí una tecnología que no funcione o a la que las familias no puedan acceder, sino porque no existe la cadena logística de provisión que acompañe el funcionamiento de las mismas. Hablamos de familias que se encuentran distanciadas de las zonas urbanas, parajes que en su mayoría no cuentan con camino o huella de vehículo para acceder a ellos. Llegar ahí implica un recorrido por sendas que cruzan ríos, rodean, atraviesan, suben y bajan los filos de los cerros, por lo que traer elementos desde los centros urbanos representa un gran desafío. De manera tradicional en las viviendas de los cerros, la cocción de los alimentos se realiza en un fogón que se encuentra en un espacio cerrado y que está destinado a cumplir las funciones de una cocina. Esta



cuestión puede tener al menos dos problemáticas asociadas. En primer lugar, afectaciones a la salud, que generan principalmente enfermedades respiratorias y función pulmonar reducida asociadas a la constante exposición al humo que desprende la leña cuando es usada como combustible, especialmente el material particulado (Troncoso et al., 2018; Vázquez et al., 2022; Vicente et al., 2024).

Por otro lado, se debe señalar que los fogones tradicionales con los que se cocina en esta zona, constan de una estructura simple de hierro (de dos a cuatro barras cada una de 30 cm aproximadamente), donde se apoyan las ollas por encima del fuego, lo que se traduce en un consumo significativo de biomasa debido a las altas pérdidas de calor del sistema hacia el ambiente. Este uso diario implica destinar gran parte del tiempo de los miembros de las familias a la recolección de leña, aminorando el tiempo disponible para otro tipo de actividades. En ambientes áridos como en los cerros, donde la leña es un recurso escaso, su consumo requiere mucho trabajo de recolección, recorrer varios kilómetros para localizar, cortar y trasladar leña, ya sea al hombro, en burro o carretillas. A su vez, en estos ambientes la sobreutilización de este recurso puede devenir en una presión sobre los ecosistemas.

Ambos componentes de la problemática afectan principalmente a mujeres e infancias, ya que este sector de la población rural se dedica a las tareas de cuidado familiar, ya sea participando en la recolección de leña, preparando los alimentos o estando mayor tiempo en las cocinas acompañando a sus madres, viéndose afectados por la inhalación constante del humo.

### ***Antecedentes***

Para abordar esta problemática, se ha desarrollado una serie de experiencias que apuntan a la implementación de cocinas que resuelvan ambos componentes, sacar el humo de la casa y reducir el consumo de leña. Las Cocinas Malena en Bolivia (Condori y Albarracín, 2016), Cocina Patzari y Lorena en México (Olaya, 2017) representan buenos ejemplos de abordaje de esta problemática, desarrollando una tecnología que contribuye a la mejora de las condiciones de cocción de los alimentos en parajes rurales aislados y que es adaptable a la cultura local de cada sitio.

De la revisión de antecedentes vinculados a la implementación de estas y otras tecnologías en el medio rural, y de la experiencia de trabajo previo por parte del equipo de investigación Planificación Energética y Gestión Territorial del Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (PEyGeT/INENCO) en las zonas rurales de la provincia de Salta, identificamos algunos aspectos clave a tener en cuenta en la promoción y funcionamiento de cocinas mejoradas a leña. En primer lugar, observamos que se debe poner énfasis en la promoción de una tecnología que aborde ambos componentes de la problemática, reducir la exposición al humo, así como también mejorar la eficiencia en el uso y consumo de biomasa.

A su vez, identificamos que las condiciones técnicas de diseño y funcionamiento de la tecnología no alcanzan para potenciar su funcionamiento y apropiación. Resulta de suma importancia incorporar las prácticas locales del uso del fuego al diseño de la cocina. Esta se debe amoldar a las técnicas locales de cocción y, de ser posible, propiciar otros usos que las familias le den al fuego. Por ejemplo: disposición constante de agua caliente, calefacción del ambiente, así como también garantizar que la cocina continúe siendo el centro de las reuniones de la familia. Además, resulta importante la promoción y uso de materiales locales, así como accesibles en cada contexto para su construcción, sobre todo si se tiene en cuenta que existen zonas de difícil acceso, donde el traslado de estos puede significar un gran desafío. Otro aspecto a tener en cuenta se vincula con la incorporación de saberes y técnicas constructivas locales en el diseño y construcción de las cocinas, de esta manera se fortalece la autonomía, gustos y preferencias de las familias a la hora de construir o al momento en que se requiera realizar reparaciones a las mismas. Este trabajo se basa en algunos resultados en relación con el inicio de este proceso.

En una primera instancia se está implementando un prototipo de cocina mejorada diseñado y construido en conjunto con la Comunidad Originaria Kondorwaira del paraje de Potrero de Castilla, departamento de La Caldera, Salta. El prototipo se diseñó en el año 2023 en base a los desarrollos de la Cocina Malena y considerando las prácticas culinarias locales, el uso de materiales accesibles y la búsqueda de llevar el humo al exterior y disminuir la cantidad de leña que se utiliza en esta labor. Su construcción se realizó durante el año 2024, y ha sido utilizada por una familia de esta comunidad desde julio de 2024. En consonancia con los otros modelos de cocinas implementadas en América Latina, a este prototipo lo denominamos “Cocina Martina”.

En su primer año de uso, la familia que la ha utilizado de forma cotidiana expresó su satisfacción en relación con los cumplimientos de los dos principales objetivos planteados en el diseño. En diversas oportunidades hicieron referencia a que la cocina efectivamente logra disminuir considerablemente el humo en el espacio de cocina y reduce significativamente la cantidad de leña necesaria para cocinar. Ante esta situación desde el equipo PEyGeT, se planteó la posibilidad de evaluar el consumo de leña de una manera metódica. Para ello durante el mes de julio de 2025 se llevó a cabo una evaluación de la cocina mediante el método estandarizado de ebullición de agua (WBT).

La prueba WBT es un método propuesto por Global Alliance for Clean Cookstove (GACC), cuyo objetivo es determinar la eficiencia en la que una estufa utiliza el combustible para calentar agua en un recipiente, como así también la cantidad de emisiones producidas durante la cocción. Permite estudiar la eficiencia térmica del uso de combustible en cocinas, además de las características de combustión de diversas fuentes, siendo utilizado por diversos autores para comparar diferentes prototipos y tecnologías de cocinas en relación con su rendimiento (Bailis et al., 2007; Grimsby et al., 2016; Medina et al., 2017). Esta prueba proporciona indicadores de rendimiento de las cocinas tales como eficiencia térmica de cocción, consumo de combustible, tiempo de ebullición de una cantidad fija de agua y potencia, y está citada como metodología simplificada del Estándar de Oro para cocinas limpias y eficientes en el marco del cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Bajo esta metodología, son importantes dos variables asociadas al combustible: el poder calorífico y la humedad. La primera hace referencia a la cantidad de energía liberada por kilogramo de combustible al producirse su combustión, y varía según la composición y humedad de los distintos tipos de biomasa, siendo necesaria para determinar el potencial bioenergético contenido en ella y poder planificar una futura valorización de la misma (Manrique et al., 2023). Por otro lado, la segunda variable mide el contenido de agua en la biomasa y es de gran importancia para determinar la calidad como biocombustible (Manrique et al., 2023).

En bibliografía no se han encontrado estudios relacionados con la aplicación del método WBT para evaluar rendimiento en prototipos de Cocina Malena, sin embargo, se ha hallado bibliografía relacionada a la aplicación de este método en otras tipologías de cocinas mejoradas, como así también estudio de emisiones.

El presente trabajo aborda el diseño y construcción de la cocina Martina, y hace foco en la evaluación del rendimiento del proceso de cocción de la misma en comparación con los fogones tradicionales, siguiendo el protocolo WBT. De esta manera se buscó analizar si efectivamente esta cocina permite mejorar las condiciones de cocción de alimentos y disminuir el uso de leña.

## **METODOLOGÍA**

### ***Área de estudio***

La construcción y evaluación de la cocina Martina, se llevó a cabo en la zona urbana de la localidad de Vaqueros, departamento La Caldera, Provincia de Salta. Esta localidad forma parte del territorio ampliado de la Comunidad Kondorwaira, que a través de una dinámica de movilidad espacial significan y habitan espacios que se encuentran entre el campo y la ciudad. Los espacios rurales habitados por las familias Kondorwaira se ubican en un sector que presenta una transición entre distintos ecosistemas que van desde la selva montaña, bosque montano de yunga tropical semihúmedo, pastizales de neblina y alto andinos, semipuna y puna. La crianza y el cuidado de animales (cabras, ovejas y vacas), la siembra y cosecha de productos andinos (papas, ocas, maíces, etc.), la elaboración de quesos y artesanías en lana y cuero, forman parte de algunas de las actividades productivas que realiza esta comunidad. Cuentan con una herencia cultural andina (pueblo kolla) que les permite entablar diversas formas de relacionarse con la naturaleza, considerándola un ente vivo (Pérez y Belmonte, 2022; 2024).

Para el caso de estudio en particular, se aprovechó esta dinámica de movilidad territorial de la comunidad para poder desarrollar un prototipo de cocina en la localidad de Vaqueros, donde resultó mucho más fácil de construir y sobre todo de probar, evaluar y perfeccionar el modelo, para luego poder

reaplicar la tecnología en casas ubicadas en la zona rural del territorio Kondorwaira. Como se explicó anteriormente, el presente trabajo pretende sentar las bases para continuar con la implementación de cocinas mejoradas en hábitats rurales de los Cerros de Salta.

### ***Diseño y Construcción***

El diseño de la cocina se basó en desarrollos principalmente implementados en Bolivia, como ser la Cocina Malena (Loayza, 2009). Este tipo de cocinas se adaptan a las formas de cocinar en las regiones andinas en las que el uso de ollas para preparar comidas guisadas es la principal práctica culinaria diaria. El diseño (Figura 1) consiste en una estructura de ladrillo que cuenta con una base para elevar la altura a la que se cocina (con los fogones abiertos se suele cocinar a la altura del suelo), una cámara de combustión con su correspondiente boca de carga de leña, una trampa de ceniza y una salida de ceniza. En la parte superior de la cámara de combustión se dejan dos espacios por los que caben las ollas (los espacios para las ollas se diseñaron específicamente para las ollas que más usaba la familia) de manera tal que, a la hora de cocinar, la mayoría de la superficie de estas se ubique por dentro de la cámara de combustión con el objetivo de aumentar la superficie de contacto con el fuego, al mismo tiempo que se disminuyen las pérdidas al exterior. En uno de los extremos de la cámara de combustión se colocó una chimenea por la que sale el humo hacia el exterior de la vivienda.

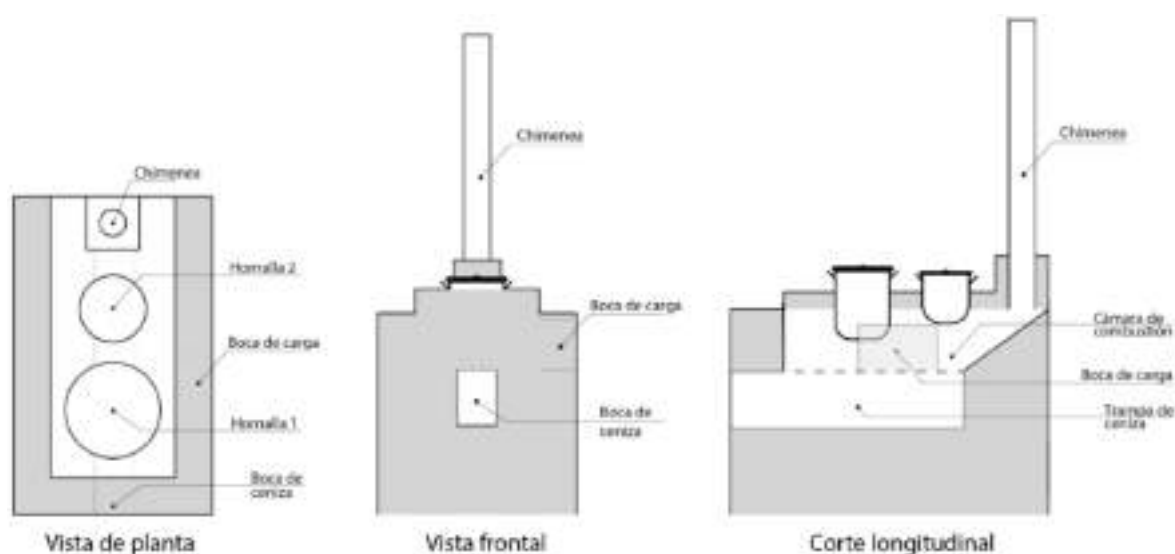


*Figura 1: Croquis general de la Cocina Martina.*

Tanto el diseño de las dimensiones específicas de la cocina como su construcción se realizaron de manera colectiva con miembros de la familia. Se desarrollaron diversas jornadas en las que se fueron construyendo las diferentes partes de la cocina, evaluando en conjunto con los usuarios las mejores formas para adaptar el modelo a sus particularidades (tamaño de ollas, altura más cómoda para la cocción, espacio del área de cocina, entre otras variables) (Figura 2).

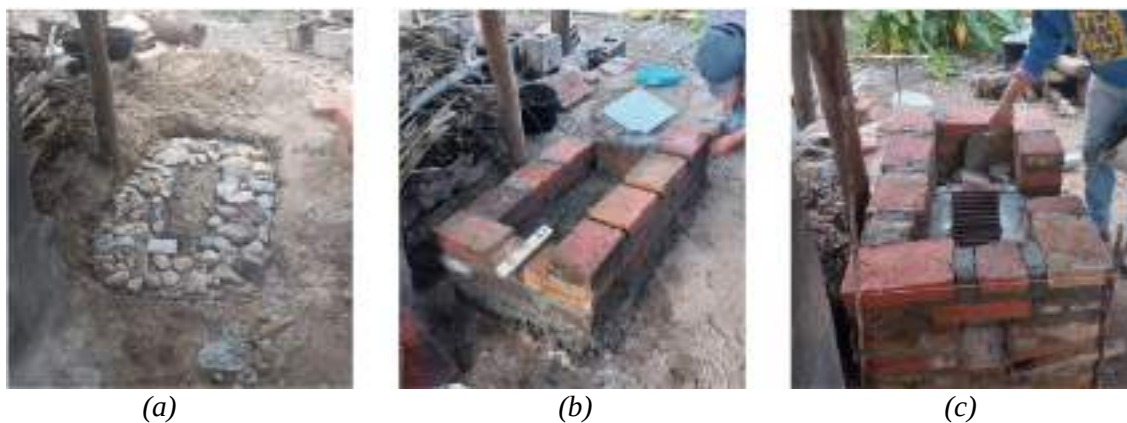




Figura 2: Proceso de construcción de prototipo de Cocina Martina, (a) cimientos, (b) base, (c) trampa de ceniza y base de la cámara de combustión, (d) definición de ubicación de ollas dentro de la cámara de combustión, (e) construcción de hornallas y colocación de chimenea, (f) detalles finales.

### Evaluación del rendimiento

Se utilizó el protocolo WBT versión 4.2.3 (GACC, 2014) para evaluar tanto el rendimiento de la cocina Martina construida, como el rendimiento de un fogón tradicional (Figuras 3 y 4) a modo de compararlas. En todos los ensayos se utilizó leña de *Maclura tinctoria*, una especie forestal nativa de la zona, utilizada comúnmente como leña en los hogares, con una dimensión promedio de 27x4x3 cm. Para el inicio del fuego, como base se utilizaron pequeñas ramas de especies varias, recolectadas en la cercanía de la vivienda. Se procuró simular las prácticas locales de encendido y mantenimiento del fuego.



Figura 3: Ensayos en la Cocina Martina construida, (a) vista de frente, con medidor de temperatura del agua de las ollas, (b) vista general, junto con la propietaria y la leña utilizada, (c) vista general con fuego encendido.



Figura 4: Ensayos en el fogón tradicional evaluado con dos ollas, (a) vista lateral, (b) vista superior.

De acuerdo con el protocolo, este método consta de tres fases de análisis (Figura 5):

- 1) De alta potencia con inicio frío, con la cual se busca llevar el agua de las ollas de temperatura ambiente a su punto de ebullición de la manera más rápida posible con la cocina en frío.
- 2) De alta potencia con inicio caliente, se realiza luego de la fase 1 cambiando el agua de las ollas, retirando restos de leña, brasa y ceniza de la cocina y llevando el agua de las ollas de temperatura ambiente a su punto de ebullición de la manera más rápida posible con la cocina en caliente.
- 3) De baja potencia, se realiza luego de la fase 2, reteniendo el agua en la olla y manteniendo en hervor durante 45 minutos simulando una cocción de legumbres.

Antes y después de cada fase se pesan las ollas con agua, la leña a usar, la leña sobrante, leña semi quemada, brasas y ceniza. También se mide la temperatura de las ollas y condiciones ambientales durante todo el proceso (humedad relativa, temperatura y velocidad de viento en cercanías de la cocina). Se realizaron 3 ensayos (cada uno incluyendo las 3 fases mencionadas) en la cocina Martina y 2 ensayos con el fogón tradicional. A pesar de que el método estandariza una serie de pasos con el fin de poder comparar diferentes cocinas, en la práctica resulta complejo manejar algunas variables vinculadas sobre todo al manejo del fuego.

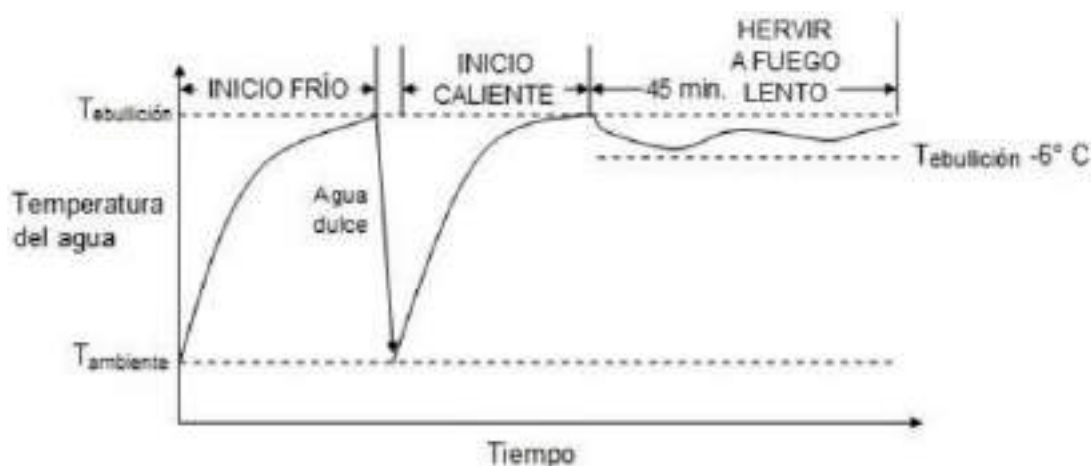


Figura 5: Fases de la metodología WBT.

Para las pruebas se utilizaron dos ollas de cocina con 5l y 3l de agua, respectivamente. Estas son las ollas que más utiliza la familia para la preparación de comidas en ambas cocinas. Se utilizaron las mismas ollas con la misma cantidad de agua para todos los ensayos.

El contenido de humedad se determinó a partir de la recolección de una muestra del combustible, las cuales se secaron en estufa a una temperatura aproximada de 105° en atmósfera de aire hasta mantener su masa constante, de acuerdo con la Norma UNE-EN ISO 18134:2016. Por otro lado, como valor aproximado, se decidió utilizar el Poder Calorífico Inferior de una muestra de *Maclura tinctoria* y *Schinopsis balansae* determinado mediante un calorímetro o bomba calorimétrica siguiendo la Norma UNE-EN ISO 18125:2018.

Los parámetros calculados fueron el tiempo para llegar a la ebullición, el combustible específico consumido (Ec. 1), la potencia del proceso de cocción (Ec. 2) y la eficiencia térmica de cada ensayo (Ecs. 3 y 4), los cuales se evaluaron en las fases de alta potencia (inicio frío y caliente) y en la fase de baja potencia, como reportan otros trabajos (Bailis et al., 2007; Grimsby et al., 2016; Medina et al., 2017). En la Ec. 5 se detalla además cómo se obtiene el parámetro de Consumo Equivalente de Combustible (CS), el cual se usa para el desarrollo de los cálculos para obtener los parámetros mencionados. Para el cálculo de los parámetros se utilizó un software incluido en el protocolo WBT 4.2.3.

$$CEC = \frac{1000 * CS}{m_{wb}} \quad (1)$$

$$P_c = \frac{CS * PCI_c}{\Delta t_b * 60} \quad (2)$$

$$\eta_{ca} = \frac{Cp_w (m1_i * \Delta T^{\circ}1 + m2_i * \Delta T^{\circ}2) + \Delta H_{vap} * m_{wv}}{CS * PCI_c} \quad (3)$$

$$\eta_{cb} = \frac{Cp_w \left( \frac{m1_i + m1_f + m2_f}{2} \right) \Delta T^{\circ}_1 + \Delta H_{vap} * m_{wv}}{CS * PCI_c} \quad (4)$$

$$CS = \frac{CH (PCI_c(1-H^{\circ}_{wb}) - H^{\circ}_{wb}(Cp_w(Tb - T^{\circ}_{amb}) - \Delta H_{vap})) - m_{chf} * PCI_{ch}}{PCI_c} \quad (5)$$

Donde:

- CEC = Consumo específico de combustible (g/l).
- CS = Consumo equivalente de combustible (g).
- CH = Combustible consumido (g).
- $P_c$  = Potencia de la cocción (W).
- $PCI_c$  = Poder calorífico inferior del combustible (kJ/kg).
- $PCI_{ch}$  = Poder calorífico carbón y cenizas (kJ/kg).
- $\Delta t_b$  = Tiempo de ebullición (min).
- $\eta_{ca}$  = Eficiencia térmica de cocción en fases de alta potencia (%).
- $\eta_{cb}$  = Eficiencia térmica de cocción en fases de baja potencia (%).
- $Cp_w$  = Capacidad calorífica del agua (kJ/kg °C).
- m1 = masa de agua en olla 1 (g).
- m2 = masa de agua en olla 2 (g).
- $m_{chf}$  = masa de carbón y ceniza sobrante (g).
- $m_{wb}$  = Masa de agua hervida (g).
- $m_{wv}$  = masa de agua vaporizada (g).
- $\Delta H_{vap}$  = Entalpía de vaporización del agua (kJ/kg).
- $H^{\circ}_{wb}$  = Humedad del combustible en base húmeda (%).
- $Tb$  = Punto de ebullición medido (°C).

Las temperaturas del agua en las ollas se midieron con un termómetro digital Fluke 54II y termocuplas tipo K (resolución 0,1°C). Se utilizó otro termómetro igual para medir temperatura ambiente. Se midieron otras variables ambientales (humedad relativa y velocidad de viento en cercanías a la cocina) con un anemómetro de hilo caliente TES 1341 (resolución 0,01 m/s y 0,1%). Para el pesaje se utilizó una balanza Systel (resolución 0,005 kg).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### ***Evaluación del rendimiento cocina Martina vs. fogón tradicional***

En la Tabla 1 se presentan los resultados de los parámetros de rendimiento obtenidos. Se decidió presentar los resultados de todos los ensayos realizados, debido a que se observó una gran variación entre los valores obtenidos.



*Tabla 1: Valores obtenidos de los parámetros de rendimiento evaluados, para cada ensayo realizado en la cocina Martina y en el fogón tradicional, incluidas las tres fases de WBT*

| Fase          |                 | Parámetro de rendimiento                | Cocina Martina |     |     | F. tradicional |     |
|---------------|-----------------|-----------------------------------------|----------------|-----|-----|----------------|-----|
|               |                 |                                         | Nº de ensayo   |     |     | Nº de ensayo   |     |
|               |                 |                                         | 1              | 2   | 3   | 1              | 2   |
| Alta potencia | Inicio frío     | Tiempo de ebullición (min)              | 27             | 29  | 30  | 56             | 74  |
|               |                 | Eficiencia térmica (%)                  | 5              | 17  | 13  | 9              | 9   |
|               |                 | Consumo específico de combustible (g/l) | 513            | 157 | 195 | 420            | 508 |
|               |                 | Potencia (kW)                           | 40             | 12  | 14  | 15             | 13  |
|               | Inicio caliente | Tiempo de ebullición (min)              | 16             | 20  | 20  | 50             | 42  |
|               |                 | Eficiencia térmica (%)                  | 6              | 15  | 46  | 8              | 7   |
|               |                 | Consumo específico de combustible (g/l) | 425            | 174 | 66  | 375            | 414 |
|               |                 | Potencia (kW)                           | 59             | 19  | 7   | 16             | 21  |
| Baja potencia |                 | Eficiencia térmica (%)                  | 59             | 13  | 17  | 16             | 16  |
|               |                 | Consumo específico de combustible (g/l) | 13             | 404 | 281 | 237            | 201 |
|               |                 | Potencia (kW)                           | 404            | 14  | 10  | 9              | 7   |

### ***Análisis comparativo entre Cocina Martina vs Fogón Tradicional***

De acuerdo con la estructura de este prototipo de cocina mejorada se espera una mayor conservación del calor debido a su masa térmica, a sus menores pérdidas de calor dado que la combustión ocurre en un espacio protegido y al bajo coeficiente de conductividad térmica del ladrillo, lo que deriva a su vez, en un menor consumo de combustible, cuestiones que se ven reflejadas sobre todo en las primeras dos fases de la prueba. En este sentido, el desempeño de la cocina evaluada tendió a ser mucho mejor al sistema de fogón tradicional en cuanto al tiempo de ebullición, eficiencia térmica de cocción y combustible específico consumido.

En la etapa de alta potencia con inicio frío, la cocina Martina tardó entre 52% y 59% veces menos en alcanzar el tiempo de ebullición, logró una eficiencia térmica de cocción 89% mayor, en el mejor de los ensayos, y del 44% menor en el peor caso (ensayo 1) y consumió entre 22% más y 69% menos de combustible, en los casos extremos, en comparación con el fogón tradicional.

En cuanto a la etapa de inicio caliente, el desempeño fue mejor, logrando reducir el tiempo de ebullición entre 52% y 68%, alcanzado en el ensayo 3 una eficiencia 557% mayor y consumiendo 84% menos de combustible, aunque en el ensayo 1 la eficiencia térmica fue menor y se consumió más combustible.

La fase de baja potencia mostró un consumo de combustible 100% veces mayor en la cocina martina para el peor escenario, y 39% menor en el mejor de los casos, mientras que la eficiencia térmica de cocción logró superar por un poco más del doble la obtenida por el fogón tradicional, si bien también fue 19% menor en otros ensayos.

Los resultados de potencia se relacionaron con el consumo de combustible, siendo menor potencia a menor consumo, ya que la cocina entrega menos energía para la cocción por unidad de tiempo debido, principalmente, a un menor consumo de leña.

De todos los ensayos realizados en la cocina Martina, el ensayo 1 mostró el peor desempeño, es decir, un consumo de combustible mayor y una menor eficiencia en las tres etapas, probablemente debido a ser la primera prueba realizada y no contar con la experiencia y práctica en el encendido y mantenimiento del fuego, así como también haber colocado una disposición de los trozos de leña diferente, causando una menor eficiencia en la transferencia de calor.

En contraparte, los ensayos 2 y 3 tuvieron mejor rendimiento, siendo el ensayo 3 el óptimo en las etapas de alta potencia con inicio caliente y baja potencia, consumiendo 84% y 41% menos de combustible en las etapas mencionadas respectivamente, en comparación con el ensayo 1 y logrando una eficiencia térmica de cocción del 46% en la etapa de inicio en caliente, la mayor obtenida. Esto acompaña lo dicho



anteriormente, para el ensayo 3 se logra un mejor manejo, armado y mantenimiento del fuego. Además, para mejorar la combustión, se fue adaptando la metodología de encendido y tamaño de los leños, para ser más propicia, cortando los trozos de leña iniciales en trozos más pequeños y astillados, lo que mejora la superficie de combustión e intercambio de calor, favorece a los mecanismos de migración de humedad hacia el exterior y, en conjunto con una mejor disposición de los retazos, favorece al factor de dilución del oxígeno contenido en el aire y necesario para la combustión.

#### ***Análisis entre fase de alta potencia inicio frío, inicio caliente y fase de baja potencia***

Durante el desarrollo de las fases de alta potencia (inicio frío e inicio caliente), la eficiencia térmica de la cocina Martina fue aumentando entre una fase a otra, como así también el tiempo de ebullición fue disminuyendo. Este desempeño fue el esperado debido a que, con la cocina fría se necesita mayor tiempo para calentar la masa térmica que rodea la cámara de combustión, y una vez que la cocina ya se utilizó y está caliente, el aporte de calor hacia las ollas es mayor por lo que el tiempo de ebullición es menor, observando en general un menor consumo de combustible específico y mayor eficiencia térmica en la cocción.

El parámetro de eficiencia térmica en la cocción es considerado por varios autores como un claro indicador del rendimiento de la cocina en términos de combustible consumido. Sin embargo, en el desarrollo de los ensayos, durante la fase de baja potencia donde se precisa mantener el tiempo de cocción durante 45 minutos, un mejor indicador fue el consumo específico del combustible. En este sentido, la cocina tuvo buen desempeño en cuanto a la eficiencia térmica (durante este tiempo se evaporó mayor cantidad de agua), no obstante, el consumo de combustible fue mayor que en las fases anteriores, ya que se le suministró el combustible suficiente para el mantenimiento de la temperatura. Este comportamiento lo describe el protocolo de WBT, y se muestra como resultado en Grimsby et al. (2016), siendo característico de la fase de baja potencia en el WBT.

En contraposición, se puede observar que el fogón tradicional consume menos leña durante la fase de baja potencia, llegando además a equiparar su consumo con el de la Cocina Martina durante esta misma fase. Una de las cuestiones que explican esto es que en el fogón tradicional las brasas se mantienen por debajo de la olla todo el tiempo, mientras que en la Cocina Martina las mismas pueden caer a la trampa de ceniza disminuyendo considerablemente el calor que aportan a las ollas. Cabe aclarar que esta fase se realiza manteniendo las brasas sobrantes de la fase 2, que para el caso del fogón tradicional resultaron ser más.

#### ***Resultados generales de los ensayos***

No obstante, la alta variabilidad de los parámetros resultantes, el estudio muestra una evaluación positiva en los tres parámetros estudiados de rendimiento de cocción (combustible específico consumido, eficiencia térmica de cocción y tiempo de ebullición), tanto para hervir agua para consumo con la cocina fría o calentada previamente, como para el proceso de cocción en 45 minutos, excepto por tender a consumir más combustible en relación con el fogón durante esta última etapa. La performance final de la cocina Martina comparada con el fogón tradicional se muestra en la Tabla 2. Por otro lado, también se presenta una comparativa de la cocina aquí estudiada con respecto a diseños de cocinas publicados por otros autores (Tabla 3). Los parámetros corresponden a valores promedios obtenidos a partir de todos los ensayos realizados, para cada fase.

*Tabla 2: Desempeño final cualitativo de la cocina Martina y fogón tradicional según cada parámetro y etapa. APf: etapa alta potencia inicio frío. APc: etapa alta potencia inicio caliente. BP: etapa baja potencia. Las X asignadas reflejan cuál cocina tuvo mejor rendimiento en cada situación*

| Cocina            | Parámetro y etapa      |     |    |                    |     |    |                      |     |
|-------------------|------------------------|-----|----|--------------------|-----|----|----------------------|-----|
|                   | Consumo de combustible |     |    | Eficiencia térmica |     |    | Tiempo de ebullición |     |
|                   | APf                    | APc | BP | APf                | APc | BP | APf                  | APc |
| Martina           | x                      | x   |    | x                  | x   | x  | x                    | x   |
| Fogón tradicional |                        |     | x  |                    |     |    |                      |     |

*Tabla 3: Comparativa entre la cocina Martina y otros modelos encontrados en la literatura, incluidas las tres fases de WBT*

| Cocina        |                 |                                         | Martina                                                                           | Patsari                                                                            | ONIL                                                                                | Okoa-II                                                                             |
|---------------|-----------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Autor         |                 |                                         | Presente                                                                          | (Bailis et al., 2007)                                                              | (Medina et al., 2017)                                                               | (Grimsby et al., 2016)                                                              |
| Esquema       |                 |                                         |  |  |  |  |
| Alta potencia | Inicio frío     | Tiempo de ebullición (min)              | 29                                                                                | 60                                                                                 | 62                                                                                  | 22                                                                                  |
|               |                 | Eficiencia térmica (%)                  | 12                                                                                | 7                                                                                  | 15                                                                                  | 26                                                                                  |
|               |                 | Consumo específico de combustible (g/l) | 288                                                                               | 473                                                                                | 200                                                                                 | 168                                                                                 |
|               |                 | Potencia (kW)                           | 22                                                                                | -                                                                                  | 8                                                                                   | 4,4                                                                                 |
|               | Inicio caliente | Tiempo de ebullición (min)              | 19                                                                                | 47                                                                                 | 62                                                                                  | 12                                                                                  |
|               |                 | Eficiencia térmica (%)                  | 22                                                                                | 17                                                                                 | 15                                                                                  | 33                                                                                  |
|               |                 | Consumo específico de combustible (g/l) | 222                                                                               | 188                                                                                | 200                                                                                 | 135                                                                                 |
|               |                 | Potencia (kW)                           | 28                                                                                | -                                                                                  | 8                                                                                   | 6,6                                                                                 |
| Baja potencia |                 | Eficiencia térmica (%)                  | 15                                                                                | 17                                                                                 | 17                                                                                  | 25                                                                                  |
|               |                 | Consumo específico de combustible (g/l) | 307                                                                               | 193                                                                                | 100                                                                                 | 1109                                                                                |
|               |                 | Potencia (kW)                           | 11                                                                                | -                                                                                  | 5                                                                                   | 5,3                                                                                 |

Los resultados comparados para los distintos modelos de la Tabla 3 difieren entre si debido a variables tales como el combustible empleado (tamaño, forma, sustancia, disposición), el fin para el cual han sido diseñadas las cocinas (cocción por hervor en olla o directamente en plancha), los materiales empleados en la construcción y la geometría (adobe, ladrillo refractario, cemento, etc.), el volumen de agua empleado en los ensayos, como así en el manejo del fuego (técnica de encendido, movimiento o rotación de brasas, acceso del combustible, incorporación de chimenea, correcto calce de ollas en recintos, etc.). Sin embargo, a pesar de las diferencias en los resultados y en las técnicas constructivas y de uso de las cocinas, se puede realizar una comparación entre ellas.

Para la etapa APf, el modelo OKOA-II se destaca como el más eficiente, hirviendo el agua en solo 22 minutos con un consumo de combustible de 168 g/l, lo que representa una eficiencia del 26%. Por otro lado, la cocina Martina también presenta un buen rendimiento, hirviendo el agua en 29 minutos y alcanzando una alta potencia de 22 kW. En contraste, el modelo Patsari es el de menor rendimiento en esta fase, siendo el más lento y el menos eficiente. En cuanto a la etapa APC, la cocina OKOA-II consolida su posición como la más eficiente, logrando hervir el agua en solo 12 minutos con una eficiencia térmica del 33% y el menor consumo de combustible (135 g/l). La cocina Martina también demuestra un excelente rendimiento, con un tiempo de ebullición de 19 minutos. En el lado opuesto, la cocina ONIL presenta el peor desempeño, siendo la más lenta con 62 minutos para hervir el agua y una eficiencia del 15%. Por su parte, la Patsari muestra una ligera mejora respecto a la fase anterior, pero sigue por debajo del resto de los modelos. Finalmente, en la fase BP la cocina OKOA-II lidera con la mayor eficiencia térmica, alcanzando un 25%. Por otro lado, la cocina Martina destaca por su alta potencia de 11 kW, lo que la hace ideal para cocciones que demandan un calor más intenso.

## REFLEXIONES FINALES

Los resultados que se obtuvieron a través de la implementación del protocolo WBT versión 4.2.3 acerca del rendimiento de la cocina Martina vs. el rendimiento de un fogón tradicional confirman lo analizado empíricamente por la familia usuaria: efectivamente la cocina martina permite un ahorro significativo de leña. Se pudo corroborar que en todos los casos la Cocina Martina alcanza más rápido el punto de ebullición del agua, lo que impacta a su vez en menor tiempo de cocción y mayor confort por parte de

los usuarios. También se logró apreciar que, un buen manejo del fuego la Cocina Martina permite un ahorro muy significativo de la leña, sobre todo para lograr el punto de ebullición de las ollas.

Sumado a estos resultados se encontró, que el uso de esta cocina logró reducir significativamente la contaminación directa del aire que llega al usuario de la cocina y habitaciones cercanas, propia de los fogones abiertos, debido a que el humo de la combustión logra salir de la cocina por la chimenea. Además, el confort a la hora de cocinar fue mucho mayor, ya que el usuario no se encuentra expuesto constantemente al fuego, se debe alimentar mucho menos el fuego para mantenerlo, no se está agachado a la hora de cocinar, entre otros beneficios.

A partir del desarrollo de este estudio y sumando a que el prototipo de cocina fue adoptado positivamente por la familia se puede afirmar que efectivamente la Cocina Martina cumple con sus dos principales metas a la hora de implementación: mejora el aire dentro de la cocina y reduce el consumo de leña.

### ***Prospecciones a futuro***

Se proyecta repetir el estudio con un mayor número de ensayos y sistematizando las formas de realizar el fuego a fin de cuantificar efectivamente la proporción de reducción de leña en función de las técnicas de uso del fuego. Además, uno de los próximos estudios en este prototipo podría ser el análisis de emisiones provenientes de la chimenea, cuya metodología para efectuar el mismo está incluida en el protocolo WBT, y disponiendo de los equipos de medición requeridos, sería posible efectuar este análisis. Además, se podría analizar el impacto del uso de la cocina en términos de calefacción del ambiente, evaluando la cantidad de calor que se acumula y cómo se trasfiere este calor al ambiente.

Por otro lado, la familia propietaria de cocina Martina está valorando realizar algunas adecuaciones que le permitan mejorar el uso cotidiano de la cocina. Algunas de las propuestas son cambiar la entrada o boca del fuego, ya que, al estar en constante contacto con este espacio, consideran que puede ser un riesgo y puede ocasionar accidentes. Desean colocar una parrilla más fina en el cenicero, esto para no perder las brasas y que puedan retirarlas y utilizarlas posteriormente para cocción de otros alimentos. Además, desde el equipo PEyGeT se evaluó que existe mucha energía en forma de calor que se disipa al ambiente por medio de la chimenea. Esta energía podría ser aprovechada, por ejemplo, para el calentamiento de agua por medio de un intercambiador de calor. Las adecuaciones que se desean realizar son fáciles de incorporar, y no requieren de la presencia de técnicos especializados. Se podría avanzar también con un estudio más sistemático de las percepciones de las familias usuarias sobre el ahorro de leña y otros beneficios asociados a esta tecnología, recolectando información valiosa para futuros desarrollos.

Por último, cabe señalar que la correcta apropiación y evaluación de este prototipo de cocina mejorada sienta las bases para la construcción de cocinas mejoradas en los hogares rurales de las familias de Comunidad Kondorwaira. De esta manera se comenzará a abordar la problemática in situ. Para poder desarrollar esta propuesta se deberá evaluar el uso de adobe y barro para las cocinas, debido a que los ladrillos implican una gran complejidad a la hora de trasladarlos a las zonas rurales de la comunidad. Queda claro que, a partir de este y otros trabajos, la implementación de cocinas de este tipo tiene un muy alto potencial de mejora de las condiciones de vida de las familias que habitan en los Cerros de Salta, así como en otros territorios.

### **REFERENCIAS**

- Bailis, R., Berrueta, V., Chengappa, C., Dutta, K., Edwards, R., Masera, O., y Smith, K. R. (2007). Performance testing for monitoring improved biomass stove interventions: Experiences of the Household Energy and Health Project. *Energy for Sustainable Development*, 11(2), 57–70. [https://doi.org/10.1016/S0973-0826\(08\)60400-7](https://doi.org/10.1016/S0973-0826(08)60400-7)
- Condori Alarcón, V. L., y Albarracín Dekker, J. (2016). *Evaluación expost del proyecto “Mejorando la calidad de vida de la familia desde la cocina en el municipio de La Asunta del departamento de La Paz”* [Tesis de maestría, Universidad Mayor de San Andrés]. Repositorio Universidad Mayor de San Andrés.

- Global Alliance for Clean Cookstove. (2014). *The water boiling test version 4.2.3: Cookstove emissions and efficiency in a controlled laboratory setting*. GACC. <https://cleancooking.org/protocols/>
- Grimsby, L. K., Rajabu, H. M., y Treiber, M. U. (2016). Multiple biomass fuels and improved cook stoves from Tanzania assessed with the Water Boiling Test. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 14, 63–73. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2016.01.004>
- Loayza, M. R. (2009). *Manual para la construcción de cocinas mejoradas Malena*. Cooperación Técnica Alemana – GTZ, Programa de Desarrollo Agropecuario.
- Manrique, S. M., Mosconi, L., Subelza, C., y Honorato, M. (2023). Capítulo III: Biocombustibles sólidos en S. M. Manrique, C. Binda, A. Salvo y B. Balderrama (Eds.), *Usos y aplicaciones energéticas de la biomasa: Hacia una bioeconomía circular*. Guía científico-técnica (pp. 57–89). CYTED Ediciones.
- Medina, P., Berrueta, V., Martínez, M., Ruiz, V., Edwards, R. D., y Masera, O. (2017). Comparative performance of five Mexican plancha-type cookstoves using water boiling tests. *Development Engineering*, 2, 20–28. <https://doi.org/10.1016/j.deveng.2016.06.001>
- Olaya, B. (2017). *Una aproximación a la reducción de la contaminación intradomiciliaria a través de la mejora de la habitabilidad básica* [Tesis de maestría, Centro de Innovación en Tecnología para el Desarrollo Humano]. <https://oa.upm.es/47462/>
- Pérez Domínguez, K. M., y Belmonte, S. (2022). ¿Y vos, creés en la pachamama? Naturaleza(s) otra(s) y saberes locales: Una aproximación a las relaciones socio-naturales y cosmovisión de la comunidad originaria kolla Kondorwaira. *Revista Ra Ximhai*, 18(6 Especial), 15–42. <https://doi.org/10.35197/rx.18.06.2022.01.kp>
- Pérez Domínguez, K. M., y Belmonte, S. (2024). Arriba están los cerros y abajo la ciudad: Categorizaciones locales y construcción territorial de una comunidad originaria kolla en la provincia de Salta. *Huellas*, 28(2), 68–87. <https://doi.org/10.19137/huellas-2024-2819>
- Troncoso, K., Smith, K. R., Tagle, M., Galeano, A., Torres, R., y Soares da Silva, A. (2018). Afecciones respiratorias por el uso de leña y carbón en comunidades de Paraguay. *Pediatría (Asunción)*, 45(1), 45–52. <https://doi.org/10.31698/ped.45012018006>
- Vicente, E. D., Figueiredo, D., y Alves, C. (2024). Toxicity of particulate emissions from residential biomass combustion: An overview of in vitro studies using cell models. *Science of the Total Environment*, 927, 171999. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171999>

## CONSTRUCTION AND EVALUACIÓN OF AN IMPROVED STOVE FOR SALTÁ'S HILLS

**ABSTRACT:** This article reports on the design, evaluation, and adoption of a prototype improved wood-burning stove called “Cocina Martina,” developed for use in the Cerros de Salta region. The technology addresses challenges associated with traditional open-fire stoves commonly used in local household kitchens, which are linked to health concerns and high wood consumption. The study evaluates the stove’s performance in terms of wood consumption using a Water Boiling Test, measuring parameters such as water boiling time, specific wood consumption, cooking efficiency, and fuel efficiency. The same test was conducted on a traditional open-fire stove for direct comparison. Results indicate that the Cocina Martina reduces wood usage relative to the traditional method, as reflected by the experiences of user families after one year of prototype use. The technology is designed to meet its primary objectives and may be suitable for replication in the Cerros de Salta region and other rural contexts.

**Keywords:** Wood-based improved stove, WBT methodology, adopted technology.

## **PREDICCIÓN DIARIA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA DE UN SISTEMA MICROEÓLICO EMPLEANDO REDES NEURONALES LONG SHORT-TERM MEMORY**

**Andrés Crespo<sup>1</sup>, Claudio Reineri<sup>1,3</sup>, Leonardo Sanchez<sup>1</sup>, Daniel Anunziata<sup>2</sup>, Eugenia Yorge<sup>1</sup>, Gabriel Campetelli<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Instituto de Protecciones de Sistemas Eléctricos de Potencia

<sup>2</sup>Grupo de Investigación e Innovación Tecnológica aplicada a la Ciencia de Datos  
Facultad de Ingeniería

Universidad Nacional de Río Cuarto

Ruta Nacional 36 Km. 601, 5800 Río Cuarto

Tel. 0358-4676171 e-mail: [creineri@ing.unrc.edu.ar](mailto:creineri@ing.unrc.edu.ar)

<sup>3</sup>Centro de Investigación, Desarrollo y Transferencia de Ingeniería Eléctrica  
Universidad Tecnológica Nacional, Regional Córdoba  
Maestro M. Lopez esq. Cruz Roja Argentina, S/N

**RESUMEN:** Este trabajo presenta un modelo de predicción a corto plazo (24 h) de la generación eléctrica de un sistema micro-eólico (ME) empleando redes neuronales recurrentes del tipo Long Short-Term Memory (LSTM). Como insumo se integran los pronósticos horarios de velocidad y dirección del viento obtenidos mediante el modelo WRF del Observatorio Hidro-Meteorológico de Córdoba (OHMC) con registros históricos de energía generada. Se efectúa un análisis estadístico del recurso eólico que permitió caracterizar el viento local. Previo al entrenamiento se aplica un proceso de selección, depuración y normalización de datos para reducir la influencia de mediciones atípicas y mejorar la calidad de las entradas. El modelo fue optimizado mediante ajuste de hiperparámetros claves (número de neuronas, tipo de optimizador, tasa de abandono, tamaño de lote), seleccionando la configuración que minimizó el RMSE en el conjunto de validación. Los resultados muestran que la arquitectura más profunda permitió extender el horizonte de predicción a 24 h con un error comparable al de un modelo de referencia de 8 h, aunque con mayor costo computacional. En conjunto, se confirma la viabilidad de las LSTM para sistemas ME, aportando precisión y generalización adecuadas para la planificación y gestión de microrredes o mercados eléctricos locales.

**Palabras clave:** Micro Turbina Eólica, Predicción, LSTM.

### **INTRODUCCIÓN**

En las últimas décadas, el sector eléctrico ha atravesado una profunda transformación impulsada, tanto por el desarrollo de tecnologías de conversión de energía basadas en fuentes renovables, como por la electrificación de nuevos usos finales, tales como la movilidad eléctrica y el acondicionamiento térmico. Estos cambios intensifican la transición hacia una matriz energética con mayor participación de la electricidad (IEA, 2021).

En este nuevo escenario, las redes de distribución deben enfrentar desafíos asociados al incremento y variabilidad de la demanda, así como a la integración creciente de generación distribuida. Mantener el equilibrio entre oferta y demanda se torna más complejo, requiriendo soluciones innovadoras que aseguren la operación estable del sistema (Mehigan et al., 2018).



Esta obra está bajo Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

El avance de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TICs) ha facilitado la implementación de Redes Inteligentes (Smart Grids), capaces de gestionar en tiempo real el flujo de energía y la información asociada (Bani-Ahamed et al., 2018; Ayadi et al., 2020). La gestión de estas redes depende en gran medida de modelos precisos que permitan predecir tanto la generación como la demanda, de modo que las decisiones operativas puedan anticiparse a variaciones significativas (Khaleh y Laaksonen, 2022; Ahmada et al., 2020).

Las técnicas de predicción se pueden clasificar según distintos criterios, como el horizonte temporal (Kaur et al., 2015) o la metodología utilizada: modelos estadísticos clásicos (ARMA, ARIMA), de aprendizaje automático (SVM, SVR) y de aprendizaje profundo (FFNN, BPNN, RNN, LSTM, CNN) (Ahmada et al., 2020).

En este contexto, los sistemas ME han comenzado a cobrar relevancia, especialmente en entornos como microrredes o mercados eléctricos locales (Zahraoui et al., 2023; Sousa et al., 2019; Maturana et al., 2023). Sin embargo, la predicción de su producción presenta dificultades particulares debido a las turbulencias y variabilidad del viento en entornos urbanos o con obstáculos que alteran su flujo natural (Reja et al., 2022; Anup et al., 2019).

Diversos estudios han demostrado que los modelos basados en inteligencia artificial, en particular las redes neuronales de memoria a largo y corto plazo (LSTM), superan en capacidad predictiva a los métodos físicos tradicionales (Zhang et al., 2014; Xiong et al., 2022). No obstante, la literatura específica sobre predicción de generación eléctrica en sistemas ME mediante LSTM es aún escasa. Algunos trabajos, como el de Kumar et al. (2020), aplican LSTM-RNN para predecir velocidad del viento en microrredes aisladas, actualizando el estado del modelo con valores observados para mejorar la precisión, aunque sin predecir directamente la energía, lo que puede conducir a errores relevantes debido a la no linealidad entre viento y producción.

En su mayoría, las investigaciones con LSTM se han enfocado en grandes parques eólicos, explorando arquitecturas híbridas y combinadas con mecanismos de atención o redes convolucionales (Du, 2019; Xiong et al., 2022). Algunos autores han incorporado pronósticos meteorológicos de modelos numéricos como el WRF (Sierra et al., 2023; Xu et al., 2021), que provee predicciones de alta resolución espacial y temporal de variables atmosféricas claves.

Adomako et al. (2024) plantea modelos basados en LSTM para corregir los sesgos en sí de los modelos WRF. AbdElkader et al. (2025), incorpora elementos como validación cruzada procurando reducir sesgos de aprendizaje. Liu et al. (2024) introduce un modelo de filtro a un esquema que contiene a una LSTM en paralelo con una red de convolución temporal (TCN) para eliminar ruidos, suavizar las series temporales y mejorar el rendimiento de las predicciones del modelo. Por otro lado, Liu y Zhou (2011) presenta un modelo LSTM de múltiples variables de entrada con múltiples pasos de salida acompañado de un mecanismo de atención.

En el presente trabajo se emplean como variables de entrada las predicciones de velocidad y dirección del viento generadas por el modelo WRF y provistas por el Observatorio Hidro-Meteorológico de Córdoba (OHMC), integrándolas a un modelo LSTM entrenado para predecir directamente la energía generada por un sistema ME.

El objetivo central es el desarrollo de un sistema de predicción de 24 h que permita mejorar la planificación y operación de microrredes y facilitar la gestión de generación y carga en microrredes y/o la participación de estos sistemas en micromercados eléctricos (MME). Para ello se plantea combinar la robustez de los modelos de predicción meteorológica con la capacidad de las LSTM para modelar relaciones no lineales y dependencias temporales de largo alcance. También, se pretende comparar la arquitectura, los resultados obtenidos y el costo computacional frente a un modelo de referencia con horizonte temporal de 8 h.

## METODOLOGÍA

La metodología empleada en este trabajo se basa en gran medida en la desarrollada en (Crespo et al., 2024). Sin embargo, se introducen modificaciones cruciales para abordar el nuevo horizonte de predicción de 24 h y para mejorar la calidad de los datos de entrada se introduce un proceso de limpieza.

### ***Redes Neuronales***

Para la comprensión detallada de las Redes Neuronales (NN) básicas y la evolución hacia las Redes Neuronales Recurrentes (RNN) y, en particular, las Long Short-Term Memory (LSTM), se remite al lector a (Crespo et al., 2024). Allí se describe el funcionamiento de una NN básica y sus limitaciones, tales como la falta de memoria y el problema del desvanecimiento del gradiente. También se detalla la mejora introducida por las RNN para manejar datos secuenciales, y el modo en que las LSTM superan estas limitaciones al incorporar un mecanismo de celda de memoria con puertas de entrada, salida y olvido. Esta capacidad de las LSTM para manejar dependencias temporales a largo plazo es lo que les confiere un gran potencial en aplicaciones para predicción de series temporales, como la producción de energía eólica. Las fortalezas de las LSTM frente a los modelos físicos, incluyendo su capacidad para modelar relaciones no lineales complejas y aprender directamente de los datos históricos sin necesidad de modelos explícitos, se mantienen como una justificación fundamental para su empleo en este contexto.

### ***Instalación de la Turbina ME***

La instalación de la Microturbina Eólica (ME) utilizada en este estudio es la misma que en (Crespo et al., 2024). Se encuentra ubicada en el Instituto de Protecciones de Sistemas Eléctricos de Potencias (IPSEP-UNRC), en la ciudad de Río Cuarto, provincia de Córdoba (coordenadas 33°06'38,3"S 64°17'50,6"O). En (Crespo et al., 2024) se presenta el emplazamiento donde se observan obstáculos naturales como líneas de arbolado en las direcciones Norte y Noreste, a aproximadamente 20 y 40 m de distancia, con alturas de copa que superan el eje horizontal de la turbina, lo que perturba el flujo normal del viento.

La turbina ME es un aerogenerador EOLUX 1200 48V con una potencia nominal de 1200 W a 14 m/s y una velocidad de arranque de 4,5 m/s. Posee un generador trifásico síncrono de imanes permanentes, un rotor de tres palas con un ángulo de 6 grados y un diámetro de 2,1 m. Se instala sobre un reticulado metálico de 12 m que se apoya en una cubierta de techo de 9 m. El acoplamiento a la red eléctrica se realiza mediante un inversor ABB UNO-2.0-I-W, y las variables eléctricas son registradas por un medidor inteligente Dimet-G (Discar Metering) gestionado por el sistema online Mr.Dims.

### ***Selección y depuración de datos***

En primer lugar, se decidió prescindir de los registros provistos por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), utilizados en (Crespo et al., 2024), ya que estaban restringidos a un rango horario (los equipos de medición se encontraban activados entre las 6:00 h y se apagan a las 22:00 h). Esta limitación reducía la base de datos combinada (OHMC + SMN + energía medida) a alrededor de 6.500 registros horarios, frente a los 10.200 registros disponibles al trabajar exclusivamente con el OHMC. Optar por esta última fuente permitió conservar la serie horaria completa, aumentar la cobertura temporal (24 h) y robustecer el entrenamiento del modelo al evitar sesgos asociados a la exclusión de los períodos nocturnos.

En segundo lugar, se implementaron límites para depurar las series temporales, logrando descartar un número significativo de muestras atípicas. Estos valores pueden atribuirse a errores de medición, como energía negativa, picos significativos por fallas en el medidor, errores en el modelo que genera las predicciones de velocidades de viento. La inclusión de estos datos afecta negativamente el desempeño y la precisión del modelo, por lo que se procedió a eliminarlos para garantizar una mejor calidad de entrenamiento.

### ***Análisis del recurso eólico***

Se analizaron dos años completos de la información provista por el OHMC, tanto el año 2022 como el 2023, se ha determinado el valor medio y la desviación estándar de velocidad de viento. Además de los parámetros de forma (k) y escala (c) de la distribución de Weibull, comúnmente utilizada para ajustar la



frecuencia de la velocidad del viento (Anup et al., 2019). Esto se muestra en la Tabla 1, es de interés tener en cuenta que a diferencia de (Crespo et al., 2024), aquí se analizó la totalidad del día, por lo que resultan coherente las discrepancias respecto a las magnitudes estadísticas presentadas en (Crespo et al., 2024).

*Tabla 1: Magnitudes estadísticas de la velocidad del viento en km/h para 3 años de análisis*

| Año  | Valor medio | Desviación Std. | c-Weibull | k-Weibull |
|------|-------------|-----------------|-----------|-----------|
| 2022 | 14,23       | 6,73            | 2,26      | 16,07     |
| 2023 | 13,46       | 6,413           | 2,24      | 15,2      |

En la Figura 1, se presenta la gráfica de distribución acumulada de probabilidades de velocidad de viento empleando un escalamiento de bins cada 5 km/h para los dos años analizados. Esto resulta en un buen indicador de la regularidad del recurso y se destaca que en más del 60% del tiempo no se alcanza la velocidad de arranque de la turbina ME (16,2 km/h).

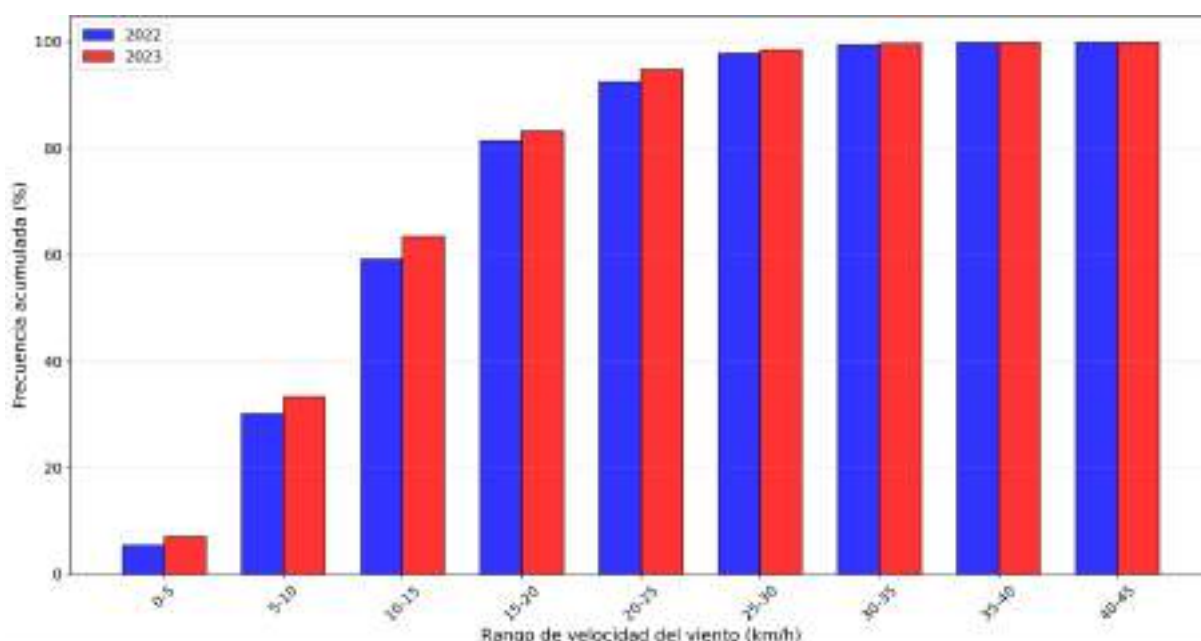


*Figura 1: Distribución acumulada de probabilidades de velocidad de viento para los años 2022-2023.*

En la Figura 2, se presenta una rosa de vientos para todos los registros en donde se superó la velocidad de arranque de la turbina (16,2 km/h). Se observa claramente un comportamiento similar respecto a la energía específica estimada a partir de los registros de velocidad de viento provistos por el SMN en (Crespo et al., 2024). Los registros en general, y las velocidades importantes, predominan del sector Norte, Noreste, Sur y Suroeste. En (Crespo et al., 2024) se pudo visualizar que la generación de energía asociada a los sectores Norte y Noreste se ve afectada por la presencia de obstáculos descrita en la sección 2.2 de este trabajo.

### **Implementación del Modelo de Predicción**

A continuación, se presenta una breve descripción de la implementación de un modelo basado en una red LSTM para la predicción de energía eléctrica en una ventana de 24 h. El desarrollo del modelo predictivo se realizó en Python, utilizando las librerías TensorFlow y Keras. La arquitectura empleada sigue una estructura de red LSTM similar a la utilizada en (Crespo et al., 2024), en el cual se abordó la predicción de energía eléctrica en una ventana de 8 h.

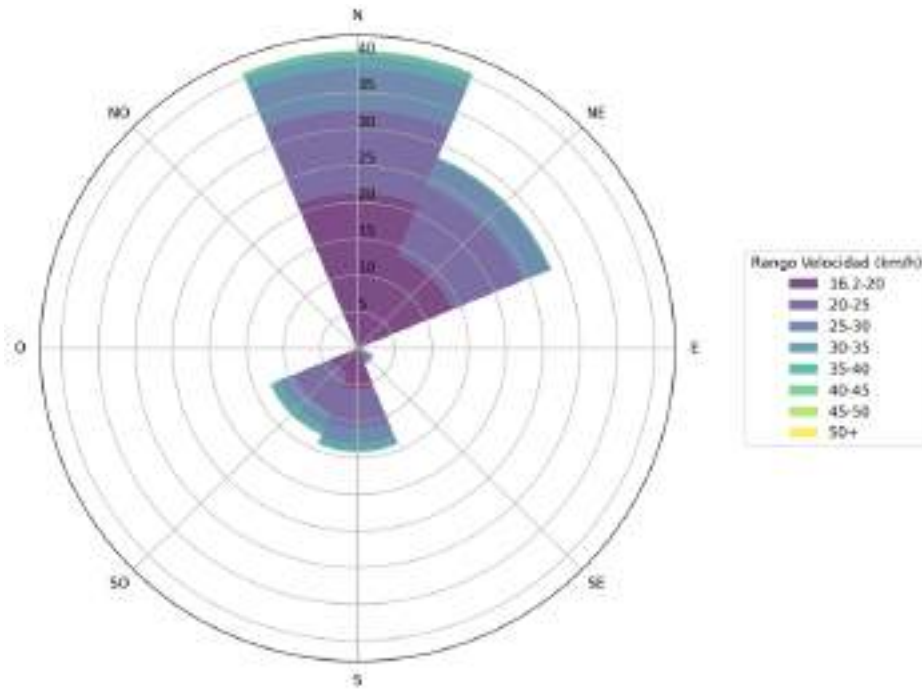


Figura 2: Rosa de vientos de velocidades mayores a la velocidad de arranque del aerogenerador ME.

### Preparación de Datos

Las series de tiempo que se emplean para todas las variables están escaladas en pasos por hora: las velocidades y direcciones del viento son valores medios para cada hora y los de energía se corresponden con la producción total para cada hora. En función del horizonte de predicción se define la longitud temporal de ventanas de los conjuntos de entrenamiento, validación y predicción.

Las entradas del modelo son: (i) la energía generada medida durante las 0 h a 23 h del día previo, (ii) las velocidades del viento pronosticadas (OHMC) en componentes  $u$  y  $v$  (a partir de la dirección) para esas mismas horas del día previo, y (iii) las velocidades del viento pronosticadas (OHMC) en componentes  $u$  y  $v$  para las 24 h a 47 h, correspondientes al día siguiente. Con estos datos, el modelo estima la producción de energía para el periodo de 24 h a 47 h.

De la totalidad de los datos disponibles (agosto 2021-septiembre 2022), el 80% de los mismos se destinó al entrenamiento del modelo, un 10% para la validación y el último 10% para su evaluación. Los criterios generales para la asignación de estos porcentajes son, básicamente, que el modelo tenga suficiente información para aprender patrones y no se sobreajuste en relación al conjunto de validación y contar también con un volumen de datos para evaluar el modelo.

Para eliminar la dimensionalidad de las variables de entrada del modelo de predicción, que poseen diferentes rangos de valores, se realiza una normalización de cada una de ellas, como se expresa en la Ec. (1).

$$X_{nor} = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (1)$$

### Función de Pérdida y Métodos de Evaluación

La función de pérdida empleada para cuantificar el error del modelo durante el entrenamiento y guiar el proceso de optimización, es el Error Cuadrático Medio (MSE). Esta métrica, se calcula como el promedio de los cuadrados de las diferencias entre las predicciones y los valores medidos.

Para evaluar el desempeño del modelo de predicción de energía eléctrica, se utilizaron dos métricas principales: el Error Absoluto Medio (MAE), que mide el promedio de las diferencias absolutas entre los valores reales y los predichos y la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE), que calcula la raíz

cuadrada del promedio de los errores al cuadrado, penalizando más fuertemente los errores grandes y siendo sensible a desviaciones importantes.

### Conformación del Modelo

El modelo está conformado por una arquitectura LSTM profunda con dos capas LSTM, una capa densa intermedia y una capa de salida con 24 neuronas, correspondiente al horizonte de predicción de 24 h. Es importante tener en cuenta que la parametrización completa del modelo se presenta en la sección resultados, luego de un proceso de optimización.

Existen una serie de parámetros que se ajustan durante el entrenamiento del modelo. El primero es el número de unidades, o neuronas, de cada capa LSTM, que define la capacidad del modelo para aprender patrones complejos. El segundo parámetro son las epochs (épocas), que indican la cantidad de veces que el modelo procesa todo el conjunto de datos durante el entrenamiento. El tercero es el batch size (tamaño del lote), que corresponde a la cantidad de secuencias que se procesan simultáneamente antes de actualizar los pesos del modelo. Además, se utilizan capas de Dropout (Tasa de abandono) para evitar el sobreajuste, es decir, para atenuar la posibilidad que el modelo memorice los datos en lugar de generalizar. Para optimizar el aprendizaje y minimizar la función de pérdida se emplean optimizadores como RMSprop o Adam.

La Figura 3 muestra un esquema general del modelo, donde se representan las entradas, las salidas, las capas LSTM, de dropout, densas y la de salida.

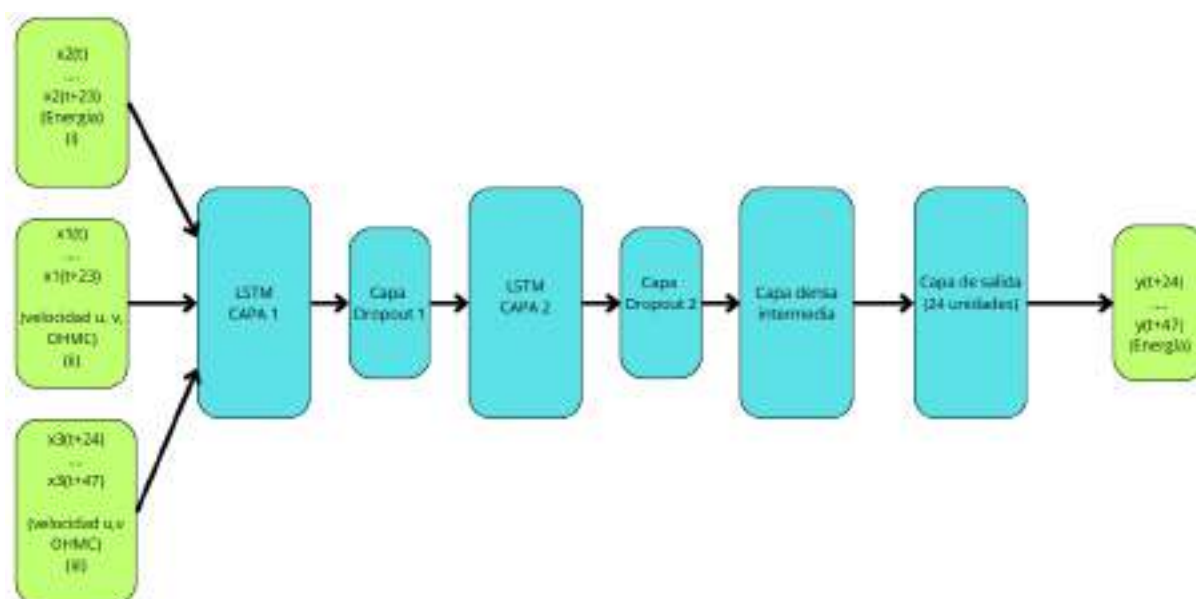


Figura 3: Esquema del modelo conformado.

## RESULTADOS

Se realizó una optimización de hiperparámetros tomando como criterio principal la minimización del RMSE sobre el conjunto de validación, debido a su mayor sensibilidad a errores significativos, lo cual es relevante en predicción de energía. También se evaluaron métricas como el MAE con fines comparativos, para contar con una visión más completa del desempeño del modelo.

En la Tabla 2 se presentan los resultados de diversas configuraciones evaluadas durante el proceso de optimización del modelo LSTM. Se analizaron combinaciones de hiperparámetros clave como, la cantidad de unidades por capa, [A, B, C]), donde los dos primeros valores corresponden a capas LSTM secuenciales y el último a una capa densa previa a la salida, la tasa de abandono, el optimizador, el tamaño de lote y la cantidad de épocas. El objetivo principal fue minimizar el RMSE en el conjunto de validación.

*Tabla 2: Resultados de la Optimización de Hiperparámetros del Modelo LSTM*

| exp    | layers_units   | epochs | batch_size | dropout | optimizer | rmse_val, Wh | rmse_test, Wh |
|--------|----------------|--------|------------|---------|-----------|--------------|---------------|
| exp_16 | [128, 96, 64]  | 30     | 20         | 0,3     | rmsprop   | 31,55        | 44,32         |
| exp_26 | [330, 64, 64]  | 30     | 7          | 0,2     | rmsprop   | 31,82        | 41,35         |
| exp_10 | [128, 96, 64]  | 30     | 7          | 0,2     | rmsprop   | 31,91        | 42,78         |
| exp_12 | [128, 96, 64]  | 30     | 7          | 0,3     | rmsprop   | 31,92        | 41,61         |
| exp_29 | [330, 64, 64]  | 30     | 20         | 0,2     | adam      | 32,04        | 41,14         |
| exp_24 | [500, 150, 78] | 30     | 20         | 0,3     | rmsprop   | 32,10        | 42,13         |
| exp_27 | [330, 64, 64]  | 30     | 7          | 0,3     | adam      | 32,30        | 43,98         |
| exp_31 | [330, 64, 64]  | 30     | 20         | 0,3     | adam      | 32,31        | 42,70         |
| exp_11 | [128, 96, 64]  | 30     | 7          | 0,3     | adam      | 32,36        | 42,89         |
| exp_17 | [500, 150, 78] | 30     | 7          | 0,2     | adam      | 32,39        | 42,29         |
| exp_4  | [64, 32, 32]   | 30     | 7          | 0,3     | rmsprop   | 32,41        | 41,11         |
| exp_8  | [64, 32, 32]   | 30     | 20         | 0,3     | rmsprop   | 32,54        | 42,92         |
| exp_22 | [500, 150, 78] | 30     | 20         | 0,2     | rmsprop   | 32,57        | 42,94         |
| exp_3  | [64, 32, 32]   | 30     | 7          | 0,3     | adam      | 32,63        | 42,08         |
| exp_18 | [500, 150, 78] | 30     | 7          | 0,2     | rmsprop   | 32,73        | 42,41         |
| exp_14 | [128, 96, 64]  | 30     | 20         | 0,2     | rmsprop   | 32,73        | 40,27         |
| exp_6  | [64, 32, 32]   | 30     | 20         | 0,2     | rmsprop   | 32,90        | 46,03         |
| exp_20 | [500, 150, 78] | 30     | 7          | 0,3     | rmsprop   | 33,07        | 40,97         |
| exp_2  | [64, 32, 32]   | 30     | 7          | 0,2     | rmsprop   | 33,11        | 41,80         |
| exp_15 | [128, 96, 64]  | 30     | 20         | 0,3     | adam      | 33,20        | 43,46         |
| exp_23 | [500, 150, 78] | 30     | 20         | 0,3     | adam      | 33,28        | 43,29         |
| exp_21 | [500, 150, 78] | 30     | 20         | 0,2     | adam      | 33,35        | 45,39         |
| exp_9  | [128, 96, 64]  | 30     | 7          | 0,2     | adam      | 33,70        | 43,04         |
| exp_28 | [330, 64, 64]  | 30     | 7          | 0,3     | rmsprop   | 33,80        | 43,47         |
| exp_25 | [330, 64, 64]  | 30     | 7          | 0,2     | adam      | 33,91        | 44,90         |
| exp_19 | [500, 150, 78] | 30     | 7          | 0,3     | adam      | 34,17        | 42,13         |
| exp_30 | [330, 64, 64]  | 30     | 20         | 0,2     | rmsprop   | 34,35        | 45,09         |
| exp_5  | [64, 32, 32]   | 30     | 20         | 0,2     | adam      | 34,70        | 47,65         |
| exp_7  | [64, 32, 32]   | 30     | 20         | 0,3     | adam      | 34,75        | 43,88         |
| exp_13 | [128, 96, 64]  | 30     | 20         | 0,2     | adam      | 34,85        | 47,65         |
| exp_1  | [64, 32, 32]   | 30     | 7          | 0,2     | adam      | 35,06        | 45,33         |

En la Tabla 3 se muestran las métricas MAE y RMSE para el conjunto de validación y prueba correspondientes al modelo seleccionado como óptimo (exp 16). Además, en la Figura 4, se presenta la evolución de ambas métricas por hora para el conjunto validación.

Tabla 3: Métricas para los conjuntos de validación y prueba

| Conjunto   | MAE   | RMSE  |
|------------|-------|-------|
| Validación | 23,07 | 31,55 |
| Prueba     | 30,26 | 44,32 |

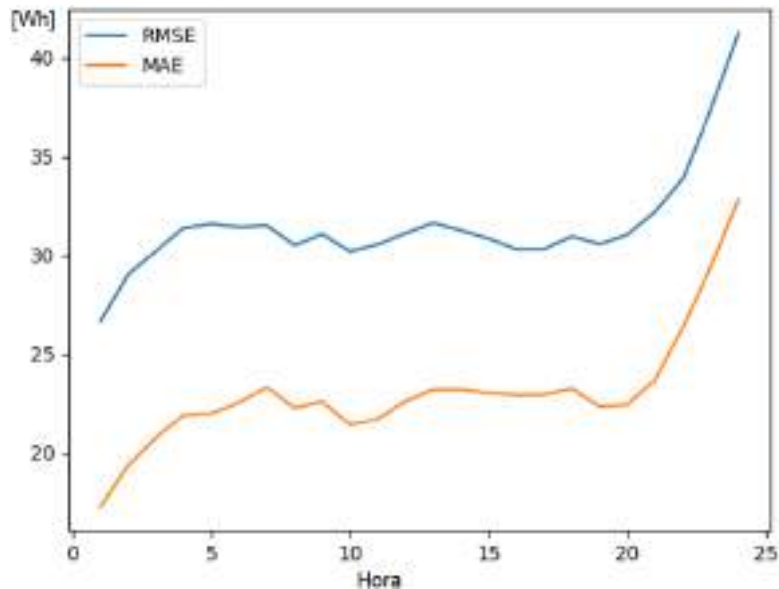


Figura 4: Evolución temporal de métricas para el conjunto de validación.

En la Figura 5 se puede apreciar la evolución temporal de los valores medidos y las predicciones durante parte del tramo de evaluación. Las predicciones se realizan con un horizonte de 24 h, los puntos verdes y amarillos representan el inicio da cada una de ellas.

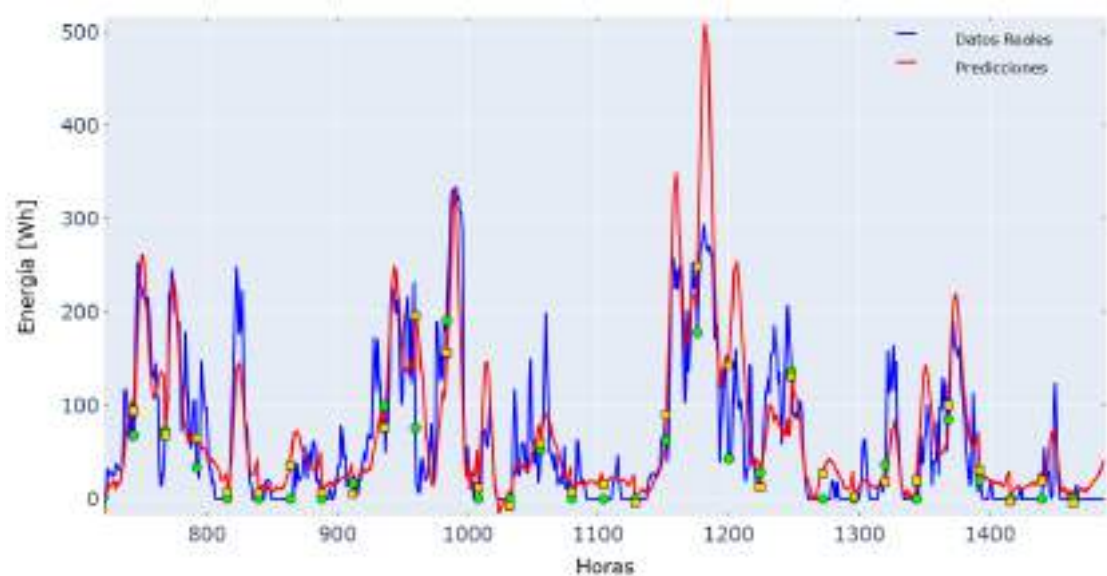


Figura 5: Evolución temporal de predicciones y datos medidos.

En relación con (Crespo et al., 2024), el modelo optimizado de este estudio se configuró con dos capas LSTM, una capa densa intermedia, capas de dropout y una capa densa de salida; mientras que en (Crespo et al., 2024) el modelo optimizado se obtuvo con una sola capa LSTM y una capa densa de salida.

Realizando la desnormalización del error RMSE del conjunto de validación del modelo optimizado en (Crespo et al., 2024), se obtiene un valor en torno a los 55 Wh, energéticamente similar a los 31,6 Wh que se obtuvo para el conjunto de validación con el modelo seleccionado.

Los resultados expuestos en la Tabla 3, se obtuvieron con un batchsize pequeño en relación al batchsize de 250 utilizado en el modelo optimizado en (Crespo et al., 2024).

## DISCUSIONES

Para alcanzar errores de predicción aceptables fue necesario incrementar la complejidad del modelo, incorporando dos capas LSTM, una capa densa intermedia y mecanismos de dropout, además de una capa densa de salida. Estas modificaciones estructurales, en conjunto, permitieron captar patrones temporales más amplios, aunque con un costo computacional más elevado debido a la mayor complejidad del modelo.

Un aspecto destacado fue el uso de un batchsize muy reducido respecto al valor empleado en (Crespo et al., 2024). Esta estrategia también aumentó el costo computacional, ya que al procesar menos muestras por lote es necesario ejecutar un número considerablemente mayor de iteraciones en cada época.

En cuanto al desempeño, el modelo alcanzó un error ligeramente menor al reportado en Crespo et al. (2024). Aunque la diferencia en magnitud pueda parecer moderada, resulta relevante desde una perspectiva energética, ya que implica una mejora tangible en la precisión de la estimación horaria de generación. Cabe subrayar que la comparación debe interpretarse con cautela, dado que existen disparidades en los conjuntos de datos y en los horizontes de predicción considerados en ambos estudios; no obstante, la reducción del error confirma un avance significativo.

El proceso de optimización de hiperparámetros mostró que, aunque se evaluaron diversas configuraciones de capas, unidades, tasas de abandono, optimizadores y tamaños de lote, los mejores resultados de validación se mantuvieron en un rango estrecho de RMSE (entre 31 y 35 Wh). En este contexto, el modelo seleccionado (exp\_16) logró un RMSE de validación de 31,55 Wh y un RMSE de prueba de 44,32 Wh, acompañado de un MAE de 23,07 Wh y 30,26 Wh respectivamente. La diferencia entre los errores de validación y prueba indica una adecuada capacidad de generalización, aunque el incremento en RMSE en el conjunto de prueba podría estar relacionado con condiciones no representadas completamente en el entrenamiento.

Asimismo, el análisis horario (Figura 4) evidenció un aumento progresivo del error hacia las últimas horas del horizonte de 24 h, lo que refleja la complejidad adicional de extender las predicciones en el tiempo. De manera complementaria, la comparación visual entre valores medidos y predichos (Figura 5) mostró que, aunque el modelo reproduce adecuadamente las tendencias generales y las variaciones de corto plazo, persisten desviaciones puntuales en magnitudes específicas.

La mayor profundidad arquitectónica, la introducción de dropout y el empleo de un batchsize reducido se consolidaron como estrategias efectivas para mejorar la representación de patrones temporales y reducir el error. Los resultados en conjunto demuestran que el modelo optimizado ofrece un equilibrio adecuado entre precisión y capacidad de generalización. No obstante, la reducción del error en las últimas horas del horizonte de predicción y la mejora de la robustez ante condiciones no contempladas en el entrenamiento continúan siendo desafíos abiertos, que podrían abordarse mediante enfoques híbridos o técnicas de corrección de sesgo.

## CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos muestran que el modelo de predicción implementado, basado en el uso de series temporales de velocidad y dirección del viento como predictores, logra estimar con buena aproximación la generación de energía eléctrica de un sistema eólico a corto plazo (24 h). Las métricas de evaluación empleadas, RMSE y MAE, permiten cuantificar el desempeño y muestran valores que se

consideran aceptables para aplicaciones operativas, aunque revelan que persisten discrepancias en situaciones de alta variabilidad del recurso eólico.

El análisis comparativo frente a un modelo de referencia con horizonte de 8 h evidenció que extender las predicciones a 24 h exigió incrementar la complejidad arquitectónica y el costo computacional, en particular por el uso de tamaños de lote reducidos (batchsize). Para alcanzar un desempeño adecuado fue necesario pasar de una arquitectura simple (basada en una sola capa LSTM y una capa de salida) a un modelo más profundo, compuesto por dos capas LSTM secuenciales, una capa densa intermedia y la incorporación de mecanismos de dropout. Estas modificaciones estructurales, si bien incrementaron el tiempo de entrenamiento y la demanda de recursos, permitieron mantener errores de predicción similares a los obtenidos en el horizonte temporal de referencia, lo que constituye un avance significativo al ampliar la ventana de estimación sin sacrificar precisión.

El análisis comparativo entre valores medidos y predichos confirma que la tendencia general de la producción horaria es capturada adecuadamente a pesar que la magnitud de los picos de generación presenta ligeras desviaciones. Este comportamiento resultaría consistente con las limitaciones inherentes a los modelos que dependen de pronósticos meteorológicos como entrada, donde pequeños errores en la predicción de la velocidad del viento se amplifican al estimar la potencia.

La inspección temporal de las métricas mostró que el error tiende a incrementarse hacia las últimas horas del horizonte de 24 h, lo que confirma la mayor dificultad de capturar dependencias de largo alcance.

En el marco del estado del arte, la metodología utilizada se alinea con las estrategias de predicción probabilística y determinística aplicadas en entornos con datos limitados, representando una alternativa viable frente a los modelos físicos tradicionales, que suelen requerir información topográfica y de turbulencia más detallada. Asimismo, el uso de métricas estándar como RMSE y MAE permite la comparación con otros trabajos reportados en la literatura, fortaleciendo la validación del enfoque.

Finalmente, los resultados sugieren que una optimización adicional podría lograrse incorporando algunas variables meteorológicas adicionales (por ejemplo, presión atmosférica o temperatura), afinando la calibración del modelo y evaluando su comportamiento bajo distintos horizontes temporales de predicción. Persisten, sin embargo, desafíos vinculados a la reducción del error en las últimas horas del horizonte y a la mejora de la robustez del modelo, aspectos que podrían abordarse mediante enfoques híbridos o técnicas de corrección de sesgo. Estas mejoras, junto con un análisis probabilístico más detallado, permitirían incrementar la confiabilidad del sistema para su uso en la planificación y gestión operativa de la generación ME.

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Observatorio Hidro-Meteorológico de la Provincia de Córdoba (OHMC) por facilitar el acceso a sus series históricas de información meteorológica. A la Secretaría de Ciencia y Técnica de la UNRC por el financiamiento al proyecto en cuyo marco se realizó este trabajo.

## **REFERENCIAS**

- AbdElkader A. G., ZainEldin H., Saafan M. M., (2025). Optimizing wind power forecasting with RNN-LSTM models through grid search cross-validation. *Sustainable Computing: Informatics and Systems* 45, 101054.
- Adomako A., Jamshidi E. J., Yusup Y., Elsebakhi E., Jaafar M. H., Ishak M. I. S., Lim H. S., Ahmad M. Y. (2024). Deep learning approaches for bias correction in WRF model outputs for enhanced solar and wind energy estimation: A case study in East and West Malaysia. *Ecological Informatics* 84, 102898, 1-17.
- Ahmada T., Zhanga H. y Yana B. (2020). A review on renewable energy and electricity requirement forecasting models for smart grid and buildings. *Sustainable Cities and Society*, Elsevier, Vol. 55.
- Anup K.C., Whale J. y Urmee T. (2019). Urban Wind Conditions and Small Wind Turbines in the BuiltEnvironment: A Review. *Renewable Energy*, Elsevier. Vol. 131, pp. 268-283.



- Aslam S, Herodotou H, Mohsin S., Javaid N., Ashraf N. y Aslam S. (2021). A Survey on Deep Learning Methods for Power Load and Renewable Energy Forecasting in Smart Microgrids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, Vol. 144.
- Ayadi F., Colak I., Garip I. y Bulbul H. (2020). Impacts of Renewable Energy Resources in Smart Grid. 8th IEEE International Conference on Smart Grid, Paris, France.
- Bani-Ahmed A., Nasiri A. y Stamenkovic I. (2020). Foundational Support Systems of the Smart Grid: State of the Art and Future Trends. *International Journal of Smart Grid*, Vol. 2, No. 1.
- Crespo, A., Reineri, C., Amatti J., Campetelli, G., Sanchez, L. y Amaya J. (2024). Predicción de corto plazo de generación de energía de un sistema microeólico empleando redes neuronales long short-term memory. *Energías Renovables Y Medio Ambiente - AVERMA*, Vol 28, 150–161.
- Du M. (2019). Improving LSTM Neural Networks for Better Short-Term Wind Power Predictions. 2<sup>nd</sup> International Conference on Renewable Energy and Power Engineering (REPE), Toronto, Canada.
- International Energy Agency (2021). Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector. Revised version, (4th revision).
- Duffie J. A. y Beckman W. A. (1991). *Solar Engineering of Thermal Processes*, 2<sup>a</sup> edición, pp. 54-59. Wiley Interscience, New York.
- Jørgensen K.L. y Reza C. H. (2020), Wind Power Forecasting Using Machine Learning: State of the Art, Trends and Challenges. *IEEE 8th International Conference on Smart Energy Grid Engineering*, pp. 44–59.
- Kaur D., Islam S. N., Mahmud M. A., Haque M. E. y Dong Z. Y. (2015). “Energy Forecasting in Smart Grid Systems: Recent Advancements in Probabilistic Deep Learning”, *The Institution of Engineering and Technology. Research Journals*, pp. 1–15.
- Khajeh H. y Laaksonen H. (2022). Applications of Probabilistic Forecasting in Smart Grids: A Review. *Appl. Sci.* Vol. 12.
- Kumar, D., Mathur, H. D., Bhanot, S. y Bansal, R. C. (2020). Forecasting of solar and wind power using LSTM RNN for load frequency control in isolated microgrid. *International Journal of Modelling and Simulation*, 41(4), 311–323.
- Liu S., Xu T., Du X., Zhang Y., Wu J., (2024). A hybrid deep learning model based on parallel architecture TCN-LSTM with Savitzky-Golay filter for wind power prediction. *Energy Conversion and Management* 302, 118122.
- Liu X. y Zhou J. (2024). Short-term wind power forecasting based on multivariate/multi-step LSTM with temporal feature attention mechanism. *Applied Soft Computing* 150, 111050.
- Maturana J.B., Aguilera F. y Oggier G. (2023), Dimensionamiento del Sistema de Almacenamiento de Energía de una Microred Híbrida para Reducir el Consumo de Energía de la Red Eléctrica, XX Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Control – RPIC.
- Mehigan L., Deane J.P., Gallachóir B.P. y Bertesh V. (2018). A Review of the Role of Distributed Generation in Future Electricity Systems. *Energy*, Elsevier, Vol. 163, pp. 822-836.
- OHMC [en línea] Pronósticos hidro-meteorológicos para la Región Centro (2021-2023). Observatorio Hidro-Meteorológico de la Provincia de Córdoba. Dirección URL: <https://ohmc.ar/> [consulta: de 5 julio de 2025].
- Parag Y. y Ainspan M. (2019). Sustainable microgrids: Economic, environmental and social costs and benefits of microgrid deployment. *Energy for Sustainable Development*, Elsevier. Vol 52, pp. 72-81.
- Reja R., Amin R., Tasneem Z., Ali M. F., Islam M. R., Saha D., Badal F., Ahamed M. H. y Moyeen, S (2022). A Review of the Evaluation of Urban Wind Resources: Challenges and Perspectives. *Energy y Building*, Elsevier. Vol. 257. pp. 1-19.
- Sierra Lorenzo, M., Fuentes Barrios, A., Roque Rodríguez, A. E., Rosquete Estevez, A., & Patiño Avila, D. M. (2023). Comparison of the wind nowcasting generated by the WRF model and an two LSTM models *Revista Cubana de Meteorología*, Vol. 29 Núm. 3.
- Sousa T., Soares T., Pinson P., Moret F., Baroche T. y Sorin E. (2019). Peer-to-peer and communitybased markets: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, 104, pp. 367-378.
- Xiong B., Lou L., Meng X., Wang X., Ma H. y Wang Z. (2022). Short-term wind power forecasting based on Attention Mechanism and Deep Learning. *Electric Power Systems Research*, Vol. 206.
- Xu, W., Liu, P., Cheng, L., Zhou, Y., Xia, Q., Gong, Y., & Liu, Y. (2021). Multi-step wind speed prediction by combining a WRF simulation and an error correction strategy. *Renewable Energy*, 163, 772–782. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.032>

- Zahraoui Y, Korõtko T., Rosin A. y Agabus H. (2023). Market Market Mechanisms and Trading in Microgrid Local Electricity Markets: A Comprehensive Review. *Energies* (MDPI), Vol. 16.
- Zhang Y., Wang J., Wang X. (2014). Review on probabilistic forecasting of wind power generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 32, pp. 255-270.

### **DAILY PREDICTION OF ENERGY GENERATION IN A MICRO WIND SYSTEM USING LONG SHORT-TERM MEMORY NEURAL NETWORKS**

**ABSTRACT:** This work presents a short-term (24 h) prediction model for the electricity generation of a micro wind system (ME) using recurrent neural networks of the Long Short-Term Memory (LSTM) type. As inputs, hourly forecasts of wind speed and direction obtained through the WRF model from the Hydro-Meteorological Observatory of Córdoba (OHMC) are integrated with historical records of generated energy. A statistical analysis of the wind resource was carried out, which allowed the characterization of the local wind conditions. Before training, a process of data selection, cleaning, and normalization was applied to reduce the influence of outlier measurements and improve input quality. The model was optimized by tuning key hyperparameters (number of neurons, optimizer type, dropout rate, batch size), selecting the configuration that minimized RMSE on the validation set. The results show that the deeper architecture made it possible to extend the prediction horizon to 24 h with an error comparable to that of a reference 8 h model, albeit with higher computational cost. Overall, the feasibility of LSTM networks for ME systems is confirmed, providing adequate accuracy and generalization for the planning and management of microgrids or local electricity markets.

**Keywords:** Micro Wind Turbine, Prediction, LSTM.

## EFICIENCIA EN CALEFACCIÓN: IMPACTO EN LA SEGURIDAD DE ABASTECIMIENTO Y LA EXPORTACIÓN DE GAS

Leila Iannelli<sup>1,2</sup>, Roberto Prieto, Salvador Gil<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Escuela de Ciencia y Tecnología de la UNSAM-Buenos Aires, Argentina

<sup>2</sup> Gerencia de Distribución – ENARGAS- Buenos Aires, Argentina

E-mail: sgil@unsam.edu.ar

**RESUMEN:** El acondicionamiento térmico de edificios representa el principal consumo energético residencial en Argentina y es el mayor responsable de los picos de demanda de gas en invierno. Esta alta demanda estacional obliga a restringir el suministro a sectores productivos, como la industria, la generación eléctrica y el transporte, y hace necesaria la importación de Gas Natural Licuado a volátiles precios internacionales. Estos picos afectan la seguridad y estabilidad del sistema energético y reducen la capacidad exportadora del país. Este artículo analiza el rol estratégico de la eficiencia energética, tanto en la envolvente edilicia como en los sistemas de climatización, para garantizar un abastecimiento más sostenible y expandir la capacidad exportadora de gas. Se enfatiza el potencial del Uso Racional y Eficiente de la Energía y la modernización tecnológica de acondicionamiento térmico en el sector residencial como herramientas clave para mejorar la seguridad energética y la competitividad del país.

**Palabras clave:** consumo residencial, calefacción, bombas de calor.

### INTRODUCCIÓN

El gas natural ocupa un lugar central en la matriz energética argentina y representa una de las principales oportunidades de exportación para la próxima década. Sin embargo, la marcada estacionalidad en el consumo interno, particularmente en calefacción residencial durante el invierno, genera picos que superan la capacidad local de producción y transporte (Argentina.gob.ar, 2025); (Gil & Otros, 2019).

La denominada *demanda prioritaria*, conformada por residencias, centros educativos y de salud, organismos oficiales y ciertos consumos mínimos técnicos industriales, tiene prioridad en el suministro, lo que fuerza restricciones a consumidores interrumpibles: industrias, centrales eléctricas, usuarios de Gas Natural Comprimido (GNC) e incluso mercados de exportación (ENARGAS, 2025).

Esta dinámica conduce a la necesidad de importación de GNL en condiciones desfavorables y debilita la posición de Argentina como proveedor de gas natural confiable en la región.

La **calefacción residencial** constituye el principal determinante de la estacionalidad en el consumo de gas natural en Argentina. La metodología de este artículo se basó en el análisis del consumo residencial de gas por unidad de superficie cubierta (kWh/m<sup>2</sup>·año) en viviendas con distintos sistemas de calefacción: estufas y calderas a gas, sistemas centralizados como radiadores y losa radiante, calefactores eléctricos y bombas de calor. Para ello se ha realizado un abordaje mixto: un **enfoque top-down**, basado en series históricas de consumos globales regionales, con datos de agencias oficiales (ENARGAS, 2025) y distribuidoras y un **enfoque bottom-up**, sustentado en registros de distribuidoras y en unas **500 auditorías energéticas en hogares del Área Metropolitana de Buenos Aires (AMBA)**. Los detalles de este estudio se reportan en un artículo separado en otra publicación (Iannelli & Gil, 2025). El análisis comparativo de distintos sistemas de calefacción, desde estufas y calderas a gas hasta bombas de calor eléctricas, permite dimensionar con mayor precisión el potencial de ahorro energético y resaltar el rol estratégico de la eficiencia en la reducción de la demanda invernal (Zavalía Lagos & Otros, 2023).



En este contexto, aumentar la eficiencia energética en la climatización de edificios es un paso clave para mitigar los picos de consumo invernal, lo que a su vez permite liberar gas para otros usos en el mercado interno, fortalecer la seguridad de abastecimiento, reducir los costos operativos y consolidar una estrategia exportadora sostenible. El propósito central de este artículo es mostrar que invertir hoy en medidas probadas de eficiencia: aislación térmica, gestión inteligente de la demanda y equipos de alto rendimiento; constituye el camino más rápido, económico y ambientalmente responsable para resguardar la seguridad energética nacional y proyectar a la Argentina como un proveedor confiable en el mercado gasífero regional.

## CONSUMO DE GAS EN ARGENTINA Y ROL DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA

Durante los meses fríos, el consumo residencial de gas se multiplica por 4 o 5 respecto del período estival, como se observa en las Figura 1 y Figura 2. Estos picos obligan a restringir el suministro a grandes usuarios definidos por industria, centrales eléctricas, GNC, generan la necesidad de importar Gas Natural Licuado (GNL) a volátiles precios internacionales.

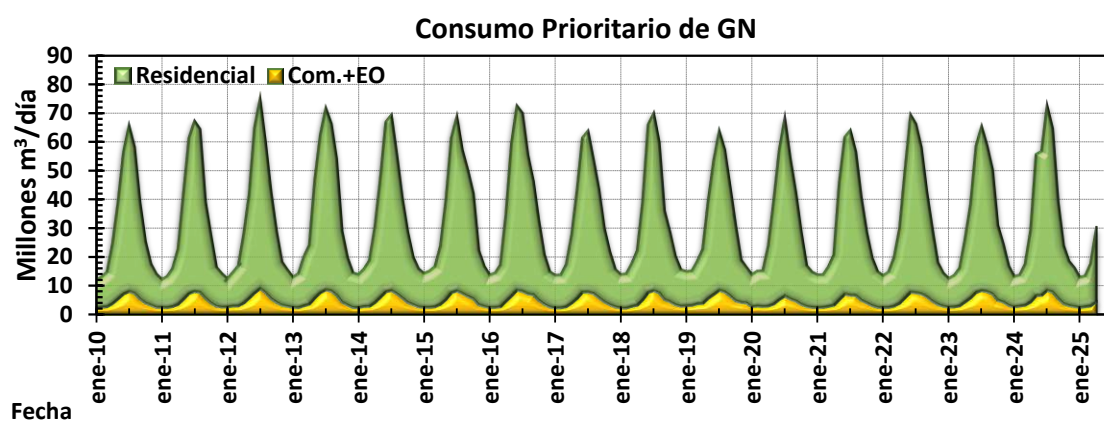


*Figura 1. Evolución histórica del consumo prioritario de gas, compuesto principalmente del consumo residencial, comercial y entes oficiales (Com. + EO). Aquí se ve la serie histórica mensual desde el año 2010 a mayo de 2025. Lo notable de esta figura son los picos de invierno, debidos principalmente a la calefacción, presentan saltos de consumos de un factor 4 a 5 respecto del estival. Elaboración propia con datos de ENARGAS (ENARGAS, 2025).*

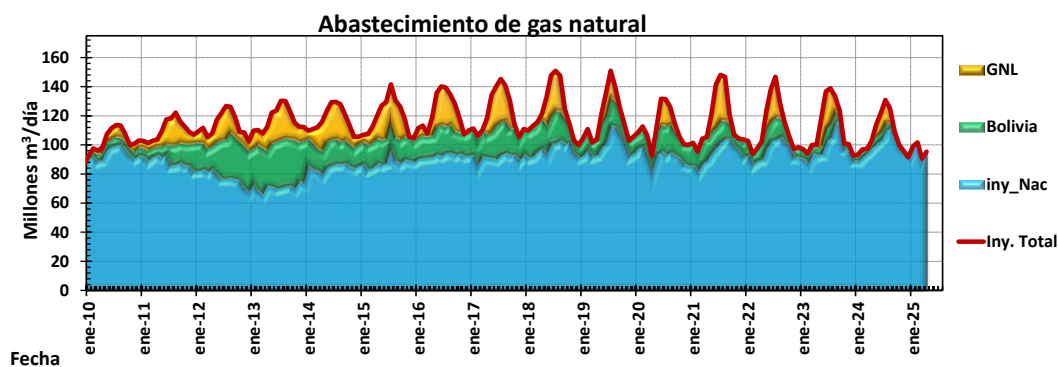


*Figura 2. Variación del suministro de gas natural según sus fuentes de abastecimiento. El incremento del consumo de gas en invierno, principalmente calefacción, determina la necesidad de importación de GNL, área amarilla y gas de Bolivia, área verde. El área celeste representa la producción nacional de gas. Elaboración propia con datos de ENARGAS (ENARGAS, 2025).*

Actualmente, más del 50% del gas producido en Argentina proviene de yacimientos no convencionales como Vaca Muerta. Su producción no siempre permite modulación estacional, lo que genera desafíos técnicos y económicos adicionales. A ello se suma la limitada capacidad de transporte, cuya expansión no se justifica económicamente frente a picos de breve duración, esto es, uno o dos meses al año.

En este contexto, **la eficiencia energética en calefacción producto de la mejora en las envolventes térmicas y modernización de los equipos de calefacción**, se posicionan como soluciones estratégicas y costo-efectivas:

- ✓ Diversos estudios muestran que mejoras en la envolvente edilicia pueden reducir el consumo de calefacción entre un 35% y un 60% (Filippín & Otros, 2013); (Mercado, Filippín, & Barea, 2019); (P. Azqueta, 2020).
- ✓ El reemplazo de sistemas tradicionales por **bombas de calor** puede reducir el consumo en factores de 3 a 7 (Zavalía Lagos & Otros, 2023); (International Energy Agency (IEA), 2023); (Iannelli & Gil, 2025).

Estas medidas, incluso si se aplican parcialmente, permitirían evitar importaciones, estabilizar el sistema, liberar gas para exportación, y mejorar la seguridad energética nacional.

La climatización es el principal uso energético en los hogares argentinos. La *Figura 3* ilustra los tipos de equipos de calefacción y sus insumos energéticos, revelando una fuerte dependencia del gas natural y de dispositivos eléctricos por resistencia (Indec, 2022).

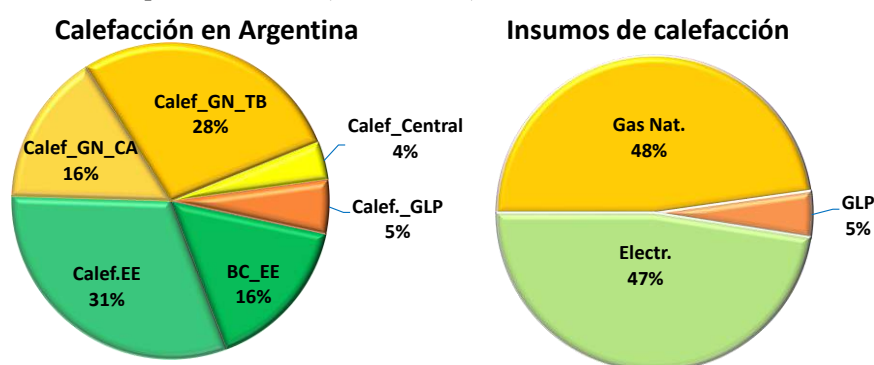


*Figura 3. Izquierda, distribución de los equipos de calefacción según su tipo. Derecha, distribución de los equipos de calefacción según el insumo energético que utilizan en Argentina. Relevamiento realizado por el INDEC en 2018 (Indec, 2022).*

En la Figura 3, Calef\_GN\_CA significa, calefactor a gas natural de cámara abierta, Calef\_GN\_TB significa, calefactor a gas natural de Tiro Balaceado, Calef\_Central representa viviendas con Calefacción Central. Por su parte Calef.EE representa, calefactor eléctrico a resistencia y BC\_EE, son las bombas de calor, acondicionadores de aire frío/calor. Calef.\_GLP son los calefactores que usan GLP como combustible (Indec, 2022).

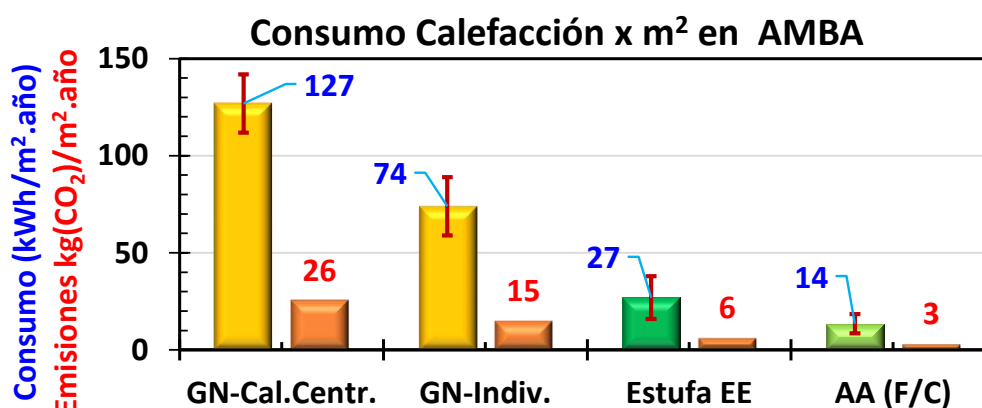
Diversas estimaciones y experiencias internacionales (International Energy Agency (IEA), 2023); (Kemmler & Thomas, 2020) y las locales (Zavalía Lagos & Otros, 2023) muestran que el ahorro energético suele ser más barato y sostenible que la expansión de la oferta. Por ello, el fomento de la eficiencia energética debe considerarse una política estructural para enfrentar los picos estacionales y mejorar la resiliencia del sistema gasífero argentino.

## IMPACTO SOCIOECONÓMICO Y AMBIENTAL DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA

El *Uso Racional y Eficiente de la Energía* (UREE) es una herramienta poderosa para garantizar un uso inclusivo, sostenible y racional de la energía.

Varios estudios de campo, realizados en la región del Área Metropolitana de Buenos Aires (AMBA) (Goytia & Otros, 2023); (Zavalía Lagos & Otros, 2022); (Zavalía Lagos & Otros, 2023) muestran que los consumos de calefacción usados en viviendas de esta zona, efectivamente revelan reducciones superiores a las esperadas, cuando se usan bombas de calor (BC) en este servicio, como lo muestra la *Figura 4*. Los consumos observados en una muestra de casi 500 hogares indican que **los consumos energéticos en calefacción, cuando se usan BC, son entre 5 y 7 veces inferiores a los registrados con**

*sistemas convencionales de gas*, y entre 3 y 2 veces inferiores a los que se registran con calefactores eléctricos a resistencia (Zavalía Lagos & Otros, 2023); (Goytia & Otros, 2023); (Iannelli & Gil, 2025).



#### Tipo de Vivienda

Figura 4. Variación del consumo energético asociado a la calefacción por m<sup>2</sup> y año, según la tecnología usada. En naranja se indican las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) asociadas a cada tecnología por m<sup>2</sup> y año. Se observa que las familias que usan Gas Natural (GN) por redes para la calefacción (GN-Indiv.), tienen un consumo por m<sup>2</sup> alrededor de 6 veces mayor que las que usan acondicionadores de aire frío/calor (AA F/C o BC). Además, sus emisiones en Argentina son casi 5 veces mayores (Iannelli & Gil, 2025).

Por su parte, un análisis independiente de los consumos residenciales eléctricos por usuario en la región de CABA, ver Figura 5 y Figura 6, muestran una *marcada dependencia con la temperatura*, que nos da idea del uso de la electricidad tanto en la calefacción como en la refrigeración. De hecho, en la Figura 5, donde se grafica el consumo por hogar o consumo específico eléctrico medio por mes, como función de la temperatura media mensual, muestra un mínimo en la zona de *temperaturas medias entre 20 °C y 23 °C*, incrementándose para temperaturas menores (calefacción) y mayores (refrigeración).

El UREE es una herramienta clave para lograr un uso más sostenible e inclusivo de los beneficios de la energía. De hecho, si se analiza el consumo específico de electricidad y gas en CABA y la región centro-norte de Argentina (norte del Río Colorado) en los últimos años, ver Figura 7, Figura 8 y Figura 9, se visualiza el efecto, que la mejora en eficiencia, ya logró en el consumo eléctrico y de gas en el país.

Las Figura 7, Figura 8 y Figura 9, muestran la evolución de los consumos específicos de *electricidad* y *gas natural* durante los últimos 14 años, en la región centro-norte del país y en CABA. Se observa una marcada reducción en ambos consumos a partir de 2017, probablemente asociada a un uso más racional y eficiente de la energía, impulsado por la actualización tarifaria ocurrida a partir de 2016 y la generalización del sistema de etiquetado de eficiencia energética en los artefactos de uso domésticos en Argentina. Es notable que, a pesar de la inflación ocurrida a partir de 2018, que redujo el costo real de las facturas, el consumo no volvió a los niveles previos a 2016, lo que sugiere la consolidación de hábitos más racionales y eficientes de la energía. Varios estudios resaltan esta notable reducción (Rodríguez, 2025); (ENARGAS, 2022).

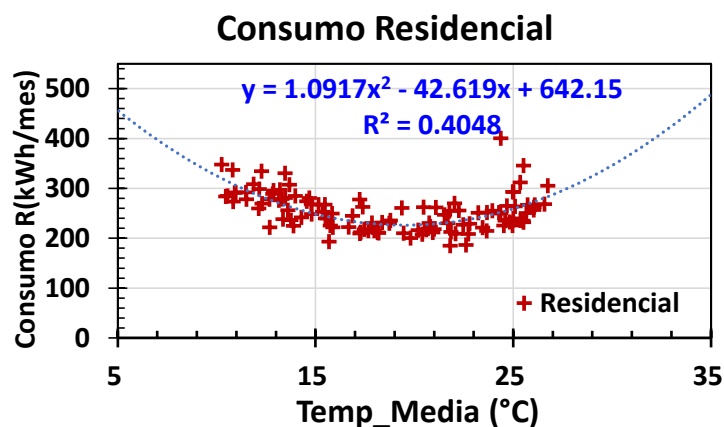


Figura 5. Consumo eléctrico medio mensual por usuario en función de la temperatura media, para CABA de 2016 a marzo de 2025 (INDEC, 2018).

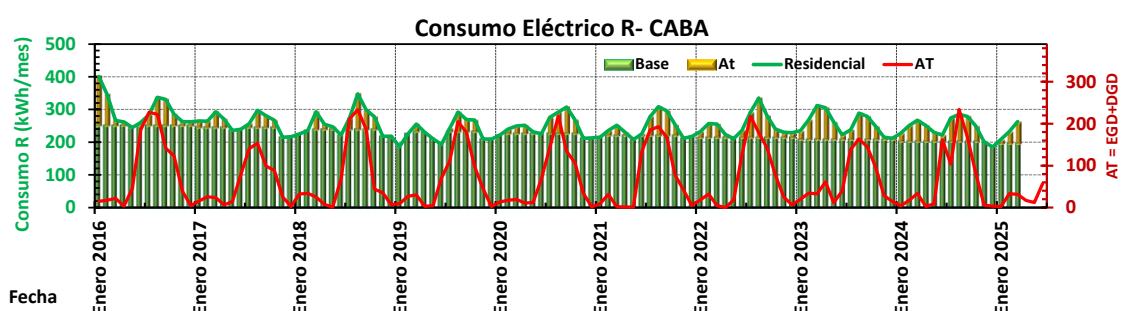


Figura 6. Consumo eléctrico mensual por usuario (línea verde) en función del tiempo desde enero de 2016 a marzo 2025 para CABA. La curva roja es la suma del Acondicionamiento Térmico = Exceso Grado Día + Déficit Grado Día (AT = EGD + DGD), que cuantifica el rigor de los inviernos y veranos. Las barras verdes indican el consumo base y las barras amarillas los consumos termodependiente, es decir los asociados al acondicionamiento térmico, que representan el 15% del consumo eléctrico total (INDEC, 2018).

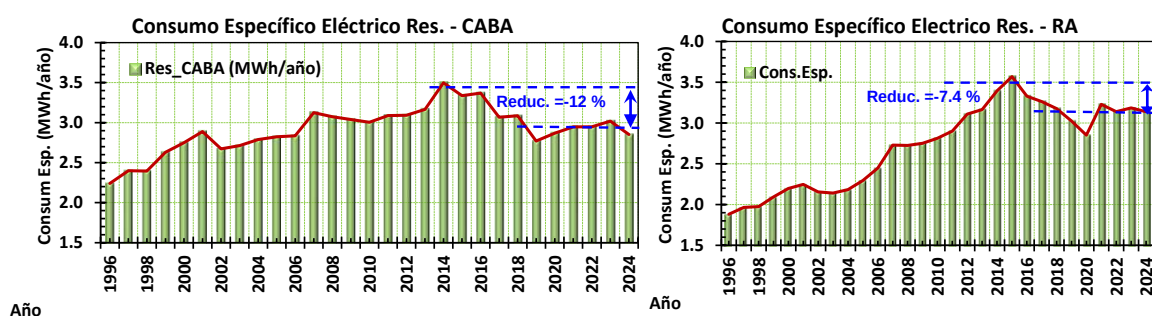


Figura 7. Consumo eléctrico promedio anual por usuario en MWh/año en función de los últimos 29 años. Izquierda para CABA y a la derecha para el promedio de la República Argentina (RA). En ambos casos se observa un incremento sostenido hasta el año 2015 y una reducción después del año 2016.

Estas tendencias subrayan la importancia de las medidas regulatorias en la reducción del consumo y refuerzan la necesidad de adoptar políticas que promuevan la eficiencia energética para mejorar las perspectivas de exportación de gas del país.

Más allá del ahorro energético, las mejoras en eficiencia generan:

- ✓ **Descompresión de la infraestructura**, evitando sobreinversiones.
- ✓ **Reducen la pobreza energética**, al bajar el costo de las facturas y mejorar el confort térmico.
- ✓ **Generan empleo local** en sectores como construcción, instalación y servicios energéticos.



- ✓ **Disminuyen las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI)**, alineando al país con compromisos internacionales.

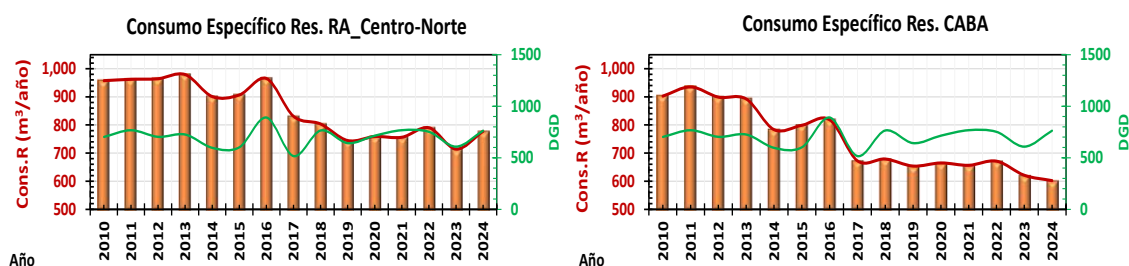


Figura 8. Evolución de los consumos específicos residencial de GN (izquierda) para las provincias de la región centro-norte y (derecha) CABA. Las curvas verdes, referidas al eje vertical derecho, representan el DGD que mide la intensidad de los inviernos en cada región. A partir de 2017, se observan reducciones importantes en ambos consumos (ENARGAS, 2025).

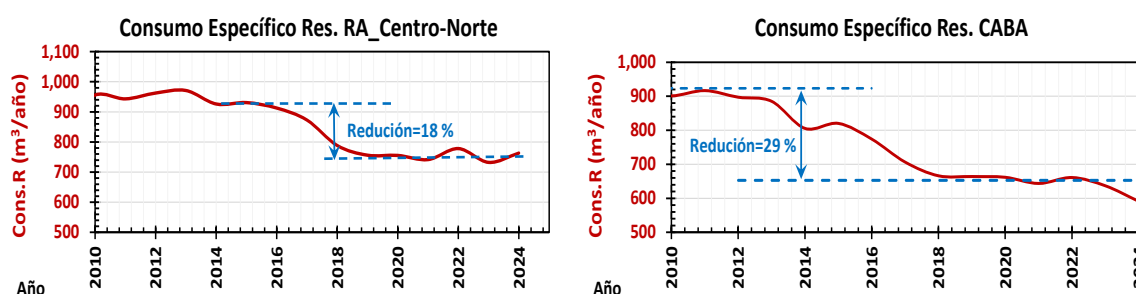


Figura 9. Evolución de los consumos específicos residencial de GN (izquierda) para las provincias de la región centro-norte y (derecha) CABA. Las curvas rojas, son los valores de los consumos específicos corregidos por variación de los DGD. Las reducciones en consumo a partir de 2017 se indican en la figura. Muy probablemente estas reducciones estarían asociadas a un uso más racional y eficiente de la energía, promovida por la actualización de tarifas acaecidas en 2016 y a la generalización del sistema de etiquetado de artefactos que para esa fecha ya cubría la mayor parte de los equipos domésticos (ENARGAS, 2025).

## EXPORTACIÓN SOSTENIBLE DE GAS: CONDICIÓN HABILITANTE

El desarrollo de Vaca Muerta habilita una gran oportunidad exportadora. No obstante, para sostener contratos de largo plazo y atraer inversiones, es necesario **reducir la demanda estacional interna**, especialmente la residencial y comercial (ENARGAS, 2025).

Medidas clave:

- ✓ **Mejoras en la aislación edilicia** para reducir la demanda térmica en invierno.
- ✓ **Recambio tecnológico:** reemplazo de sistemas convencionales por bombas de calor eficientes (etiqueta A o superior).
- ✓ **Regulación térmica inteligente:** uso de termostatos igual o inferior a 20 °C en invierno y 25 °C o superior en verano (Iannelli & Gil, 2022); (Zavalía Lagos & Otros, 2022).

Una mejora del 20% en el consumo residencial prioritario ya permitiría abastecer la demanda invernal con gas local (ver Figura 10) (ENARGAS, 2025). El ahorro obtenido puede asegurar el cumplimiento con exportaciones comprometidas, fortalecer la balanza energética y reducir la dependencia del GNL.

## CONCLUSIONES

En síntesis, el  **acondicionamiento térmico residencial y comercial**  constituye uno de los principales desafíos para la seguridad energética y la administración del sistema de gas en Argentina, ya que al concentrar los mayores picos de consumo en invierno compromete tanto el abastecimiento interno como

la capacidad exportadora. La evidencia muestra que la **eficiencia energética en la envolvente edilicia y en los sistemas de climatización** representa una oportunidad estratégica de rápida implementación y alto impacto.

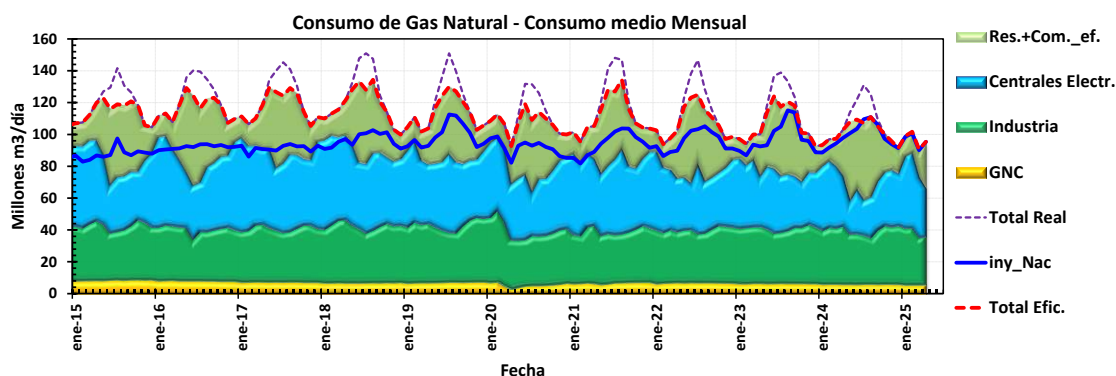


Figura 10. Evolución histórica del consumo prioritario de gas, suponiendo una reducción media del 20% en calefacción, para el consumo residencial, comercial y entes oficiales, los otros consumos de gas se suponen que son los reales observados. El consumo real total observado muestra con la línea de trazos violeta y el nuevo consumo efficientizado por la línea de trazos roja. En azul es el valor de la inyección nacional de gas. Elaboración con información obtenida a partir de datos del ENARGAS (ENARGAS, 2025).

El **Uso Racional y Eficiente de la Energía** se consolida como una política de **triple impacto**: mejora el abastecimiento, no compromete la capacidad exportadora de gas y promueve inclusión social al reducir los costos energéticos de los hogares. Tecnologías como las **bombas de calor eficientes**, capaces de consumir hasta siete veces menos energía que los sistemas tradicionales, combinadas con mejoras en la construcción edilicia y la integración de renovables, permiten atenuar los picos invernales y estivales, mejorar la confiabilidad del sistema y liberar volúmenes de gas para la industria y asegurar la exportación.

Uno de los **aportes de este trabajo** fue destacar, cómo las bombas de calor, pueden reducir notablemente el consumo en calefacción, y como la mayor eficiencia puede reducir notablemente los picos invernales de demanda de gas en Argentina. Esta diferencia pone en evidencia el enorme potencial de la modernización tecnológica, en especial el uso de bombas de calor, para reducir la demanda energética en el sector residencial.

Para que esta transformación ocurra, resulta indispensable avanzar en: Un *marco regulatorio integral*, con estándares de eficiencia, certificaciones, protocolos técnicos e incentivos económicos. *Implementación de planes piloto focalizados*, formación de instaladores y estrategias de comunicación adaptadas a distintos perfiles sociales. *Coordinación institucional* entre organismos como ENRE, ENARGAS y otras agencias, que garantice una convergencia normativa moderna.

En conclusión, apostar hoy por la eficiencia energética equivale a **fortalecer la seguridad energética nacional, reducir emisiones y costos**, y proyectar a Argentina como un **proveedor confiable y competitivo en los mercados regionales y globales de gas**.

Transformar esta oportunidad en política de Estado permitirá reducir vulnerabilidades estructurales, mejorar el confort de millones de argentinos y potenciar las exportaciones en forma sostenible.

## REFERENCIAS

Argentina.gob.ar. (2025). *Balances Energéticos*. (Secretaría de Energía de la Nación Argentina)  
Obtenido de  
<https://www.argentina.gob.ar/econom%C3%ADa/energ%C3%ADa/planeamiento-energetico/balances-energeticos>

- ENARGAS. (2022). *PANORAMA GASÍFERO*. B.A.: ENARGAS. Obtenido de [https://www.enargas.gob.ar/secciones/publicaciones/divulgacion-tecnica/pdf/informe\\_1465.pdf](https://www.enargas.gob.ar/secciones/publicaciones/divulgacion-tecnica/pdf/informe_1465.pdf)
- ENARGAS. (2025). *Ente Nacional Regulador del Gas - Argentina*. (Ente Nacional Regulador del Gas en Argentina) Obtenido de Ente Nacional Regulador del Gas: <https://www.enargas.gob.ar/>
- Filippín, C., & Otros. (2013). Evaluation of heating energy consumption patterns in the residential building sector using stepwise selection and multivariate analysis. *Energy and Buildings*, 66, 571-581. doi:10.1016/J.ENBUILD.2013.07.054
- Gil, S., & Otros. (2019). *Futuro del Gas Natural en Argentina en el Marco del Nuevo Paradigma Energético Nacional e Internacional*. Área de Pensamiento Estratégico de la Cámara Argentina de la Construcción, APE, Buenos Aires. Obtenido de <https://biblioteca.camarco.org.ar/libro/futuro-del-gas-natural-en-arg-en-el-marco-del-nuevo-paradigma-energ-nac-e-int/>
- Goytia, C., & Otros. (2023). *Proyecto de Fortalecimiento del Observatorio de Vivienda de la CABA*. Bs.As.: Universidad Torcuato Di Tella. Obtenido de <https://vivienda.buenosaires.gob.ar/informe-final>
- Iannelli, L., & Gil, S. (2022). Eficiencia en climatización I, Sugerencias para optimizar su consumo - Medidas de bajo costo para el invierno. *Petrotecnia*, LXII(2), 52-59.
- Iannelli, L., & Gil, S. (2025). Eficiencia en la calefacción: edificios con sistemas centralizados. (IAPG, Ed.) *Petrotecnia*, LXV(2), 30-37.
- INDEC. (2018). *Encuesta Nacional de Gastos de los Hogares 2017-2018 : uso hogareño de la energía*. Instituto Nacional de Estadística y Censos . CABA: INDEC. Obtenido de <https://www.indec.gob.ar/indec/web/Nivel3-Tema-4-45>
- Indec. (2022). *Encuesta Nacional de Gastos de los Hogares 2017-2018- Energía*. Obtenido de [https://www.indec.gob.ar/ftp/cuadros/sociedad/engho\\_2017\\_2018\\_uso\\_energia.pdf](https://www.indec.gob.ar/ftp/cuadros/sociedad/engho_2017_2018_uso_energia.pdf)
- International Energy Agency (IEA). (2023). *Heat Pumps*. Obtenido de <https://www.iea.org/energy-system/buildings/heat-pumps#overview>
- Kemmler, T., & Thomas, B. (2020). Design of Heat-Pump Systems for Single- and Multi-Family Houses using a Heuristic Scheduling for the Optimization of PV Self-Consumption. *Energies*, 13, 1118. doi:10.3390/en13051118
- Mercado, M., Filippín, C., & Barea, G. (2019). Influencia de la Aislación Térmica de la Envolvente en el Consumo Energético de Viviendas en la Estación de Verano. 6° Congreso Sudamericano de Simulación de Edificios, 17-18 Octubre 2019. Mendoza (Argentina): IBPSA Argentina. Obtenido de <https://ibpsa.com.ar/>
- P. Azqueta. (2020). *se ahorra energía si una vivienda se aísla térmicamente? La importancia del aislamiento térmico de la envolvente*. Secr. de Energía de la Nación y CNEA. Obtenido de <https://www.argentina.gob.ar/noticias/se-ahorra-energia-si-una-vivienda-se-aisla-termicamente>
- Rodríguez, L. (28 de Junio de 2025). Baja el uso de la electricidad en la Argentina: -10,41% interanual en mayo. *El Litoral*. Obtenido de [https://www.ellitoral.com/politica/baja-uso-electricidad-argentina-epe-santa-fe-distribuidora-energia-generacion-consumo\\_0\\_hABQavqE81.html](https://www.ellitoral.com/politica/baja-uso-electricidad-argentina-epe-santa-fe-distribuidora-energia-generacion-consumo_0_hABQavqE81.html)
- Zavalía Lagos, R., & Otros. (2022). Anatomía del Consumo Residencial Argentino -Uso Racional y Eficiente del Acondicionamiento Térmico. En N. Coppari , & Otros, *Futuros Energía - Fundación UNSAM*. San Martín - Buenos Aires: Fund. UNSAM y ASsoc. Argentina para el Progreso de las Ciencias. Obtenido de <https://aargentinapciencias.org/serie-futuros/>
- Zavalía Lagos, R., & Otros. (2023). Calefacción eficiente: ¿Bombas de calor o sistemas tradicionales de calefacción? *Petrotecnia*, LXII(4), 92-104.

## HEATING EFFICIENCY AND ITS ROLE IN ENERGY SECURITY AND GAS EXPORTS

**ABSTRACT:** Building thermal conditioning represents the main source of residential energy consumption in Argentina and is the leading driver of peak natural gas demand during winter. This seasonal surge compels restrictions on supply to productive sectors such as industry, power generation, and transportation, and necessitates imports of Liquefied Natural Gas at volatile international prices.

These peaks undermine the security and stability of the energy system and reduce the country's export capacity. This article examines the strategic role of energy efficiency—both in building envelopes and in thermal conditioning systems—in ensuring a more sustainable supply and expanding gas export potential. It highlights the importance of Rational and Efficient Use of Energy and the technological modernization of thermal conditioning in the residential sector as key tools to strengthen energy security and enhance the country's competitiveness.

**Keywords:** residential consumption; heating; UREE, heat Pumps.

## POTENCIAL DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA FOTOVOLTAICA EN LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES Y LA CIUDAD DE OLAVARRÍA: EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA

**Verónica Córdoba<sup>1</sup>, Gabriel Blanco<sup>2</sup>, María Daniela Keesler<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> INTELYMEC - – Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires (UNICEN). - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

<sup>2</sup>Centro de Tecnologías Ambientales y Energía (cTAE) – Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires (UNICEN).

Tel. 02284-670320 e-mail: dkeesler@fio.unicen.edu.ar

**RESUMEN:** Este trabajo evalúa el potencial técnico, económico y de reducción de emisiones de GEI de la implementación de generación distribuida fotovoltaica en dos escalas territoriales, la provincia de Buenos Aires - excluyendo CABA – y la ciudad de Olavarría. A partir del análisis de la demanda eléctrica (dividida en los sectores residencial, comercial, industrial, público y de alumbrado público), la disponibilidad de superficie y la irradiación solar, se estimó la capacidad de cobertura de la demanda, considerando almacenamiento de la energía excedente, los costos de inversión, los beneficios económicos y las emisiones evitadas. Los resultados muestran que el potencial técnico permitiría cubrir la demanda eléctrica anual del sector residencial, comercial y público en ambas escalas. En Olavarría, la generación estimada supera la demanda total, alcanzando una cobertura del 139 %. Desde el punto de vista económico, en todos los sectores analizados, los beneficios acumulados en 20 años, considerando los ahorros por autoconsumo, superan los costos de inversión iniciales. En términos ambientales, la implementación de estos sistemas permitiría evitar más de 13 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> por año en la provincia. Se concluye que la generación distribuida fotovoltaica representa una alternativa viable, rentable y ambientalmente favorable para la transición energética a nivel local y regional.

**Palabras clave:** generación distribuida, energía solar fotovoltaica, transición energética, potencial técnico, emisiones evitadas.

### INTRODUCCIÓN

La humanidad atraviesa una crisis climática sin precedentes, impulsada por el aumento sostenido de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), en su mayor parte provenientes de la quema de combustibles fósiles (UNEP, 2023). A nivel mundial, más del 80% de la energía primaria proviene de fuentes no renovables como el petróleo, el gas natural y el carbón (IEA, 2023). Este modelo energético centralizado, intensivo en carbono, es responsable de aproximadamente tres cuartas partes de las emisiones globales de GEI (IPCC, 2023). Según el informe más reciente del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2023) desde la era preindustrial, la temperatura media global ha aumentado aproximadamente 1,2°C, con consecuencias severas sobre los sistemas ecológicos y humanos. En consecuencia, el sistema energético actual se encuentra en el centro del debate sobre sostenibilidad, resiliencia y justicia climática.

Argentina no es ajena a esta problemática. El país presenta una alta dependencia de los hidrocarburos: en 2022, el 86% de la energía primaria provino de fuentes fósiles (Secretaría de Energía, 2024). El sector energético es responsable de cerca del 50% de las emisiones totales de GEI, concentradas en la generación eléctrica, el transporte y la industria (SSAmb, 2024). Esta situación representa un doble



Esta obra está bajo Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

desafío: avanzar hacia una matriz energética limpia, al tiempo que se garantiza el acceso universal y equitativo a la energía, promoviendo a la vez políticas de soberanía y desarrollo económico.

La demanda eléctrica a nivel nacional ha mostrado una evolución significativa en las últimas dos décadas. Si bien hasta 2015 se registró un incremento sostenido, a partir de entonces la demanda se ha estabilizado, con algunas caídas puntuales como las observadas durante la pandemia de COVID-19 de 2020. El sector residencial es el que más ha crecido, duplicando su demanda entre 2005 y 2024, y representando en la actualidad el 47% del consumo total de energía eléctrica. Le siguen el sector comercial (27%) e industrial/grandes demandas (26%) (CAMMESA, 2025).

En este contexto, la generación distribuida (GD) mediante fuentes renovables se presenta como una estrategia clave. La GD permite diversificar la matriz, reducir las pérdidas por transmisión, fomentar la participación ciudadana en la transición energética y descentralizar la producción. En Argentina, la Ley 27.424 establece el Régimen de Fomento a la Generación Distribuida de energía eléctrica a partir de fuentes renovables conectadas a la red de distribución. Si bien dicha normativa marcó un avance significativo, su implementación plena enfrenta diversos obstáculos: falta de incentivos adecuados, demoras en la reglamentación provincial, barreras tecnológicas y financieras, y escasa difusión.

Hacia fines de 2024, el régimen nacional de generación distribuida mediante energía solar fotovoltaica, contaba con 2.290 usuarios-generadores inscriptos y una capacidad instalada de casi 59 MW, equivalente al consumo anual de más de 28.000 hogares. Donde, el 80% de la potencia total instalada se distribuye entre cinco jurisdicciones, Córdoba, Buenos Aires, CABA, San Juan y Entre Ríos (Ministerio de Economía, 2024), siendo la provincia de Córdoba la que concentra el 36% de la capacidad, seguida por Buenos Aires con 630 usuarios y 12.474 kW instalados, lo que representa el 21% de la capacidad instalada. A pesar de esta situación, la provincia de Buenos Aires presenta un importante potencial no aprovechado debido a demoras regulatorias y la ausencia de incentivos específicos para usuarios residenciales y pymes. Diversos estudios y experiencias en el país han demostrado la factibilidad y los beneficios de la energía solar fotovoltaica en distintos contextos: la instalación de sistemas piloto conectados a red en entornos urbanos (Durán et al., 2018), la incorporación de generadores en establecimientos educativos que mostraron no afectar la calidad del servicio eléctrico (Agüero et al., 2016), el análisis de plantas de gran escala para mejorar la tensión en redes provinciales (Bruna y Cadena, 2015), y los sistemas autónomos implementados en zonas rurales (Bello et al., 2010). Estos antecedentes, junto con el marco actual de la Ley 27.424, refuerzan el papel de la generación distribuida fotovoltaica como herramienta estratégica para descentralizar la producción y ampliar el acceso a energías limpias.

En este trabajo se propone analizar el potencial de la generación distribuida solar fotovoltaica (FV) en la provincia de Buenos Aires, excluyendo CABA y, en particular, en la ciudad de Olavarría. A partir de un enfoque integral, se busca estimar la cobertura posible de la demanda, los costos de inversión, los ahorros esperados y las emisiones evitadas, con el fin de aportar evidencia técnica que contribuya a orientar políticas públicas locales y regionales para la transición energética sostenible.

## **METODOLOGÍA**

Se desarrolló una metodología integral para estimar el potencial técnico, económico y de reducción de emisiones de la generación distribuida solar FV, aplicada en dos escalas territoriales, la provincia de Buenos Aires (excluyendo CABA) y la ciudad de Olavarría. La propuesta combina el análisis de demanda energética anual por sector, la estimación del recurso solar disponible, el cálculo de superficies técnicamente utilizables, y el dimensionamiento de sistemas solares FV incluyendo sistemas de almacenamiento de energía. Además, se incluyen estimaciones de inversión y ahorros en términos económicos, así como la reducción de GEI por el reemplazo de generación fósil. De esta manera, se logra brindar una visión multidimensional del impacto potencial de la generación distribuida.

### ***Estimación de la demanda eléctrica***

Los datos de demanda energética anualizados se tomaron de los informes anuales del Mercado Eléctrico Mayorista (MEM) elaborados por CAMMESA (2023). Se utilizó la clasificación de usuarios según la

Resolución 323/2023 de la Secretaría de Energía, agrupando los consumos en cinco sectores: Residencial: hogares y viviendas particulares; Comercial: comercios minoristas, servicios y oficinas; Público: usuarios no residenciales  $\geq 300$  kW asociados a salud, educación y administración; Alumbrado público: consumo urbano asociado a iluminación vial; Industrial: industrias medianas y grandes, clasificadas con tarifa de usuario no residencial  $\geq 300$  kW. Esta clasificación se utilizó para ambas escalas geográficas - provincia y ciudad - y constituye la base para los cálculos posteriores de cobertura energética y dimensionamiento del sistema.

### ***Cálculo del potencial fotovoltaico***

Se definieron dos niveles de potencial:

\* Potencial teórico: irradiación solar sobre la totalidad del territorio geográfico, bajo condiciones ideales de cobertura total y conversión sin pérdidas, sin restricciones físicas, técnicas o legales.

\* Potencial técnico: representa la porción del potencial teórico que podría efectivamente aprovecharse, considerando la superficie realmente disponible para instalación de paneles fotovoltaicos, determinada por restricciones urbanas, usos del suelo y limitaciones físicas. El cálculo de la superficie utilizable y los supuestos por sector se describen a continuación.

### ***Estimación de superficie disponible***

La determinación de la superficie disponible ( $S_{disponible}$ ) para la instalación de paneles solares se realizó por sector de consumo, utilizando datos censales, relevamientos de parques industriales y encuestas comerciales según corresponda, además, se aplicaron factores de ocupación y disponibilidad adecuados a cada infraestructura. Para el sector residencial, se consideró que las instalaciones fotovoltaicas se realizarían sobre techos y azoteas, para ello se tuvieron en cuenta las diferentes tipologías de viviendas: casas, departamentos y ranchos/casillas. Se estimó la superficie promedio ponderada cubierta por tipología considerando el número de habitaciones de las viviendas (INDEC, 2022), y asignando una superficie ( $m^2/unidad$ ) obtenida mediante relevamiento de portales inmobiliarios. Posteriormente, se aplicó un factor de disponibilidad del  $50 \pm 10\%$  para contemplar obstrucciones físicas y restricciones técnicas como sombreado y orientación (NREL, 2013). Dado que en las grandes ciudades comercios y viviendas suelen compartir el mismo espacio urbano, el sector comercial se integró al residencial. En consecuencia, el área calculada para el sector residencial incluye también las instalaciones necesarias para abastecer el consumo comercial. En el sector Industrial/Grandes comercios, se estimaron superficies disponibles a partir del relevamiento de parques industriales (RENPI, 2023; Parques Industriales, 2025), aplicando factores de ocupación diferenciados según tipo de uso del suelo. En el sector público, ante la falta de datos específicos de superficie, se asumió que esta guarda una relación proporcional con la superficie residencial. Esta aproximación se fundamenta en que las dependencias municipales suelen ubicarse en áreas urbanas compartidas con zonas residenciales y en la correlación existente entre las demandas energéticas de ambos sectores, lo cual permite estimar la superficie del sector público a partir de dicha relación. Alumbrado público, no se asignó superficie adicional, ya que se prevé la instalación de paneles directamente sobre luminarias existentes. Esta estimación de superficies por sector constituye la base para el dimensionamiento técnico del sistema solar FV y el análisis de cobertura energética posterior.

### ***Irradiación efectiva sobre paneles fotovoltaicos***

La irradiación efectiva sobre paneles fotovoltaicos o en el plano inclinado ( $I_{PI}$ ), se calculó mediante factores correctivos aplicados a la irradiación en el plano horizontal ( $I_M$ ), este valor representa la energía solar promedio diaria sobre una superficie horizontal ( $kWh/m^2/día$ ), y fue obtenido a partir de mapas de radiación solar y datos meteorológicos históricos (Grossi et al., 2007). La Figura 1 muestra que, durante el invierno, los valores caen hasta  $1,55 kWh/m^2/día$ , en verano alcanzan máximos de  $6,90 kWh/m^2/día$ , con un promedio anual de  $I_M = 4,1 \pm 1,8 kWh/m^2/día$ . Si bien la irradiación varía según la latitud, estacionalidad y nubosidad, este valor es representativo a escala provincial ya que contempla dichas variaciones.



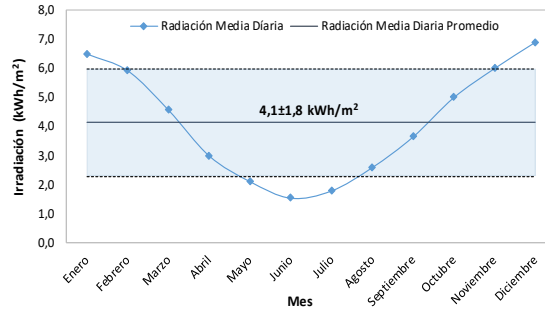


Figura 1: Irradiación media diaria.  $I_M = 4,1 \pm 1,8 \text{ kWh/m}^2$ .

Para estimar la irradiación en el plano inclinado ( $I_{PI}$ ), se aplicaron dos factores de corrección (Ecuación 1); el factor de inclinación ( $F_I$ ), obtenido de las tablas de la Guía del Recurso Solar (Secretaría de Gobierno de Energía, 2019) para la provincia de Buenos Aires, tomando como referencia la ciudad de La Plata (única localidad de la provincia incluida en la fuente utilizada), con orientación óptima al norte (azimut  $0^\circ$ ) y ángulo de inclinación igual a su latitud ( $34,55^\circ$ ), resultando  $F_I = 1,158$ ; y el factor de sombreado ( $F_S$ ), que representa pérdidas por obstrucciones físicas, adoptándose un valor promedio de  $F_S = 0,15$ .

$$I_{PI} = I_M * F_I * (1 - F_S) \quad (1)$$

Esto resultó en una irradiación útil promedio de  $4,07 \text{ kWh/m}^2/\text{día}$  para la provincia de Buenos Aires. Debido a su localización en el centro de la provincia de Buenos Aires, se consideró para Olavarría el mismo valor de irradiación promedio estimado para la provincia.

#### Dimensionamiento del sistema solar fotovoltaico

Se aplicaron dos enfoques para estimar la cantidad de paneles, según demanda energética y según superficie disponible:

\* Según demanda energética, se determinó el número de paneles necesarios ( $NP_{demanda}$ ) para cubrir el 100 % de la demanda anual de cada sector ( $DE_{Sector}$ ), considerando la irradiación en plano inclinado ( $I_{PI}$ ) y la potencia de los paneles ( $P_{panel}$ ) disponibles comercialmente. A partir de un relevamiento del mercado, se seleccionaron paneles de potencia promedio (440 W) para los sectores residencial, comercial y público; paneles de menor potencia (280 W) para alumbrado público, considerando las restricciones de espacio, y paneles de alta potencia (610 W) para la industria y grandes comercios, optimizando la generación con menor número de paneles.

$$NP_{demanda} = \frac{DE_{Sector}}{I_{PI} * P_{panel}} \quad (2)$$

Finalmente, a partir del  $NP_{demanda}$ , se calcula la superficie total necesaria ( $ST_{Necesaria}$ ) para la instalación de los paneles, teniendo en cuenta el área que ocupa un panel ( $A_{panel}$ ), y un factor de ocupación ( $F_{oc}$ ) que reflejar el área real necesaria para la instalación teniendo en cuenta la separación entre filas para evitar sombras (Tabla 1).

$$ST_{Necesaria} = NP_{demanda} * A_{panel} * F_{oc} \quad (3)$$

Tabla 1:  $A_{ocupada}$  y  $F_{oc}$  para los paneles solares promedio y de máxima potencia.

| Panel                 | $P_{panel}$ (W) | $A_{panel}$ (m <sup>2</sup> ) | Alt x Ancho (mxm) | $F_{oc}$                |
|-----------------------|-----------------|-------------------------------|-------------------|-------------------------|
| Pot <sub>mínima</sub> | 280             | 1,63                          | 1,64x0,99         | N/D (uso en luminarias) |

|                               |     |      |           |       |
|-------------------------------|-----|------|-----------|-------|
| <b>Pot<sub>promedio</sub></b> | 440 | 2,19 | 2,03x1,08 | 2,216 |
| <b>Pot<sub>máxima</sub></b>   | 610 | 3,11 | 2,38x1,30 | 2,229 |

\* Por superficie disponible: se calculó el número máximo de paneles instalables en base al área útil ( $S_{disponible}$ ) o realmente disponible para la instalación de los paneles, y el área efectiva ocupada por cada tipo de panel teniendo en cuenta el factor de ocupación (Tabla 1).

$$NP_{superficie} = \frac{S_{disponible}}{A_{panel} \cdot F_{oc}} \tag{4}$$

Ambos enfoques fueron contrastados para determinar la viabilidad técnica y espacial de cada alternativa.

El dimensionamiento de los sistemas de almacenamiento necesarios se centró en el balance energético global (energía generada vs. energía consumida), procurando generar mediante las instalaciones solares FV la totalidad de la energía demandada, almacenando el excedente diurno para su uso nocturno. No se abordaron aspectos relacionados con la potencia instantánea ni la cobertura de la demanda en tiempo real ya que se asume la disponibilidad de otras fuentes de energía que cubren dichos picos, evitando así el sobredimensionamiento de los sistemas de almacenamiento. Para ello se analizaron las curvas de carga típicas diarias de la demanda para cada mes del año y la disponibilidad diaria de radiación solar para cada mes (Figura 2).

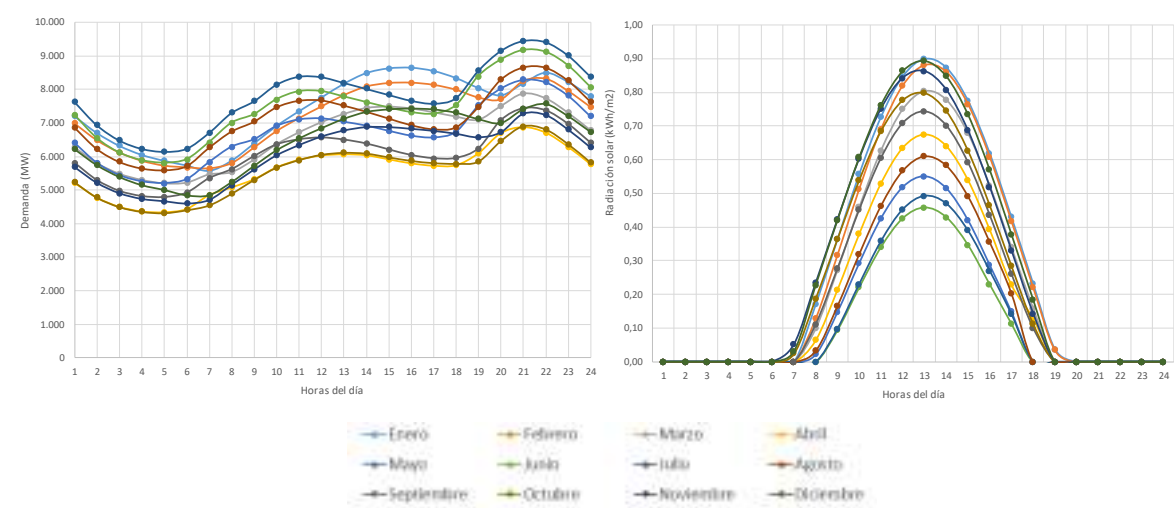


Figura 2: Curva de carga promedio mensual de la demanda en la provincia de Buenos Aires (panel izquierdo), y radiación solar horaria por mes para la provincia de Buenos Aires (panel derecho).  
Fuente: Elaboración propia en base a CAMMESA, 2025

### Análisis económico y reducción de emisiones de GEI

\* Costo de inversión: Se realizó un relevamiento de precios de paneles FV disponibles en el mercado local. A partir de dicho valor (1.250 US\$/kW) y aplicando la estructura de costos propuesta por IRENA (2022), 60% equipos principales (paneles, inversores), 31% componentes secundarios y 9% mano de obra, se estimó un costo total de inversión. Se asumió una vida útil de 20 años para los equipos. Para los sistemas de almacenamiento se asumió 273 US\$/kWh de energía almacenada de costo (IRENA, 2024).

\* Ahorro energético: Se estimó el ahorro acumulado en base al precio monómico promedio (70,702 USD/MWh) y la cotización del dólar de referencia (915 \$/USD). Este enfoque permite estimar el costo de la energía que se dejaría de pagar gracias a la generación fotovoltaica. Se prevé un período de ahorro proyectado cuyo lapso coincide con la vida útil del proyecto.

\*El costo evitado total: se calculó considerando la relación entre el costo de inversión y el ahorro asociado a la energía eléctrica que dejaría de comprarse a la red. El “costo evitado total” se estimó bajo

el supuesto de que la energía excedente no consumida en el momento de su generación puede ser aprovechada posteriormente, mediante almacenamiento. En consecuencia, no se contabiliza la energía que, en determinados momentos del año, deberá ser cubierta con aportes de la red eléctrica, por lo cual el valor obtenido constituye una aproximación simplificada al potencial económico del sistema.

\* Emisiones evitadas: Se utilizaron los factores de emisión de la red eléctrica argentina (0,2576 tCO<sub>2</sub>/MWh) según metodología oficial de la ONU (UNFCC, s.f). Las emisiones evitadas se estimaron:

$$Emisiones\ Evitadas(tCO_2) = Energía\ Generada\ por\ los\ paneles(MWh) * FE(tCO_2/MWh) \quad (5)$$

El análisis económico y de reducción de emisiones de GEI fue también realizado para la ciudad de Olavarría, siguiendo la misma metodología.

## RESULTADOS

### Caracterización territorial y demanda energética

La provincia de Buenos Aires cubre una superficie de aproximadamente 307.571 km<sup>2</sup> y alberga una población estimada de 17,5 millones de habitantes (INDEC, 2022), lo que equivale a una densidad poblacional promedio de 57 hab/km<sup>2</sup>. Esta densidad refleja una fuerte heterogeneidad territorial, que incluye desde áreas rurales con baja ocupación del suelo hasta regiones densamente urbanizadas del conurbano bonaerense. Esta variabilidad espacial condiciona tanto el perfil de la demanda energética como la disponibilidad de superficie para la instalación de sistemas solares. La demanda eléctrica provincial para el año 2023 se estimó en 53.298 GWh/año, distribuida por sectores (Tabla 2). El sector residencial concentra el mayor consumo (28.385 GWh/año), seguido por los sectores comercial e industrial. El alumbrado público representa una fracción menor de la demanda, pero su particularidad radica en que no requiere superficie adicional para la instalación de paneles, ya que estos pueden montarse sobre la propia infraestructura lumínica.

Tabla 2: Demanda energética, superficie y paneles necesarios por sector – Provincia de Buenos Aires

| Sectores                     | $DE_{Sector}$<br>GWh/año | $ST_{Necesaria}$<br>ha | $NP_{demanda}$<br>miles de paneles | Potencia<br>MW |
|------------------------------|--------------------------|------------------------|------------------------------------|----------------|
| Residencial                  | 28.385                   | 21.066                 | 43.387                             | 19.100         |
| Comercial                    | 12.108                   | 8.986                  | 18.507                             | 8.147          |
| Alumbrado público            | 1.112                    | -                      | 2.672                              | 748            |
| Industrial/Grandes comercios | 9.538                    | 7.285                  | 10.521                             | 6.418          |
| Sector público               | 2.155                    | 1.600                  | 3.294                              | 1.450          |
| <b>Total Demanda</b>         | <b>53.298</b>            | <b>38.936</b>          | <b>78.380</b>                      | <b>35.863</b>  |

Fuente: La demanda se estimó a partir de los datos del MEM (CAMMESA, 2023), aplicando la clasificación por sectores de la Resolución 323/2023.

Olavarría, ubicada en el centro-oeste de la provincia, posee una superficie de 7.715 km<sup>2</sup> y una población cercana a 114.000 habitantes, con una densidad promedio de 15 hab/km<sup>2</sup>. Su configuración territorial combina sectores urbanos, industriales y rurales extensos, ofreciendo condiciones favorables para el desarrollo de generación distribuida, especialmente por la mayor disponibilidad relativa de superficie en comparación con áreas más densamente pobladas. La demanda eléctrica se estimó en 322 ± 116 GWh/año, con predominancia de los sectores residencial e industrial. La Tabla 3 resume la demanda energética por sector, junto con la superficie y paneles necesarios para abastecer la demanda total.

Tabla 3: Demanda energética, superficie y paneles necesarios por sector – Ciudad de Olavarría

| Sectores    | $DE_{Sector}$<br>GWh/año | $ST_{Necesaria}$<br>ha | $NP_{demanda}$<br>miles de paneles | Potencia<br>MW |
|-------------|--------------------------|------------------------|------------------------------------|----------------|
| Residencial | 117±32                   | 87±27                  | 179±49                             | 79±22          |

|                              |                |               |                |               |
|------------------------------|----------------|---------------|----------------|---------------|
| Comercial                    | 65±21          | 48±15         | 99±32          | 44±14         |
| Alumbrado público            | 11±1           | -             | 25±3           | 7±1           |
| Industrial/grandes comercios | 119±61         | 91±47         | 132±67         | 80±41         |
| Sector público               | 11±1           | 8±1           | 16±2           | 7±1           |
| <b>Total</b>                 | <b>322±116</b> | <b>234±87</b> | <b>451±153</b> | <b>217±78</b> |

### Potencial teórico

La estimación del potencial teórico de generación fotovoltaica se basa en la disponibilidad del recurso solar sobre el total del territorio, bajo condiciones ideales de conversión y sin restricciones técnicas, legales ni de ocupación. Considerando la irradiación solar global horizontal promedio diaria  $I_M = 4,14$  kWh/m<sup>2</sup>/día y la superficie total de la provincia (307.571 km<sup>2</sup>), se estimó un potencial teórico de generación eléctrica de 460.771±205.304 TWh/año. Este valor constituye un límite superior, correspondiente a una cobertura completa con paneles de alta eficiencia en condiciones óptimas. Para dimensionar la magnitud de este potencial, basta señalar que cubrir la demanda eléctrica anual actual (53,3 TWh/año) requeriría solo el 0,012% de la superficie total de la provincia. Del mismo modo, para la ciudad de Olavarría, se asumió el mismo valor de irradiancia por encontrarse dentro del mismo régimen solar. Considerando una superficie total de 7.715 km<sup>2</sup>, se obtuvo un potencial teórico de 11.613±5.095 TWh/año. En este caso, cubrir su demanda eléctrica estimada (322 GWh/año) requeriría apenas el 0,0028% de dicho potencial. Estos resultados destacan la magnitud del recurso solar disponible en ambas escalas y refuerzan la factibilidad energética de su aprovechamiento mediante sistemas FV distribuidos.

### Potencial técnico y capacidad instalada estimada

El potencial técnico, también denominado potencial físico, representa la fracción del potencial teórico que podría efectivamente aprovecharse para la instalación de sistemas FV, considerando restricciones como usos del suelo, infraestructura disponible y factores de ocupación específicos para cada sector.

En la provincia de Buenos Aires, con base en los criterios definidos en la metodología, se estimó la superficie disponible y el número de paneles solares necesarios para cubrir la demanda por sector (Tabla 4). Cabe destacar que el sector comercial fue agrupado junto con el sector residencial en el análisis de potencial físico. Esto se debe a que la superficie disponible para comercios fue integrada en un solo bloque junto con el sector residencial, ya que ambos presentan tipologías edilicias similares y comparten condiciones de instalación comparables en la escala local.

Tabla 4: Potencial físico de generación según  $S_{disponible}$  y capacidad de almacenamiento necesaria — provincia de Buenos Aires

| Sector                                     | Subsector            | $S_{disponible}$<br>ha | $NP_{superficie}$<br>miles de paneles | Potencia<br>fotovoltaica<br>MW | Energía a<br>generar<br>GWh/año | Potencia de<br>almacenamiento<br>MW |
|--------------------------------------------|----------------------|------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|
| Residencial<br>y<br>Comercial <sup>1</sup> | Casas                | 29.852±7.099           | 61.481±14.621                         | 27.065±6.436                   | 40.224±9.565                    | 3.462±1.045                         |
|                                            | Departamentos        | 833±208                | 1.716±427                             | 755±188                        | 1.122±280                       | 97±29                               |
|                                            | Ranchos/<br>Casillas | 340±95                 | 700±195                               | 308±89                         | 458±127                         | 39±12                               |
|                                            | <b>SubTotal</b>      | <b>31.025±7.401</b>    | <b>63.897±15.243</b>                  | <b>28.129±6.710</b>            | <b>41.804±9.973</b>             | <b>3.598±1.087</b>                  |
| Alumbrado<br>Público                       | -                    | -                      | 2.672                                 | 748                            | 1.112                           | 96±29                               |
| Industrial/                                | Industrial           | 4.311±1.455            | 6.225±2.101                           | 3.798±1.281                    | 5.644±1.904                     | 486±147                             |

|                                |                   |                     |                      |                     |                      |                    |
|--------------------------------|-------------------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|--------------------|
| Grandes Comercios <sup>2</sup> | Grandes Comercios | 101±20              | 146±29               | 89±18               | 136±26               | 12±4               |
|                                | <b>SubTotal</b>   | <b>4.412±1.475</b>  | <b>6.371±2.130</b>   | <b>3.887±1.300</b>  | <b>5.776±1.931</b>   | <b>498±150</b>     |
| Sector Público                 | -                 | 1.651±394           | 3.401±811            | 1.497±357           | 2.225±531            | 1.925±58           |
| <b>Total General</b>           |                   | <b>37.088±9.270</b> | <b>76.342±18.184</b> | <b>34.261±8.367</b> | <b>50.917±12.434</b> | <b>4.384±1.324</b> |

<sup>1</sup>: Según INDEC (2022), la provincia de Buenos Aires cuenta con 6.492.014 viviendas, de las cuales el 79,6 % son casas (5.166.843, 114,6±4,1 m<sup>2</sup>/casa), el 17,0 % departamentos (1.105.561; 52,9±3,2 m<sup>2</sup>/dpto) y el 2,2 % ranchos o casillas (143.902; 46,5±3,8 m<sup>2</sup>/rancho).

<sup>2</sup>: Se identificaron 240 parques industriales con 2.074 empresas y superficie media de 82,96 ha por parque, estimando que el 21,7% de dicha superficie como técnicamente utilizable para la instalación de los paneles solares. En grandes comercios (supermercados, autoservicios, centros comerciales), se contabilizaron 2.022.178 m<sup>2</sup>, de los cuales se consideró que el 50 ±10 % se encuentra disponible para la instalación de los paneles

La Tabla 4 presenta una síntesis del potencial físico de generación solar FV en la provincia de Buenos Aires. El sector residencial destaca por su amplio aporte al potencial total, con más de 31.000 ha disponibles (equivalente al 0,10% del territorio provincial), lo que permitiría instalar alrededor de 64 millones de paneles y generar más de 41.800 GWh/año. Dentro de este sector, las viviendas tipo casa concentran el 96% de la superficie disponible, lo que resalta su rol estratégico en políticas de generación distribuida. En contraste, el sector industrial y los grandes comercios, si bien presentan menor superficie total (4.412 ha), ofrecen una densidad de generación superior, con un promedio de más de 1.200 paneles/ha. Esto refleja la mayor eficiencia en el uso del espacio, gracias a superficies más homogéneas y libres de obstáculos, lo que permitiría instalar los paneles de mayor potencia. Por su parte, el sector público aporta un potencial intermedio, con 1.651 ha disponibles y una generación estimada de 2.225 GWh/año. Esta contribución, aunque menor en términos absolutos, resulta relevante en términos estratégicos por su visibilidad institucional y potencial de replicabilidad.

En la ciudad de Olavarría, dada la baja densidad poblacional y la distribución urbana dispersa, la ciudad presenta una alta disponibilidad relativa de superficies para la GD, con una capacidad estimada de generación de 447±107 GWh/año. Esta cifra, basada en las superficies efectivamente disponibles para instalación, supera la demanda eléctrica local, lo que anticipa una favorable relación entre generación y consumo que se analiza en la siguiente sección.

*Tabla 5: Potencial físico, energía generada y cobertura — ciudad de Olavarría*

| Sector                                    | Subsector         | $S_{disponible}$  | $NP_{superficie}$ | Potencia fotovoltaica | Energía a Generar | Potencia de almacenamiento |
|-------------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|-------------------|----------------------------|
|                                           |                   | ha                | miles de paneles  | MW                    | GWh/año           | MW                         |
| Residencial y Comercial <sup>1</sup>      | Casas             | 393,4±9,8         | 407±91            | 179±40                | 266±60            | 21±3                       |
|                                           | Departamentos     | 11,7±0,8          | 12±3              | 5±1                   | 8±2               | 1±0,08                     |
|                                           | Ranchos/Casillas  | 1,2±0,1           | 1,3±0,4           | 0,6±0,2               | 0,8±0,2           | 0,1±0,01                   |
|                                           | <b>Sub-total</b>  | <b>406,2±10,7</b> | <b>421±95</b>     | <b>185±42</b>         | <b>275±62</b>     | <b>22±3</b>                |
| Alumbrado Público                         |                   | -                 | 25±3              | 7±1                   | 11±1              | 1±0,1                      |
| Industrial/Grandes Comercios <sup>2</sup> | Industrial        | 97±33             | 140±47            | 86±29                 | 127±43            | 10±1                       |
|                                           | Grandes Comercios | 2±0,3             | 2±0               | 1,4±0,3               | 2,1±0,4           | 0,2±0,02                   |
|                                           | <b>Sub-total</b>  | <b>99±33</b>      | <b>143±48</b>     | <b>87±29</b>          | <b>129±43</b>     | <b>10±1</b>                |
| Sector Público                            |                   | 24±1              | 49±1              | 21±1                  | 32±1              | 2±0,3                      |
| <b>Total</b>                              |                   | <b>529±44</b>     | <b>637±147</b>    | <b>307±72</b>         | <b>447±107</b>    | <b>35±4</b>                |

<sup>1</sup>: Según INDEC (2022), la ciudad cuenta con 34.091 casas (115,2±2,9 m<sup>2</sup>/casa), 8.703 departamentos (50,6±3,5 m<sup>2</sup>/dpto) y 263 ranchos/casillas (46,5±3,8 m<sup>2</sup>).

<sup>2</sup>: Olavarría cuenta con 2 parques industriales con una superficie de 449 ha, 54 empresas instaladas (0,1 ha/empresa) y 21,7% de la superficie total, disponible para la instalación de los paneles solares. Además, la ciudad cuenta con 3,1ha de área comercial.

### Relación entre demanda, capacidad instalada y cobertura

La comparación entre la energía generada potencialmente a partir de los sistemas solares FV y la demanda eléctrica anual por sector permite evaluar la capacidad de cobertura en cada caso (Figura 3). Este análisis integra los resultados del potencial técnico estimado con los requerimientos energéticos calculados para 2023. En la provincia de Buenos Aires, el sector residencial y comercial se destaca como el principal aportante de generación potencial, con 41.804 GWh/año, frente a una demanda conjunta de 40.493 GWh/año, lo que representa una cobertura del 103%. Este valor sugiere una capacidad cercana a la autosuficiencia energética, aunque condicionada por factores como eficiencia de paneles, orientación y sombreado. El alumbrado público y el sector público presentan también coberturas potenciales superiores al 100% (100% y 103%, respectivamente), en tanto que el sector industrial/grandes comercios alcanza una cobertura potencial del 61%, evidenciando limitaciones en superficie disponible para paneles solares, especialmente en industrias con techos complejos o estructuras preexistentes.

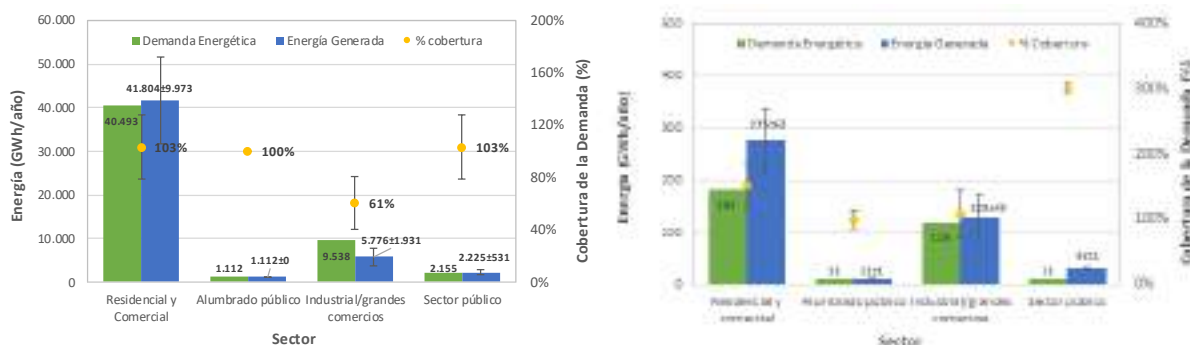


Figura 3: Comparación entre la demanda de energía eléctrica anual, la energía generada mediante sistema FV y cobertura de la demanda por sector en la provincia de Buenos Aires (izquierda) y Olavarría (derecha)

En la ciudad de Olavarría, la situación es aún más favorable. El potencial técnico estimado supera la demanda eléctrica total anual, con una cobertura promedio del 139%. El sector público destaca con una cobertura potencial superior al 300%, lo que refleja la baja demanda en relación con la superficie disponible para instalación. Los sectores residenciales/comercial e industrial/comercial también superan el 100% de cobertura potencial, lo que evidencia una alta viabilidad para la autosuficiencia energética local mediante generación distribuida. La presencia de barras de error en la generación estimada refleja la incertidumbre asociada a los factores de ocupación, eficiencia de instalación y calidad del recurso solar. Esta dispersión es más evidente en sectores con menor superficie utilizable o alta variabilidad en la infraestructura, como el sector industrial.

En términos de equipamiento, se estima que, en la provincia de Buenos Aires se necesitarían aproximadamente 78 millones de paneles para cubrir la demanda de todos los sectores, mientras que la superficie técnica disponible permitiría instalar hasta  $76 \pm 18$  millones, lo que indica un equilibrio ajustado. En Olavarría, en cambio, se requerirían cerca de 451 mil paneles, frente a una capacidad de instalación de  $637 \pm 147$  mil paneles, lo que confirma la holgura técnica disponible para implementar la generación distribuida en todos los sectores.

### Análisis de costos

Se estimaron los costos de inversión y los beneficios económicos asociados a la generación distribuida fotovoltaica, considerando un horizonte de análisis de 20 años, análisis que se desagregó por sector y por escala territorial. Cabe señalar que el análisis se realizó bajo un enfoque de costos constantes, sin

contemplar la variabilidad temporal del valor del dinero (por ejemplo, inflación, tasa de descuento o costo de capital), ni realizar proyecciones de precios de la energía. Tampoco se incluyeron de forma explícita los costos operativos y de mantenimiento. Por lo tanto, los resultados deben interpretarse como una estimación preliminar del beneficio bruto acumulado durante el ciclo de vida útil de los sistemas.

En la provincia de Buenos Aires (Tabla 6), el sector residencial y comercial representa la mayor inversión requerida, con un costo estimado de USD 50.389 ± 12.104 millones, asociado a la elevada cantidad de paneles necesarios. Sin embargo, este sector también ofrece el mayor beneficio económico, con un ahorro total proyectado de USD 64.622 ± 15.416 millones, lo que resulta en un saldo neto positivo de USD 14.233 millones a lo largo de la vida útil del sistema. En el resto de los sectores, el retorno económico también es positivo, aunque con menor margen: el sector industrial y grandes comercios presenta un saldo neto de USD 1.967 millones, el sector público de USD 758 millones, y el alumbrado público prácticamente compensa su inversión, con un resultado neto de USD 379 millones.

*Tabla 6: Costos de inversión y costos evitados*

| Sector                         | Costo de Inversión   | Costo Evitado Anual | Costo Evitado Total  |
|--------------------------------|----------------------|---------------------|----------------------|
|                                | millones USD         | millones USD/año    | millones USD*        |
| Residencial y Comercial        | 50.389±12.104        | 3.231±771           | 64.622±15.416        |
| Alumbrado público              | 1.340±0              | 86±0                | 1.719±0              |
| Industrial y Grandes Comercios | 6.962±2.344          | 446±149             | 8.929±2.985          |
| Sector Público                 | 2.682±644            | 172±41              | 3.440±821            |
| <b>Total</b>                   | <b>61.373±15.091</b> | <b>3.935±961</b>    | <b>78.709±19.221</b> |

En la ciudad de Olavarría (Tabla 7), si bien a menor escala, los resultados replican la tendencia observada a nivel provincial. El sector residencial y comercial concentra la mayor inversión (USD 313±58 millones) y también el mayor ahorro (USD 425±96 millones), con un resultado neto de USD 112 millones. El sector industrial y el sector público también presentan saldos positivos, mientras que el alumbrado público apenas compensa su inversión. En conjunto, la ciudad podría alcanzar un ahorro total de USD 691±166 millones, frente a una inversión de USD 509±101 millones, resultando en un beneficio neto de USD 182 millones.

*Tabla 7: Costos de inversión y costos evitados*

| Sector                         | Costo de Inversión | Costo Evitado Anual | Costo Evitado Total |
|--------------------------------|--------------------|---------------------|---------------------|
|                                | millones USD       | millones USD/año    | millones USD        |
| Residencial y Comercial        | 313±58             | 21±5                | 425±96              |
| Alumbrado público              | 12±1               | 1±0                 | 16±2                |
| Industrial y Grandes Comercios | 147±41             | 10±3                | 200±67              |
| Sector Público                 | 36±1               | 2±0                 | 49±1                |
| <b>Total</b>                   | <b>509±101</b>     | <b>35±8</b>         | <b>691±166</b>      |



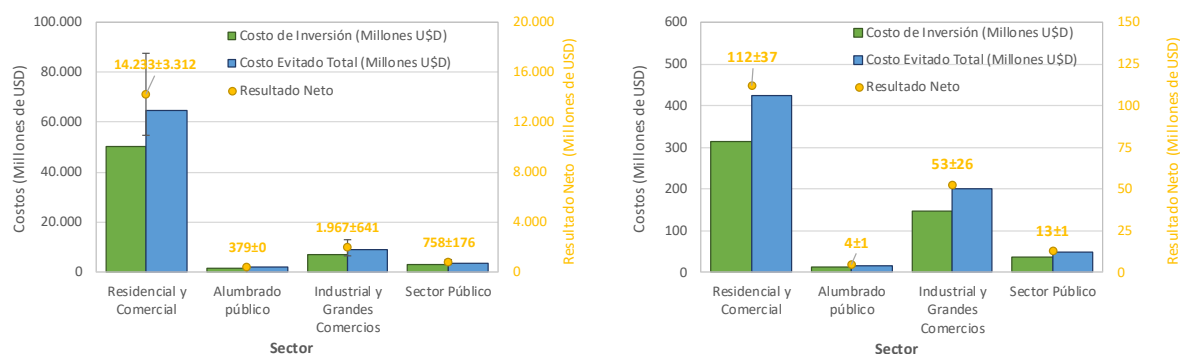


Figura 4: Comparación entre el costo de inversión inicial, el costo evitado total en 20 años y el resultado neto estimado por sector (puntos amarillos).

### Evaluación de emisiones de GEI evitadas

Como parte del análisis, se estimaron las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) evitadas por la implementación de sistemas solares FV distribuidos en cada sector. El cálculo se basó en el factor de emisión de la red eléctrica nacional ( $0,2576 \text{ tCO}_2\text{e/MWh}$ ), adoptado según la metodología de la ONU para sistemas eléctricos (UNFCC, s.f). Donde, el potencial de mitigación de emisiones está directamente relacionado con la cantidad de energía que se podría generar a partir de fuentes renovables. En la provincia, el sector residencial y comercial representa el mayor aporte en términos absolutos, con una reducción estimada de  $10.771 \pm 2.569 \text{ ktCO}_2\text{e/año}$ , seguido por el sector industrial y grandes comercios ( $1.488 \pm 497 \text{ ktCO}_2\text{e/año}$ ) y el sector público ( $573 \pm 137 \text{ ktCO}_2\text{e/año}$ ). El alumbrado público, por su menor escala de consumo, contribuiría con una reducción menor, cercana a  $286 \text{ ktCO}_2\text{e/año}$ .

En Olavarría, la estimación indica una reducción total de  $115 \text{ ktCO}_2\text{e/año}$ , lo que representa el 0,9% de las emisiones evitadas proyectadas para toda la provincia. En términos per cápita, Olavarría alcanza una reducción de  $0,92 \text{ tCO}_2\text{e/hab/año}$ , superior al promedio provincial de  $0,75 \text{ tCO}_2\text{e/hab/año}$ , lo que refleja su alto rendimiento relativo. El sector residencial y comercial lidera nuevamente en volumen de emisiones evitadas ( $71 \pm 16 \text{ ktCO}_2\text{e/año}$ ), seguido por el sector industrial y grandes comercios ( $33 \pm 11 \text{ ktCO}_2\text{e/año}$ ) y el sector público ( $8 \pm 0 \text{ ktCO}_2\text{e/año}$ ). El aporte del alumbrado público se estima en  $3 \text{ ktCO}_2\text{e/año}$ . Estos resultados consolidan el doble beneficio ambiental de la generación distribuida solar FV: no solo permite reducir la dependencia de fuentes fósiles, sino que también contribuye de forma significativa a la mitigación del cambio climático, particularmente en ciudades intermedias como Olavarría donde el rendimiento por habitante es incluso superior al promedio provincial.

## CONCLUSIONES

Este estudio evaluó el potencial técnico, económico y de reducción de emisiones de GEI de la generación distribuida solar FV en la provincia de Buenos Aires y en la ciudad de Olavarría. Los resultados muestran que el potencial teórico de generación supera ampliamente la demanda eléctrica actual en ambas escalas, mientras que el potencial técnico permitiría establecer que es posible cubrir la demanda total de los sectores residencial, comercial y público. En Olavarría, la cobertura potencial estimada supera el 130 %, confirmando su capacidad de autosuficiencia energética. En términos económicos, se estimaron inversiones totales del orden de USD 61.000 millones para la provincia y USD 509 millones para Olavarría, con beneficios netos acumulados que superan ampliamente los costos, especialmente en el sector residencial. Desde el punto de vista ambiental, la implementación de estos sistemas permitiría evitar hasta 13,1 millones de toneladas de  $\text{CO}_2$  anuales en la provincia, y 115.000 toneladas en Olavarría, con una reducción per cápita del 21 % superior en esta última. A partir de estos resultados, se concluye que la generación distribuida solar FV representa una alternativa técnicamente viable, ambientalmente deseable y económicamente rentable para avanzar hacia una matriz energética más sostenible. La disponibilidad de superficie técnica, especialmente en el sector residencial, y la existencia de un marco regulatorio habilitante, constituyen oportunidades concretas para escalar esta tecnología. El estudio aporta evidencia cuantitativa que puede ser utilizada para priorizar intervenciones, diseñar incentivos y formular políticas públicas orientadas a una transición energética justa, resiliente y descentralizada.

## FUENTES DE FINANCIAMIENTO

El presente trabajo fue realizado gracias a fondos propios de CTAE y con el apoyo de Fundación Ambiente y Recursos Naturales (FARN).

## AGRADECIMIENTOS

A FARN por el apoyo recibido y acompañamiento para realizar le presente informe.

## REFERENCIAS

- Agüero, J. L., Barbera, G., Issouribehere, F., Mayer, H. G., Díaz, J., & Castro, N. (2016). Experiencias en la incorporación de energía solar fotovoltaica en establecimientos de baja tensión. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 20, 04.103–04.112. ASADES.
- Bello, C., Busso, A., Vera, L., & Cadena, C. (2010). Factores que afectan el funcionamiento de instalaciones fotovoltaicas autónomas en regiones del noreste argentino. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 14, 04.93–04.99. ASADES.
- Bruna, A., & Cadena, C. (2015). Planta fotovoltaica como estrategia de mejora del nivel de tensión de red eléctrica en Santiago del Estero. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 19, 08.49–08.59. ASADES.
- CAMMESA (2025). Estadísticas anuales 2005-2024. <https://cammesaweb.cammesa.com/?wpdmdl=49650>
- CAMMESA (2023). Informes del Mercado Eléctrico Mayorista. En CAMMESA. Recuperado de <https://portal.cammesa.com/> el 4 de julio de 2025.
- Durán, J. C., Plá, J., & Bolzi, C. (2018). Energía solar fotovoltaica. Generación distribuida conectada a red. *Ciencia e Investigación*, 68(1), 51–64. Asociación Argentina para el Progreso de las Ciencias.
- Grossi, G., Soria, M. A., & Aguilera, A. (2007). Atlas Solar de la República Argentina. Secretaría de Energía. Recuperado de <http://atlas.energia.gob.ar> el 4 de julio de 2025.
- IEA (2023). World Energy Outlook 2023. International Energy Agency. Recuperado de <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023> el 4 de julio de 2025.
- INDEC (2022). Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2022. En Instituto Nacional de Estadística y Censos. Recuperado de <https://www.indec.gob.ar> el 4 de julio de 2025.
- IPCC (2023). Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>
- IRENA (2022). Renewable Power Generation Costs in 2021. International Renewable Energy Agency. Abu Dhabi. Recuperado de <https://www.irena.org> el 4 de julio de 2025.
- IRENA (2024). Renewable power generation costs in 2023, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. Recuperado de [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Sep/IRENA\\_Renewable\\_power\\_generation\\_costs\\_in\\_2023.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Sep/IRENA_Renewable_power_generation_costs_in_2023.pdf)
- Ministerio de Economía (2024). Generación distribuida en Argentina. Reporte Anual.2024. [https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/reporte\\_anual\\_2024.pdf](https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/reporte_anual_2024.pdf)
- NREL (2013). Estimating Rooftop Suitability for PV: A Review of Methods, Patents, and Validation Techniques J. Melius, R. Margolis, and S. <https://www.nrel.gov/docs/fy14osti/60593.pdf>
- Parques Industriales, 2025. <https://parquesindustriales.com.ar/>
- RENPI 2023: Parques Industriales inscriptos en el RENPI (base actualizada el 29/08/2023). <https://datos.produccion.gob.ar/dataset/registro-nacional-de-parques-industriales-renpi/archivo/13c5e3df-bf43-439a-bfa5-55fa2f0ed618>
- Secretaría de Gobierno de Energía (2019). Guía del recurso solar. [https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/guia\\_del\\_recurso\\_solar\\_anexos\\_final.pdf](https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/guia_del_recurso_solar_anexos_final.pdf)
- Secretaría de Energía (2024). Balance Energético Nacional 2022 (edición 2024). En Secretaría de Energía de la Nación. Recuperado de <https://www.argentina.gob.ar/econom%C3%ADa/energ%C3%ADa/planeamiento-energetico/balances-energeticos> el 4 de julio de 2025.

- Secretaría de Energía (2023). Resolución 323/2023. Boletín Oficial de la República Argentina. Recuperado de <https://www.boletinoficial.gob.ar> el 4 de julio de 2025.
- SSAmb, 2024. Informe Nacional de Inventario del Primer Informe Bienal de Transparencia a la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). Recuperado de [https://unfccc.int/sites/default/files/resource/INI%20del%20IBT1\\_2024.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/resource/INI%20del%20IBT1_2024.pdf)
- UNEP (2023). Emissions Gap Report 2023: Broken Record – Temperatures hit new highs, yet world fails to cut emissions (en línea). United Nations Environment Programme. Recuperado de <https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2023> el 4 de julio de 2025.
- UNFCCC (s.f.). Tool to calculate the emission factor for an electricity system (Version 7). United Nations Framework Convention on Climate Change. Recuperado de <https://cdm.unfccc.int> el 4 de julio de 2025

## **ASSESSING THE POTENTIAL OF PHOTOVOLTAIC DISTRIBUTED GENERATION IN BUENOS AIRES PROVINCE AND THE CITY OF OLAVARRÍA: A TECHNICAL, ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL PERSPECTIVE**

**ABSTRACT** This study assesses the technical, economic, and GHG emission reduction potential of distributed solar photovoltaic generation in Buenos Aires province (excluding CABA) and the city of Olavarría (Argentina). Based on an analysis of electricity demand (segmented into residential, commercial, industrial, public, and street lighting sectors), available rooftop and other surfaces, and solar irradiation, the study estimates demand coverage capacity, investment costs, economic savings, and avoided greenhouse gas emissions. Results show that the technical potential is sufficient to cover the annual electricity demand of the residential, commercial, and public sectors at both territorial scales. In Olavarría, the estimated potential solar PV generation exceeds total demand, reaching a 139% coverage rate. Economically, in all the sectors analysed, the accumulated benefits over 20 years, considering self-consumption savings, exceed the initial investment cost. Environmentally, the deployment of solar PV systems could prevent more than 13 million tonnes of CO<sub>2</sub> emissions per year across the province. The study concludes that distributed solar PV generation is a viable, cost-effective, and environmentally beneficial strategy to support the energy transition at both local and regional levels.

**Keywords:** distributed generation, photovoltaic solar energy, energy transition, technical potential, avoided emissions

## **APROXIMACIÓN A UN INDICADOR DE VULNERABILIDAD ENERGÉTICA EN BARRIOS POPULARES DE SALTA A PARTIR DEL CENSO ENERGÉTICO 2024**

**Juan P. Soria<sup>1</sup>, Facundo A. Pérez Machado<sup>2</sup>, Facundo D. F. Gonzalez<sup>3</sup>, Nilsa M. Sarmiento Barbieri<sup>4</sup>, Pablo A. Duran<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>Instituto de Ingeniería Civil y Medio Ambiente de Salta (ICMASa) Facultad de Ingeniería  
Universidad Nacional de Salta – Avenida Bolivia 5150. Salta, Argentina. CP 4400

<sup>2</sup>Facultad de Humanidades, Escuela de Cs de la comunicación, Universidad Nacional de Salta –  
Avenida Bolivia 5150. Salta, Argentina. CP 4400

<sup>3</sup>Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO), Universidad Nacional de Salta  
– Avenida Bolivia 5150. Salta, Argentina. CP 4400

<sup>4</sup>Instituto de Ingeniería Civil y Medio Ambiente de Salta (ICMASa) Facultad de Ingeniería  
Universidad Nacional de Salta – Avenida Bolivia 5150. Salta, Argentina. CP 4400

<sup>5</sup>Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO), Universidad Nacional de Salta  
– Avenida Bolivia 5150. Salta, Argentina. CP 4400

E-mail: [juan\\_pablo\\_soria@yahoo.com](mailto:juan_pablo_soria@yahoo.com)

**RESUMEN:** El presente trabajo propone un indicador compuesto de Vulnerabilidad Energética (VE) aplicado a sectores populares de la ciudad de Salta, a partir de los datos relevados por el Censo Energético 2024 (n=345 hogares). El objetivo es superar las limitaciones del indicador tradicional de Pobreza Energética (PE) basado en el umbral del 10% de gasto eléctrico sobre ingresos, incorporando dimensiones adicionales que reflejen condiciones socioeconómicas, infraestructura eléctrica y calidad del servicio. La metodología incluyó la construcción de tres dimensiones: Accesibilidad Económica (AE), Riesgo e Infraestructura (RI) y Calidad y Estabilidad del Servicio (CES), con variables ponderadas según relevancia y normalizadas entre 0 y 1. Los resultados muestran que el 41,7% de los hogares se encuentran en situación de VE, mientras que el 29,3% presentan PE. Esto indica que el nuevo indicador aproxima mejor la magnitud de la pobreza general en el territorio, permitiendo una comprensión más amplia de las desigualdades energéticas. Se discuten implicancias para el diseño de políticas públicas y programas focalizados en la reducción de la vulnerabilidad energética en contextos urbanos populares.

**Palabras clave:** vulnerabilidad energética, pobreza energética, barrios populares, Salta, indicadores compuestos.

### **INTRODUCCIÓN**

En 2021, cerca de 675 millones de personas en el mundo carecían de acceso a la electricidad (8,5% de la población global) y casi el 40% no contaba con combustibles limpios (ONU, 2023). Esta crisis energética, vinculada al agotamiento de los combustibles fósiles y al aumento sostenido de la demanda, ha puesto en la agenda el desarrollo de energías renovables, la eficiencia energética y estrategias contra la pobreza energética (González et al., 2023; Freda y De Dicco, 2004). El concepto de pobreza energética, introducido por Lewis (1982) y popularizado por Boardman (1991), define como tal a los hogares que destinan más del 10% de sus ingresos a energía. Si bien este indicador es ampliamente utilizado, en América Latina resulta insuficiente porque no contempla factores como el acceso efectivo y seguro a los servicios (García Ochoa, 2014).

En Argentina, la situación se agrava por las deficiencias estructurales del sistema, la falta de inversión y la ausencia de una política de largo plazo. En este contexto, el acceso a la electricidad no puede



pensarse solo como un servicio técnico, sino como parte esencial de las condiciones materiales de vida. Analizarlo en sectores populares urbanos permite visibilizar desigualdades persistentes y orientar políticas públicas más efectivas para reducir la vulnerabilidad energética.

Este trabajo se desarrolla a partir de los resultados del Censo Energético 2024 (González et al., 2025), realizado por el Grupo de Estudios Sociotécnicos de la Energía y Hábitat (GESEH) en tres sectores populares de la ciudad de Salta: Villa Floresta, Villa Lavalle y la Zona Sudeste (que incluye los barrios La Paz y Solidaridad) (Figura 1).

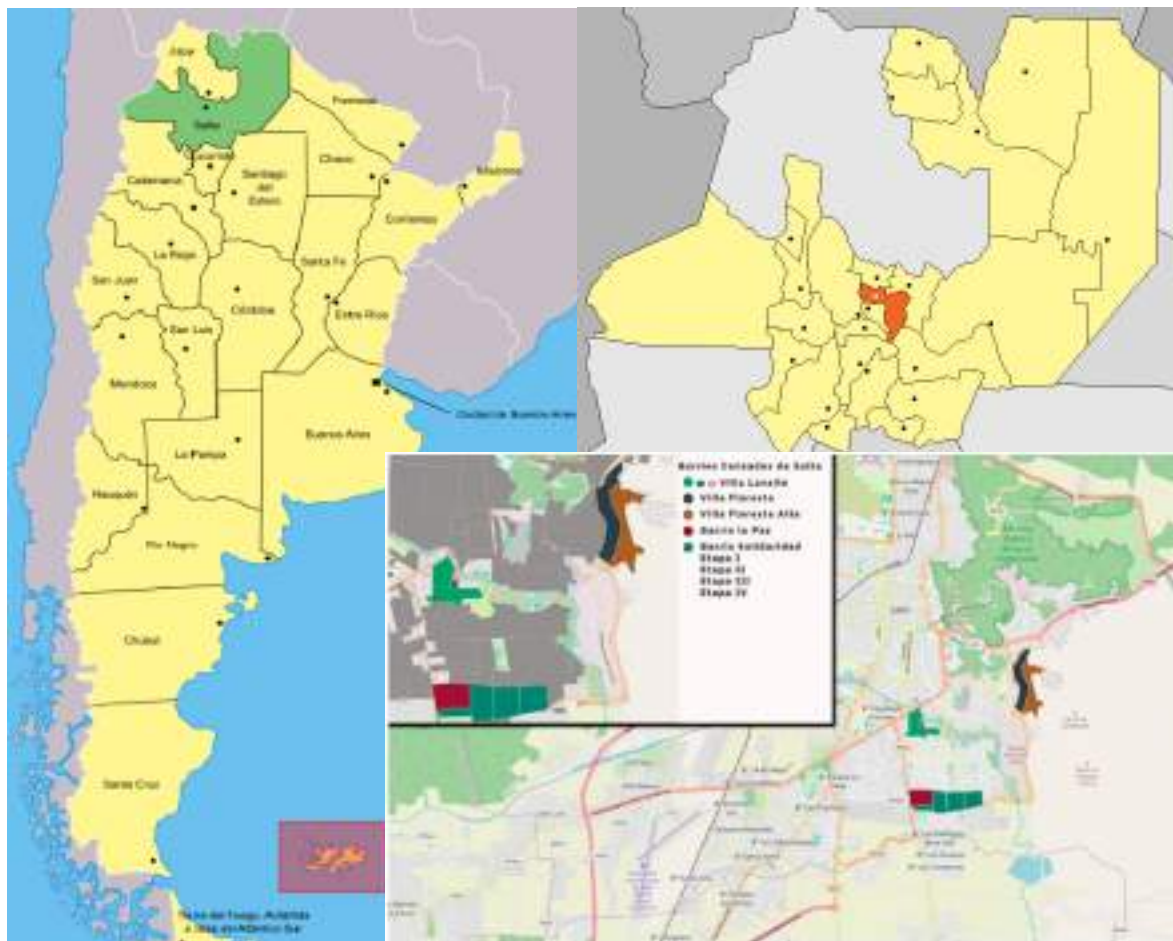


*Figura 1: Ubicación de barrios incluidos en la muestra. De derecha a izquierda: abajo croquis de la ciudad de Salta con los barrios populares relevados (Villa Floresta, Villa Lavalle, La Paz y Solidaridad), mapa de la provincia de Salta y mapa de Argentina.*

El relevamiento, tuvo por objetivo diagnosticar las condiciones de acceso, uso y percepción del servicio eléctrico, así como la infraestructura disponible y los riesgos asociados. Entre los hallazgos iniciales destaca que el 43% de la población encuestada en Villa Floresta declaró vivir en condiciones de riesgo eléctrico, mientras que en otros sectores se evidenciaron altos niveles de interrupciones del servicio y carencias en la calidad del suministro.

El objetivo de este artículo es proponer y aplicar un indicador compuesto de vulnerabilidad energética que supere las limitaciones del criterio del 10% de gasto eléctrico sobre ingresos. El indicador integra tres dimensiones: Accesibilidad Económica, Riesgo e Infraestructura y Calidad y Estabilidad del Servicio. Su aplicación busca estimar la magnitud real de la vulnerabilidad energética en los sectores analizados y compararla con el indicador tradicional de pobreza energética, para aportar una herramienta metodológica que permita comprender mejor las desigualdades energéticas en contextos urbanos populares.

## METODOLOGÍA

### ***Construcción del Censo Energético 2024***

El Censo Energético 2024 fue concebido como un relevamiento exhaustivo para caracterizar las condiciones de acceso, uso y percepción del servicio eléctrico en sectores populares urbanos. Para la definición de la muestra se utilizó el método de muestreo aleatorio simple, que garantiza la misma probabilidad de selección para todas las viviendas del universo relevado. El universo total estuvo constituido por 4.818 viviendas distribuidas en los barrios Solidaridad (2.165), Villa Lavalle (1.180), Villa Floresta (1.050) y La Paz (88), según datos del Registro Nacional de Barrios Populares (RENABAP) y la Infraestructura de Datos Espaciales de la Ciudad de Salta (IDEMSa) (2024).

Aplicando la fórmula para muestras finitas, se estimó un tamaño necesario de 356 encuestas con un nivel de confianza del 95% y un error muestral del 5%. Posteriormente, se ponderó proporcionalmente el peso de cada barrio en el total de viviendas, lo que determinó la asignación de casos en cada sector: 44,9% en Solidaridad, 24,4% en Lavalle, 28,7% en Floresta y 1,8% en La Paz. El operativo de campo permitió completar 345 encuestas válidas, número que mantiene los parámetros de representatividad estadística establecidos (Gonzalez et al, 2025).

Los barrios seleccionados —Villa Floresta, Villa Lavalle, Solidaridad y La Paz— forman parte del universo de “barrios populares” definidos por el RENABAP. Se caracterizan por la autoconstrucción de las viviendas, la tenencia irregular del suelo y la ausencia inicial de regularización dominial. El Censo Nacional 2022 permite identificar en ellos altos niveles de hacinamiento y déficit de servicios básicos, con viviendas precarias o no convencionales. La Encuesta Permanente de Hogares (EPH) aporta, además, indicadores socioeconómicos que evidencian bajos ingresos, inserción laboral informal y limitado acceso a redes formales de infraestructura. En conjunto, estas condiciones habitacionales y edilicias configuran un hábitat urbano vulnerable, donde el acceso a la energía se da de manera deficiente, insegura o intermitente, reproduciendo desigualdades estructurales en el territorio (Gonzalez et al, 2025).

Su diseño metodológico respondió a la necesidad de obtener información representativa y detallada sobre hogares situados en contextos de vulnerabilidad estructural, tanto en lo económico como en lo habitacional y energético. La estrategia de muestreo se focalizó en tres áreas previamente identificadas por su relevancia demográfica y energética: Villa Floresta (n=47), Villa Lavalle (n=62) y la Zona Sudeste (n=236), que incluye los barrios La Paz y Solidaridad (en sus tres etapas). Se realizó un barrido territorial puerta a puerta, asegurando cobertura del 100% de las viviendas habitadas en cada sector, lo que confiere al estudio un carácter censal para las zonas seleccionadas.

El cuestionario fue elaborado a partir de antecedentes nacionales e internacionales en estudios de pobreza energética, complementados con variables propias de la realidad local. Contó con 25 preguntas estructuradas y 89 subítems distribuidos en cuatro bloques: 1) composición y características sociodemográficas del hogar, 2) infraestructura y equipamiento eléctrico, 3) consumo y gasto en electricidad, y 4) percepción de calidad y continuidad del servicio. Su aplicación estuvo a cargo de encuestadores previamente capacitados, con protocolos estandarizados para minimizar sesgos de registro y garantizar la comparabilidad de la información. El trabajo de campo se desarrolló en diciembre de 2024, lo que permite analizar la situación en un contexto de alta demanda estacional y condiciones tarifarias específicas (González et al, 2025).

### ***Metodología del presente estudio***

Para este análisis se definió un marco conceptual que entiende la vulnerabilidad energética como fenómeno multidimensional, resultado de la intersección de factores económicos, técnicos y de calidad del servicio que condicionan el acceso seguro a la electricidad (Bouzarovski y Petrova, 2015). Se operacionalizaron tres dimensiones: Accesibilidad Económica (AE), Riesgo e Infraestructura (RI) y Calidad y Estabilidad del Servicio (CES), construidas a partir de variables del cuestionario del Censo Energético y normalizadas en una escala 0–1 para su integración en un indicador compuesto. La elección de estas dimensiones responde a la necesidad de superar el enfoque clásico de pobreza energética, limitado al gasto relativo, incorporando problemáticas territoriales centrales.



La AE se mide a través del porcentaje de ingreso destinado al servicio, la relación con la Canasta Básica Total y la suficiencia de ingresos declarados. La RI visibiliza la precariedad material y jurídica del acceso, integrando indicadores de seguridad eléctrica, medidores, conexiones compartidas y antecedentes de accidentes. La CES incorpora la experiencia cotidiana de los usuarios a partir de cortes, interrupciones, variaciones de tensión y percepción de calidad-precio. Se clasificó como vulnerable a un hogar con valores superiores a los umbrales en al menos dos dimensiones ( $AE \geq 0,6$ ;  $RI \geq 0,2$ ;  $CES \geq 0,5$ ). Estos cortes se definieron a partir de la distribución estadística de los datos y la revisión de literatura (Boardman, 1991; Bouzarovski & Petrova, 2015; García Ochoa, 2014). Así, el indicador propuesto dialoga con estándares internacionales, pero incorpora criterios situados que reflejan las condiciones específicas de los barrios populares de Salta.

## RESULTADOS

### *Características generales de la muestra*

El Censo Energético 2024 relevó 345 hogares en tres sectores populares de la ciudad de Salta: Villa Floresta (n=47), Villa Lavalle (n=62) y la Zona Sudeste (n=236). El cuestionario incluyó variables sociodemográficas, de infraestructura eléctrica y de percepción del servicio, permitiendo construir un diagnóstico integral de las condiciones energéticas en estos territorios.

### *Ingresos y gasto eléctrico*

Los ingresos declarados presentan una alta dispersión. El valor promedio ajustado (sin outliers > \$2.500.000) fue de \$525.171,60, con una mediana de \$450.000. El gasto en electricidad, medido como Porcentaje de Esfuerzo Energético (PCE), tuvo un valor medio del 13,84%, superando el umbral clásico del 10% en una parte significativa de la muestra (Figura 2).

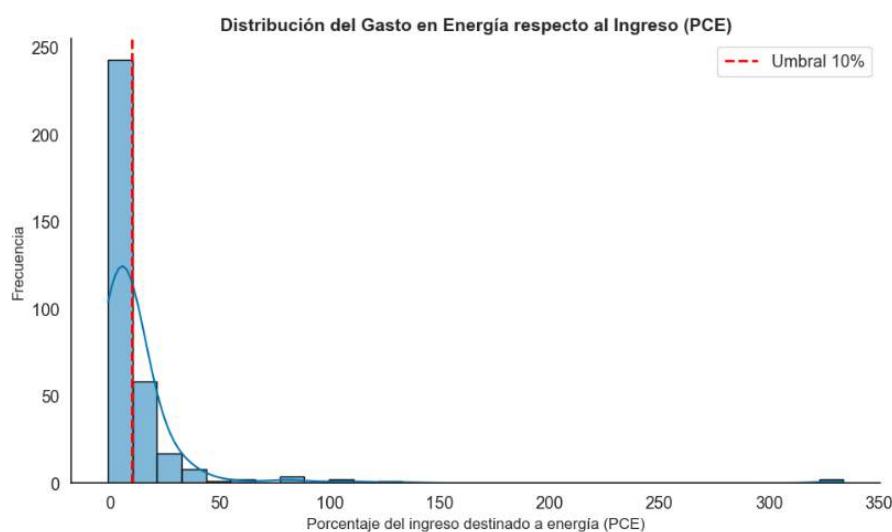


Figura 2: Distribución del PCE en la muestra total y por barrio. Fuente: elaboración propia

La Figura 2 muestra la concentración de hogares por tramos de esfuerzo energético, evidenciando un grupo que no destina gasto monetario a electricidad, asociado a conexiones irregulares o cortes prolongados.

### *Pobreza energética según el criterio del 10%*

Para estimar la pobreza energética con el criterio del 10%, se calculó la proporción entre el gasto en servicio eléctrico y el ingreso total del hogar. En función de ese indicador, cada hogar se clasificó en una de tres categorías:

- Pobre Energético (PE): si destina más del 10% de sus ingresos a consumo eléctrico,
- No Pobre Energético (NoPE): si destina el 10% o meno consumos eléctricos
- No sabe No contesta (NsNc): sin datos.



Luego, los hogares se agruparon por barrio, se contaron las observaciones de cada categoría y se calculó el porcentaje sobre el total de cada barrio. Con este procedimiento se obtuvo que, en el total de la muestra, el 29,3% de los hogares se encuentra en situación de pobreza energética, y los valores por barrio son: Aplicando el criterio clásico (>10% del ingreso destinado a electricidad), el 29,3% de los hogares se clasificó como pobre energético (Tabla 1). Por barrio:

- Villa Floresta: 22,2%
- Villa Lavalle: 35,5%
- Zona SudEste: 29,0%

*Tabla 1: Distribución de hogares según categoría de Pobreza Energética (PE)*

| Barrios  | PCE categoría | Porcentajes |
|----------|---------------|-------------|
| Floresta | NoPE          | 57,78       |
|          | PE            | 22,22       |
|          | NsNc          | 20,00       |
| Lavalle  | NoPE          | 54,84       |
|          | PE            | 35,48       |
|          | NsNc          | 9,68        |
| SudEste  | NoPE          | 55,84       |
|          | PE            | 29,00       |
|          | NsNc          | 15,15       |

### **Dimensión 1: Accesibilidad Económica (AE)**

La dimensión Accesibilidad Económica (AE) mide la capacidad de los hogares para sostener el acceso a electricidad sin comprometer otras necesidades básicas, considerando ingresos, composición familiar y costo del servicio. El índice se construye a partir de tres indicadores: Puntaje de Esfuerzo Energético (PEE, 0,4), que mide el porcentaje del ingreso destinado a electricidad y tiene un peso importante porque un gasto elevado compromete otros consumos esenciales; Ratio de la Canasta Básica Total (RCBT, 0,5), que compara el ingreso equivalente del hogar con la canasta básica total, ajustado por composición familiar, y recibe el mayor peso por reflejar directamente la vulnerabilidad económica; y Suficiencia Autopercebida (SAP, 0,1), que refleja la percepción binaria del hogar sobre si sus ingresos cubren necesidades básicas y recibe menor peso por ser subjetivo y complementario.

El índice se calcula como:

$$AE = 0,4 PEE + 0,5 RCBT + 0,1 SAP \quad (1)$$

Para su construcción se recopilaron datos de ingresos, composición familiar y consumo eléctrico. Se calcularon los tres indicadores y se combinaron aplicando los pesos definidos. Posteriormente, se evaluó la robustez del índice frente a la elección de pesos mediante un análisis de sensibilidad tipo Monte Carlo con 1000 escenarios generando combinaciones aleatorias de pesos que suman 1.

El análisis Monte Carlo confirma que, aunque el porcentaje exacto de hogares críticos varíe según los pesos, el promedio y la mediana del AE se mantienen estables, mostrando que la clasificación general de vulnerabilidad es consistente. La selección de los pesos (0,4 para PEE, 0,5 para RCBT y 0,1 para SAP) se basa en la importancia relativa de cada componente, priorizando la dimensión más determinante (RCBT), manteniendo un peso relevante en el esfuerzo económico directo (PEE) y complementando con la percepción subjetiva (SAP). Este enfoque permite que el AE capture tanto la situación objetiva como la percepción de suficiencia de ingresos, ofreciendo un indicador integral de vulnerabilidad económica (OECD-JRC, 2008; Becker et al., 2017).

Los resultados del AE muestran un promedio de 0,72 y una mediana de 0,71, indicando alta vulnerabilidad económica. Considerando un umbral crítico de  $AE > 0,5$ , aproximadamente el 79 % de los hogares se encuentra en situación crítica, mientras que un 25 % supera  $AE \geq 0,85$ , lo que evidencia hogares en situación especialmente vulnerable. Estos hallazgos destacan que la mayoría de los hogares enfrenta dificultades para cubrir sus necesidades básicas y que el gasto energético representa un factor relevante en la vulnerabilidad económica.

La AE integra tres indicadores: PEE, RCBT y SAP. Los resultados muestran un valor promedio de 0,72 y mediana de 0,71, lo que indica alta vulnerabilidad económica para sostener el acceso a la electricidad. Un 25% de la muestra supera el 0,85, situándose en situación crítica (Figura 3).

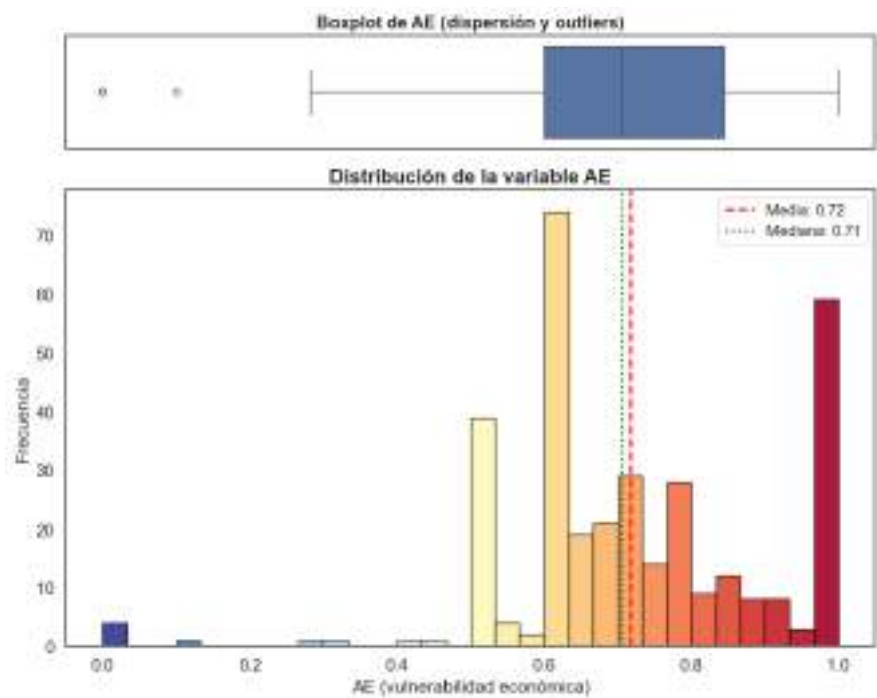


Figura 3: Distribución del puntaje AE por cuartiles. Fuente: elaboración propia

Se observa en la Figura 3 que la mayoría de los hogares presenta valores superiores a 0,6, umbral definido para clasificar alta vulnerabilidad económica.

### Puntaje de Esfuerzo Energético (PEE)

El Puntaje de Esfuerzo Energético (PEE) mide el peso relativo que tiene el gasto en electricidad dentro del presupuesto del hogar. Para calcularlo, primero se estimó el Porcentaje de Costo Eléctrico (PCE) como la relación entre el gasto eléctrico mensual declarado (o estimado) y el ingreso mensual equivalente del hogar, ajustado mediante la Unidad de Consumo Equivalente (UCE).

Cada valor de PCE se transformó a una escala de 0 a 1 por tramos (Tabla 2) aplicando una normalización lineal, de manera que los hogares con menor esfuerzo económico obtienen puntajes cercanos a 0 y aquellos con mayor esfuerzo valores cercanos a 1.

Tabla 2: Tramos de PCE y Puntaje de Esfuerzo Energético (PEE)

| Tramo de PCE | PEE resultante | Significado                     |
|--------------|----------------|---------------------------------|
| < 5%         | 0,0            | Sin presión económica relevante |
| 5% – 10%     | 0,0 → 0,5      | Esfuerzo moderado creciente     |
| 10% – 15%    | 0,5 → 1,0      | Esfuerzo alto                   |
| ≥ 15%        | 1,0            | Máxima presión económica        |

En los casos en que no se contó con datos de ingresos o gasto eléctrico, el PEE se imputó utilizando el promedio de hogares con características similares (mismo barrio, tamaño del hogar y cuartil de UCE). Si no existía un grupo comparable, se empleó el promedio del barrio y, en última instancia, el promedio global.

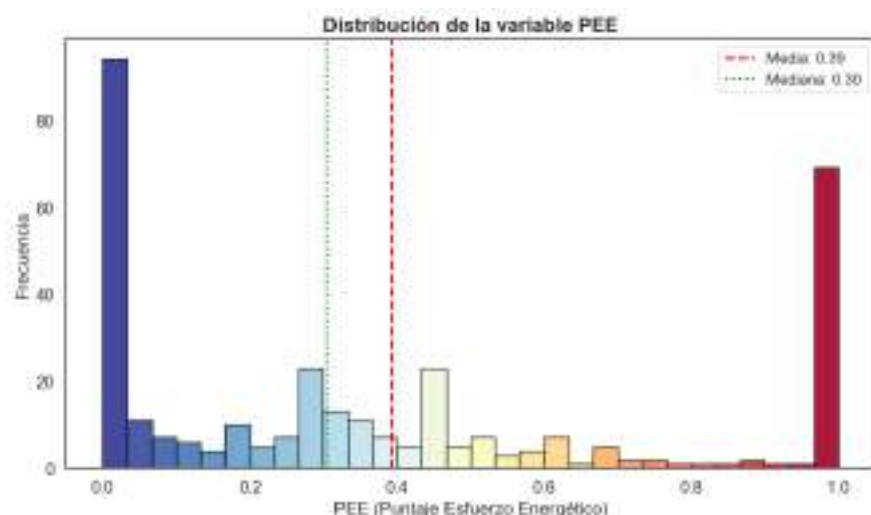


Figura 4: Distribución del PEE. Fuente elaboración propia

En la Figura 4 se observa que la mayoría de los hogares presenta valores inferiores a 0,2, situación vinculada a conexiones irregulares.

Con la base completa de PEE se calcularon estadísticos descriptivos: la media fue de 0,40 y la mediana de 0,30, mientras que el cuartil superior (Q3) alcanzó 0,7. Aproximadamente un 25% de los hogares no registró gasto monetario en electricidad, situación vinculada a conexiones irregulares o cortes prolongados, lo que constituye también una forma de vulnerabilidad energética. Estos resultados muestran que, si bien la mayoría de los hogares presenta un esfuerzo bajo (valores de PEE < 0,2), existe un grupo significativo con niveles altos de esfuerzo que comprometen su capacidad para cubrir otras necesidades básicas (Figura 4).

En los casos sin datos de ingresos o PCE, el PEE se estimó mediante el promedio de hogares con características similares (mismo barrio, tamaño de hogar y cuartil de Unidad de Consumo Equivalente, UCE), priorizando coherencia territorial y socioeconómica.

Sobre los hogares censados, la media del PEE fue 0,40 y la mediana 0,30, con un 25% de hogares sin gasto monetario en electricidad —situación vinculada a conexiones irregulares o cortes prolongados— que también refleja vulnerabilidad. El cuartil superior (Q3) alcanzó 0,7, indicando que una parte importante de la muestra presenta un esfuerzo energético elevado que compromete su capacidad de cubrir otras necesidades básicas.

#### Ingreso per cápita vs Canasta Básica Total (CBT)

Se calcula el Ratio de Canasta Básica Total (RCBT) como la relación entre el Ingreso Equivalente (IE) del hogar y el valor de la Canasta Básica Total (CBT) por Adulto Equivalente (AE). El AE se estima aplicando la aproximación de equivalencia del INDEC, considerando la edad de los miembros del hogar.

$$RCBT = \frac{IE}{CBT * AE} \quad (2)$$

El RCBT permite evaluar la vulnerabilidad económica de los hogares en función del ingreso que deberían percibir para cubrir la Canasta Básica Total, considerando la composición del hogar (Tabla 3).

Tabla 3: vulnerabilidad económica de los hogares en función del ingreso y la composición del hogar

| Ingreso ajustado | Puntaje   | Significado                                                                         |
|------------------|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| <= 100%          | 1         | Esta en condición de pobreza                                                        |
| < 100% y < 150%  | (1 , 1,5) | Esta en una condición intermedia que se obtiene mediante una escala lineal inversa. |
| >= 150%          | 0         | No está en condición de pobreza                                                     |

Para este análisis se utilizó el valor de CBT por Adulto Equivalente correspondiente a diciembre de 2024 (\$331.532) (INDEC, 2024).

### **Dimensión 2: Riesgo e Infraestructura (RI)**

La dimensión Riesgo e Infraestructura (RI) se construyó como un índice compuesto que integra cuatro componentes, cada uno normalizado en una escala de 0 a 1: RiesgoEléctrico (0,3), que recoge la presencia de condiciones críticas como instalaciones inseguras, sobrecargas o ausencia de puesta a tierra; TipoRiesgo (0,2), que mide la diversidad de problemas observados a través del número de tipos distintos de riesgo identificados (sobre un total de seis); AntecedRiesgo (0,2), que registra la existencia de fallas o accidentes eléctricos previos; y InfraEstruc (0,3), que refleja la precariedad en la infraestructura eléctrica, como la falta de medidor o cableado expuesto. El índice se define como:

$$RI = 0.3 \cdot RiesgoElec + 0.2 \cdot \frac{TipoRiesgo}{6} + 0.2 \cdot AntecedRiesgo + 0.3 \cdot InfraEstruc \quad (3)$$

Los pesos fueron asignados en función de la importancia relativa de cada dimensión: los factores directamente vinculados a la seguridad de la instalación (RiesgoEléctrico e Infraestructura) recibieron mayor ponderación (0,3 cada uno), mientras que la diversidad de riesgos y los antecedentes se incluyeron con peso intermedio (0,2 cada uno), siguiendo criterios metodológicos para construcción de índices compuestos (OECD-JRC, 2008).

Con la base procesada se calcularon estadísticos descriptivos: el puntaje promedio fue de 0,14 y la mediana de 0, lo que indica que la mitad de los hogares no presenta riesgos eléctricos evidentes. Sin embargo, existe un subconjunto con valores cercanos a 1, asociado a situaciones de precariedad extrema. La Tabla 4 resume la frecuencia de los distintos tipos de riesgo, destacándose las instalaciones inseguras (55 casos) y las instalaciones antiguas (36 casos) como los problemas más recurrentes.

El análisis de sensibilidad tipo Monte Carlo mostró que el índice RI es totalmente estable frente a cambios en la ponderación de los subcomponentes. El promedio (0,124), la mediana (0) y la proporción de hogares con  $RI > 0,2$  ( $\approx 30\%$ ) se mantuvieron invariantes en los 1000 escenarios. Esto confirma que la clasificación de hogares en situación de riesgo eléctrico depende fundamentalmente de la presencia efectiva de condiciones de precariedad y no de los pesos asignados.

*Tabla 4: Frecuencia de tipos de riesgo eléctrico identificados*

| Riesgos                            | Cantidad |
|------------------------------------|----------|
| Instalaciones Insegura             | 55       |
| Instalaciones Antigua              | 36       |
| Sobre Cargas                       | 25       |
| Cortocircuitos                     | 24       |
| Paredes y/o Objetos Electrificados | 10       |
| Sin Bajada a Tierra                | 9        |

### **Dimensión 3: Calidad y Estabilidad del Servicio (CES)**

La dimensión Calidad y Estabilidad del Servicio (CES) se construyó como un índice compuesto a partir de seis sub-indicadores normalizados: CE (frecuencia de interrupciones, 0–1), PC (percepción calidad-precio del servicio, 0–1), SUB (hogar recibe subsidio =1, caso contrario =0), FC (franja horaria de interrupciones, 0.2 para mañana, 1 para noche o todo el día), EC (estación del año, 0.5 en invierno/otoño y 1 en verano) y COC (cortes asociados a olas de calor o frío, 0–1). El índice se definió como:

$$CES = 0.3 CE + 0.1 PC + 0.2 SUB + 0.15 FC + 0.15 EC + 0.15 COC \quad (4)$$

Los pesos se asignaron priorizando la frecuencia de interrupciones (CE), por su impacto directo en la disponibilidad del servicio, mientras que factores contextuales como franja horaria, estación y cortes vinculados a olas extremas recibieron peso intermedio. La percepción de calidad-precio se incorporó con peso menor por su carácter subjetivo.

Una vez calculado el CES por hogar, se estimaron los estadísticos descriptivos: el valor promedio fue 0,40 y la mediana idéntica, lo que indica problemas moderados en la mitad de los hogares (valores entre 0,2 y 0,3). No obstante, algunos casos extremos alcanzan valores de 1, asociados a interrupciones frecuentes, prolongadas y en horarios críticos, reflejando situaciones severas de inestabilidad en el servicio eléctrico. El análisis de Monte Carlo muestra que la variabilidad y los escenarios críticos del CES dependen principalmente de los componentes con mayor peso (CE y SUB), mientras que los componentes con menor peso (PC, FC, EC, COC) tienen influencia moderada o baja. Esto indica que los pesos asignados reflejan adecuadamente la importancia relativa de cada componente en la fórmula, por lo que pueden considerarse confiables para evaluar la vulnerabilidad energética.

El valor promedio fue 0,40, con una mediana idéntica (Figura 5). La mitad de los hogares se ubica entre 0,2 y 0,3, reflejando problemas moderados. No obstante, casos extremos alcanzan valores de 1, con interrupciones frecuentes, prolongadas y en horarios críticos (noche o todo el día).

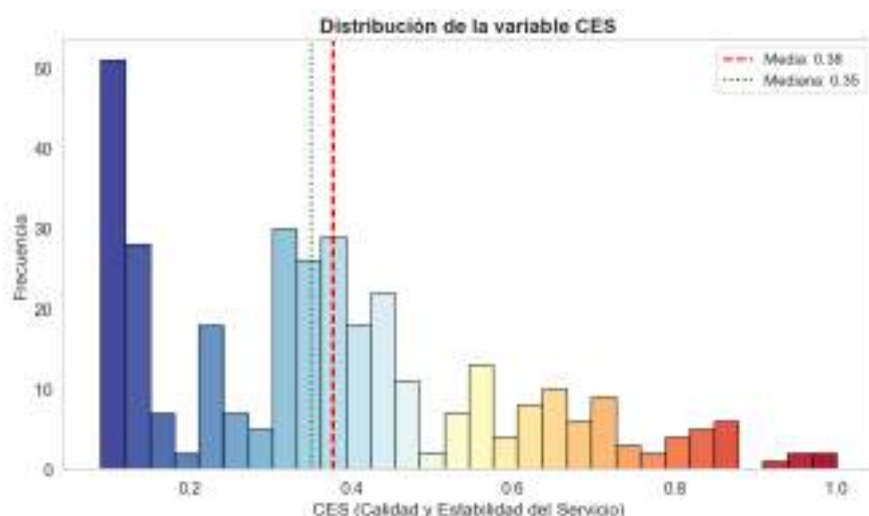


Figura 5: Distribución del puntaje CES por barrio. Fuente: elaboración propia

La Figura 5 permite visualizar diferencias territoriales: la Zona Sudeste presenta mayor variabilidad y casos extremos.

#### **Indicador de Vulnerabilidad Energética (VE)**

Al aplicar el criterio multidimensional ( $\geq 2$  dimensiones sobre umbral:  $AE \geq 0,6$ ;  $RI \geq 0,2$ ;  $CES \geq 0,5$ ), el 41,7% de los hogares se clasificó como vulnerables energéticamente. Esto supera la cobertura del indicador de pobreza energética tradicional y se acerca a las estimaciones de pobreza general para el área (Figura 6).

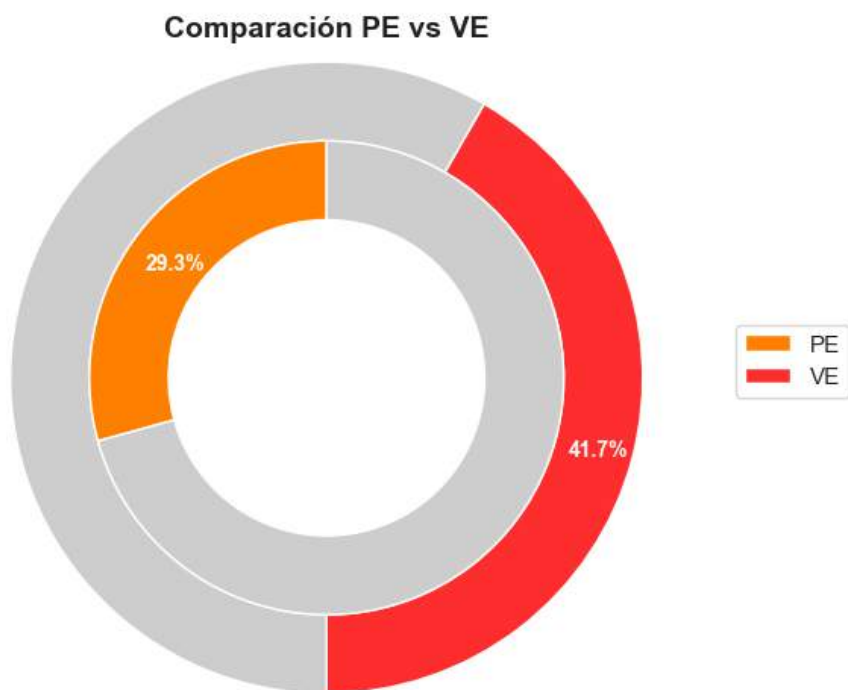


*Figura 6: Comparación entre porcentaje de hogares clasificados como PE y VE*

En la Figura 6 se aprecia que el indicador propuesto incorpora un conjunto de hogares que el criterio del 10% no detecta, especialmente aquellos con riesgo eléctrico alto o baja calidad del servicio.

## DISCUSIÓN

Los resultados muestran que el criterio tradicional basado únicamente en el esfuerzo económico subestima la magnitud de la vulnerabilidad energética en contextos urbanos populares. La incorporación de dimensiones técnicas y de calidad del servicio permite identificar problemáticas invisibilizadas por la carga económica sola, como riesgos eléctricos, inestabilidad de tensión o cortes recurrentes, que afectan de manera directa la habitabilidad y seguridad de los hogares. Este enfoque multidimensional no solo mejora la capacidad diagnóstica, sino que orienta con mayor precisión las intervenciones: en Villa Lavalle, donde el gasto relativo es el principal factor, las estrategias deberían centrarse en alivio económico y eficiencia energética; en la Zona SudEste, la prioridad pasa por garantizar la calidad y continuidad del suministro; y en Villa Floresta, donde se combinan conexiones precarias y alta exposición al riesgo eléctrico, urge avanzar en regularización, mejoras técnicas y formación en seguridad doméstica. Este hallazgo reafirma que no existen soluciones universales y que las políticas públicas deben adaptarse a las condiciones materiales, institucionales y sociales de cada territorio, incorporando diagnósticos integrales y procesos participativos que permitan diseñar respuestas pertinentes y sostenibles.

## CONCLUSIONES

El análisis realizado demuestra que la aplicación del indicador tradicional de Pobreza Energética basado únicamente en el umbral del 10% de gasto eléctrico sobre ingresos resulta insuficiente para caracterizar la magnitud y complejidad de la vulnerabilidad energética en contextos urbanos populares. En el caso de los tres sectores estudiados —Villa Floresta, Villa Lavalle y la Zona Sudeste—, este criterio subestima la problemática, al dejar fuera a hogares que, sin destinar grandes proporciones de sus ingresos a electricidad, enfrentan riesgos eléctricos significativos o acceden a un servicio de baja calidad y estabilidad.

El Indicador de Vulnerabilidad Energética (VE) propuesto, construido sobre tres dimensiones —Accesibilidad Económica, Riesgo e Infraestructura, y Calidad y Estabilidad del Servicio—, amplía la capacidad diagnóstica al integrar variables económicas, técnicas y perceptivas. Su enfoque

multidimensional permite una lectura más completa de las desigualdades energéticas y se acerca más a las tasas de pobreza general observadas en estos territorios. Este hallazgo es clave para orientar políticas públicas más focalizadas y efectivas.

Asimismo, el diseño del VE incorpora un elemento de flexibilidad metodológica, dado que sus umbrales y ponderaciones pueden adaptarse a distintas realidades locales sin perder coherencia conceptual. Esto lo convierte en una herramienta replicable en diferentes zonas del país y de América Latina, donde las condiciones climáticas, tarifarias y socioeconómicas presentan variaciones importantes. En contextos rurales, por ejemplo, la dimensión de calidad del servicio podría incorporar variables adicionales sobre continuidad del suministro y capacidad instalada, mientras que en áreas metropolitanas densas podría reforzarse el peso de la dimensión de riesgo e infraestructura.

Finalmente, el ejercicio comparativo evidencia que la pertinencia de un indicador de vulnerabilidad energética no radica en su rigidez normativa, sino en su capacidad para capturar las formas locales en que se expresa la desigualdad energética. La replicación de este enfoque requerirá no solo de ajustes técnicos en las métricas, sino también de un trabajo de contextualización territorial y diálogo con actores locales, asegurando que la herramienta sea al mismo tiempo técnicamente robusta y socialmente relevante.

## FUENTES DE FINANCIAMIENTO

Este trabajo fue financiado por el Proyecto de Investigación Científica y Tecnológica (PICT-2020 SERIEA-01759) “Política Pública y Desarrollo Científico-Tecnológico en Energías Renovables: Estrategias de Transición Sustentable en la Producción de Hábitat En Salta (2021-2023)” financiado por la Agencia I+D+i, el Proyecto de Investigación TIPO A N°2916/0 “Transición Energética en los Valles Calchaquíes y la Puna Salteña: análisis de políticas públicas de energía solar vinculadas con la producción del hábitat en Salta, Argentina” financiado por el CIUNSA y el Proyecto de Investigación TIPO A N°2710/0 “Caracterización y Factibilidad de Transiciones Energéticas en el noroeste argentino: Redes Inteligentes para un futuro sustentable” financiado por CIUNSA.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y a la Universidad Nacional de Salta por el financiamiento brindado. Además, agradecen profundamente la colaboración del Grupo de Estudios Socio-técnicos de la Energía y del Hábitat (GESEH), el grupo de referentes comunitarias “Mujeres Plenas” de Villa Floresta y la organización barrial “Casona” de La Paz, quienes hicieron posible la realización del Censo.

## REFERENCIAS

- Boardman, B. (1991). *Fuel poverty: From cold homes to affordable warmth*. Belhaven Press.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2023). *Pobreza energética en la Argentina: Propuestas conceptuales y metodológicas para su diagnóstico*. CEPAL.
- Bouzarovski, S., y Petrova, S. (2015). A global perspective on domestic energy deprivation: Overcoming the energy poverty–fuel poverty binary. *Energy Research & Social Science*, 10, 31–40. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2015.06.007>
- De Dicco, R. A. (2006). *Estudio sobre el agotamiento de las reservas hidrocarburíferas de Argentina, período 1980-2005* [Documento de trabajo]. Instituto de Investigación en Ciencias Sociales (IDICSO), Universidad del Salvador. <https://www.salvador.edu.ar/csoc/idicso>
- García Ochoa, R. (2014). Pobreza energética en América Latina (Documento de proyecto No. 36661). Naciones Unidas, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). <https://hdl.handle.net/11362/36661>
- González, F. D. F., Durán, P. A., Pérez Machado, F. A., Sarmiento Barbieri, N. M., Govetto, S. C., Pedraza, M. L., Soria, J. P., Vilte, G. J. L., y Elías, R. F. G. (2025). *Censo energético 2024: Encuesta sobre consumos y condiciones energéticas en barrios populares de la Ciudad de Salta* [Informe técnico]. Dirección General de Estadísticas y Censos de Salta



- González, F., Picabea, F., & Durán, P. A. (2023). Sentidos en torno a la dimensión energética en procesos de producción de hábitat en territorios indígenas en la provincia de Salta. *Revista Averma*, 26, 572–583.
- Lewis, P. (1982). *Fuel Poverty: Beyond Housing Standards*. *Energy Policy*, 10(3), 232–246. [https://doi.org/10.1016/0301-4215\(82\)90115-9](https://doi.org/10.1016/0301-4215(82)90115-9)
- Municipalidad de Salta. (2019). *Infraestructura de Datos Espaciales de la Municipalidad de Salta (IDEMSa)*. Recuperado de <https://idemsa.municipalidadsalta.gob.ar/>
- Secretaría de Integración Socio Urbana. (2022). *Registro Nacional de Barrios Populares (RENABAP)*. Ministerio de Desarrollo Social de la Nación. <https://www.argentina.gob.ar/desarrollosocial/renabap>

## **APPROACH TO AN ENERGY VULNERABILITY INDICATOR IN POPULAR NEIGHBORHOODS OF SALTA BASED ON THE 2024 ENERGY CENSUS**

**ABSTRACT:** This paper proposes a composite Energy Vulnerability (EV) indicator applied to popular sectors of the city of Salta, based on data collected by the 2024 Energy Census (n=345 households). The objective is to overcome the limitations of the traditional Energy Poverty (EP) indicator based on the 10% threshold of electricity expenditure over income, incorporating additional dimensions that reflect socioeconomic conditions, electrical infrastructure, and service quality. The methodology included the construction of three dimensions: Economic Affordability (AE), Risk and Infrastructure (RI), and Quality and Stability of Service (CES), with variables weighted according to relevance and normalized between 0 and 1. The results show that 41.7% of households are in an EV situation, while 29.3% have PE. This indicates that the new indicator better approximates the magnitude of general poverty in the territory, allowing for a broader understanding of energy inequalities. Implications for the design of public policies and programs focused on reducing energy vulnerability in low-income urban settings are discussed.

**Keywords:** energy vulnerability, energy poverty, popular neighborhoods, Salta, composite indicators.

## **DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO Y PROPUESTAS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA Y ENERGÍAS RENOVABLES EN UNA EMPRESA LÁCTEA DEL INTERIOR DE LA PROVINCIA DE SANTA FE**

**Martín S. García, Luis I. Silva, Luis E. Venghi, Daniel Cabrera Díaz**

Centro de Investigación y Transferencia de Rafaela - Universidad Nacional de Rafaela -  
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

Tel. 3492-501155 e-mail: [martin.garcia@unraf.edu.ar](mailto:martin.garcia@unraf.edu.ar)

**RESUMEN:** En el presente trabajo se desarrolla el diagnóstico energético de una empresa láctea ubicada en el interior de la provincia de Santa Fe. El estudio contempla, por un lado, la evaluación del potencial de mejora en la eficiencia energética a través del análisis del consumo de los motores de refrigeración y, por otro, la incorporación de una planta fotovoltaica de pequeña escala capaz de abastecer aproximadamente el 10% del consumo eléctrico de la planta. La metodología empleada incluyó mediciones in situ mediante un analizador de energía FLUKE 435-II, complementadas con el relevamiento y procesamiento de datos relacionados a la producción, suministrados por la propia empresa. Dentro de los resultados se obtuvieron que el cambio gradual de motores por otros de mayor eficiencia permitiría un ahorro energético del 3 % de manera anual, mientras que la planta fotovoltaica cubriría el 10 % del consumo total, con un payback simple de 8,6 años. Estas medidas permitirían disminuir los costos productivos, a la vez que reducirían la huella de carbono de la empresa, alineándola con los Objetivos de Desarrollo Sostenible y normativas regionales de generación distribuida.

**Palabras clave:** Eficiencia energética, planta fotovoltaica, eficiencia de motores, industria láctea, análisis de energía.

### **INTRODUCCIÓN**

En Argentina, las provincias más productivas como Buenos Aires, Santa Fe y Córdoba, concentran una gran parte de la actividad económica que combina las grandes empresas, industria avanzada y un entramado sólido de pequeñas y medianas empresas (PyMEs). Estas PyMEs son clave para diversificar la economía local, generar empleo (aproximadamente el 65 % del empleo privado registrado) y sostener las cadenas de valor en sectores como la manufactura, agroindustria y servicios (Secretaría de Industria y Desarrollo Productivo, 2023-2024). Principalmente, se distribuyen en los rubros de servicios personales y sociales (como salud, educación privada, gastronomía y esparcimiento), comercio y transporte (24,4 %), agropecuaria (15,9 %), servicios inmobiliarios y empresariales (14,6 %), industria manufacturera (12,3 %) y construcción (5,3 %) (Censo Nacional Económico del INDEC, 2020-2021). Esta diversidad evidencia un entramado productivo dinámico, donde el sector lácteo ocupa un lugar central. Santa Fe es una de las principales cuencas lecheras del país, concentra aproximadamente el 34 % de la producción nacional de leche cruda y aloja a cerca del 30 % de las PyMEs lácteas del país (Observatorio de la Cadena Láctea Argentina (OCLA), 2025). Esta concentración territorial no solo refleja una alta densidad productiva, sino también un entramado de actores que abarca desde tambos familiares hasta plantas industriales medianas con alto impacto en el empleo local. En muchas localidades santafesinas, la actividad láctea constituye el eje económico principal, articulando producción, procesamiento, transporte y servicios auxiliares. Sin embargo, presentan una problemática ambiental estrechamente ligada al alto consumo de energía térmica y eléctrica necesaria para procesos como pasteurización, refrigeración, el uso de bombas, compresores y sistemas de limpieza (Contreras, 2019). Estas demandas representan un costo operativo significativo y un incremento de la huella de carbono de la empresa debido a que la matriz energética de Argentina depende mayormente de



Esta obra está bajo Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

combustibles fósiles (Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico Sociedad Anónima (CAMMESA), 2025). Frente a esto, resulta clave implementar medidas de eficiencia energética para reducir el consumo energético mediante tecnologías, hábitos o diseños que optimicen el uso de los recursos disponibles. Algunas de estas buenas prácticas se obtienen a partir de la optimización de los sistemas de refrigeración con buen aislamiento, mantenimiento regular y uso de tecnologías como placas de enfriamiento; la sustitución de luminarias por LED y sensores de presencia; la recuperación de calor residual en procesos como la pasteurización; y la recirculación del agua caliente para reducir el consumo térmico. También es clave capacitar al personal en el uso racional de la energía, realizar auditorías energéticas, automatizar procesos como el lavado CIP (por sus siglas en inglés, Cleaning in Place), aprovechar la luz natural y evaluar tarifas eléctricas diferenciadas. Estas acciones permiten reducir costos operativos; disminuir la huella de carbono; prolongar la vida útil de los equipos mediante un uso más racional; cumplir con normativas ambientales y mejorar la imagen institucional frente a consumidores y organismos públicos; además habilita la transición a energías renovables, que complementa la reducción de la demanda energética total (Secretaría de Energía de Argentina, 2019).

La Ley 27.424 de la nación establece el Régimen de Fomento a la Generación Distribuida de Energía Renovable Integrada a la Red Eléctrica Pública. Este régimen permite que los usuarios de la red eléctrica, incluidas las PyMEs, generen su propia energía a partir de fuentes renovables (como solar o eólica) para autoconsumo, y que puedan inyectar el excedente a la red mediante el mecanismo de balance neto de facturación (Ley 27.424, 2017). Su relevancia para las pequeñas y medianas empresas radica en que promueve una mayor autonomía energética, una reducción en los costos operativos y la posibilidad de acceder a programas especiales como FODIS (Fondo para la Generación Distribuida de Energías Renovables) y FANSIGED (Fondo de Ampliación de la Red y Nacionalización de Sistemas de Generación Distribuida), creados por la Resolución 83/2019 del ex Ministerio de Hacienda (Resolución 83/2019). En la provincia de Santa Fe, el impulso a la generación de energía a partir de fuentes renovables cuenta con un sólido andamiaje normativo que articula legislación provincial y nacional. Desde 2005, la Ley Provincial de Santa Fe N° 12.503 declaró de interés la generación eléctrica renovable, estableciendo lineamientos de planificación participativa. Este marco fue reforzado en 2006 por la Ley N° 12.692, que introdujo mecanismos de fomento concretos como beneficios fiscales y apoyo financiero para tecnologías como el biogás, los biocombustibles y la generación distribuida. A su vez, Santa Fe adhirió plenamente en 2024 a la Ley Nacional N° 27.424. En este marco, se implementó el programa local Prosumidores, que brinda incentivos tributarios, como la exención de Ingresos Brutos y Sellos sobre la energía inyectada, y facilita la conexión con el sistema nacional.

Por otro lado, a nivel local son escasos los estudios que caractericen el consumo energético de una empresa y propongan estrategias adaptadas a las condiciones productivas y tecnológicas regionales. En este contexto, mejorar la eficiencia energética e incorporar energías renovables no solo responde a una necesidad operativa y económica, sino que también se alinea con compromisos globales asumidos por Argentina en materia de sostenibilidad. Particularmente, la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible impulsa acciones concretas para garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna (Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 7), fomentar la industrialización sostenible y resiliente (ODS 9), así como promover patrones responsables de producción y consumo (ODS 12), (ARGENTINA INNOVADORA 2030, 2023). Debido a cómo se compone la matriz energética Argentina, la reducción de la demanda energética mediante tecnologías e implementación de prácticas más eficientes contribuyen directamente a la mitigación del cambio climático (ODS 13). Por lo tanto, abordar la problemática energética en las PyMEs lácteas santafesinas no solo implica una mejora técnica y económica a nivel local, sino que representa una contribución significativa a los desafíos ambientales y energéticos de escala global.

Para combatir esta problemática, en el presente trabajo se realiza un análisis de consumo de la energía eléctrica utilizando el instrumento de medición FLUKE 435-II (Fluke Corporation, 2013) en las instalaciones de una empresa del rubro lácteo, del interior de la provincia de Santa Fe. Se realizaron los registros de la tensión, corriente, potencia activa, factor de potencia, entre otros, en un periodo de varios días con el fin de diagnosticar oportunidades para la reducción del consumo eléctrico de energía, como también determinar el dimensionamiento de un sistema fotovoltaico que pueda abastecer el 10 % del consumo total.

## METODOLOGÍA

La estrategia metodológica se basó en la realización de mediciones del consumo de energía eléctrica de la planta durante un período de tiempo que abarque los diferentes perfiles de consumo diario que pueden suceder en la planta. Esto, acompañado con la recolección de datos relacionados a la infraestructura y equipamiento, como así también a la producción y al personal. Posteriormente, se hizo el diagnóstico energético de la planta, haciendo énfasis en los sectores/equipos de mayor consumo. Finalmente, se analizaron diferentes alternativas que permitan un ahorro energético y una disminución en su huella de carbono, teniendo en cuenta la capacidad financiera de la empresa, sobre todo. A continuación, se desarrollan los diferentes pasos de la metodología llevada adelante.

### ***Descripción de las instalaciones***

La empresa industrial láctea se ubica al sur de la provincia de Santa Fe, en la ciudad de Elortondo, dentro de la zona bioambiental IIIa según Norma IRAM 11603. En ella se producen diferentes tipos de quesos (blandos, duros y especiales), que son distribuidos, luego, en la región. Cuenta con 11 empleados en la planta de producción, recibo y despacho de mercadería, 2 en gerencia y 2 en el sector administrativo. La jornada laboral en la que se concentra más del 90% de los procesos productivos y administrativos de la planta es de lunes a viernes de 7:00 a 15:00 horas. Mientras que los sábados a la mañana, junto con horas que sean fuera de la jornada típica, se trabaja de manera intermitente, dependiendo de la intensidad productiva. La superficie cubierta de la planta es de 1.500 m<sup>2</sup> aproximadamente, distribuidos en dos grandes sectores: i) Recepción de leche, Producción y Administración, 1280 m<sup>2</sup>, y ii) Maduración, Almacenamiento y Despacho, 125 m<sup>2</sup> (Figura 1). A continuación, se detalla cada una de ellas.



(a)



(b)

*Figura 1: Empresa láctea, (a) vista aérea, (b) vista de frente.*

### **Sector Recepción, Producción y Administración**

En este sector, Recepción ocupa un área importante (480 m<sup>2</sup>) debido al espacio que necesitan los camiones para realizar su descarga. El almacenamiento de la materia prima se dispone en un tanque con capacidad de hasta 28.000 litros (Figura 2). El promedio de recepción se estima entre 6.000-6.500 litros de leche, dos veces por semana. No obstante, el almacenamiento de la materia prima se encuentra generalmente entre el 20 % y 70 % de su capacidad total. El producto se recibe a temperatura controlada (4°C) y se mantiene a esa temperatura de manera constante y sin interrupciones, hasta el momento de su procesamiento. El motor del equipo compresor para el sistema de frío es de 10 HP.



*Figura 2: Recepción de leche y tanque de almacenamiento.*

El área de Producción cuenta con diferentes máquinas eléctricas, entre ellas bombas para el transporte de la materia prima, prensa hidráulica, agitadores, pasteurizadora, enfriador, etc. De las máquinas más importantes se cuenta de una pasteurizadora eléctrica, con un motor de 9 kW. La misma procesa entre

80-100 l/h, un total de 12.000 litros de leche por semana en promedio. Pudiendo variar desde 10.000 a 14.000 litros. Para el enfriado del producto pasteurizado dispone de un equipo enfriador pequeño a placas que es puesto en marcha a partir de la finalización del proceso de pasteurizado. Por otra parte, el sistema de aire comprimido se alimenta a través de un compresor a pistón, con un motor de 10 HP. El mismo tiene un uso estimado de una hora diaria, dependiendo de la intensidad de la producción.

Cabe destacar, que gran parte de estos ambientes de elaboración cuentan con equipos climatizadores que mantienen la temperatura controlada según sea necesario, con el fin de evitar la proliferación de bacterias o microorganismos no deseados.

Por otra parte, el sector administrativo está considerado dentro del sector de producción, ya que el mismo no tiene grandes consumos (una computadora de escritorio, dispenser, equipo de climatización, entre otros) y ocupa una pequeña parte de la superficie cubierta.

### **Sector Maduración, Almacenamiento y Despacho**

El sector de Maduración, Almacenamiento y Despacho se compone de dos áreas bien diferenciadas (Cámaras de Maduración y Despacho y Almacenamiento Producto final), según se observa en Figura 3. Este sector está diseñado para garantizar el correcto acondicionamiento, manipulación y conservación de quesos, bajo parámetros controlados de temperatura y humedad, conforme a estándares de la industria láctea.

#### **Cámaras de Maduración y Despacho**

Este espacio presenta una superficie total de 80 m<sup>2</sup>, con dimensiones aproximadas de 6,15 m de ancho por 13 m de largo (Figura 4). El área cuenta con dos cámaras y un espacio al ingreso con pavimento de fácil limpieza y paredes lisas recubiertas con material apto para contacto alimentario, que facilita la higiene y el mantenimiento sanitario. La iluminación es abundante, con una disposición que evita zonas de sombra; sin embargo, las luminarias instaladas emplean tecnología antigua y de bajo rendimiento energético, lo que representa una oportunidad de mejora en términos de eficiencia.

Este sector tiene dos cámaras independientes equipadas con un sistema de refrigeración autónomo, accionado por un motor de 15 HP, con clasificación de eficiencia IE2. Las condiciones ambientales se mantienen de forma constante: i) en 6 °C con 75% de humedad en la primera cámara; ii) en 10 °C con 80% de humedad en la otra. En ambos casos se controla mediante termohigrómetros calibrados y sistemas de regulación automática. Este microclima favorece el desarrollo gradual de las características organolépticas del queso, evitando la desecación superficial y permitiendo la maduración interna homogénea.

En la zona del ingreso (fuera de las cámaras) se realizan las operaciones de corte, fraccionamiento, pesaje y envasado de los quesos maduros, así como el etiquetado y acondicionamiento para su almacenamiento o distribución. El flujo de trabajo está diseñado para minimizar el riesgo de contaminación cruzada, manteniendo una separación física y funcional de las áreas de producción inicial y de maduración.

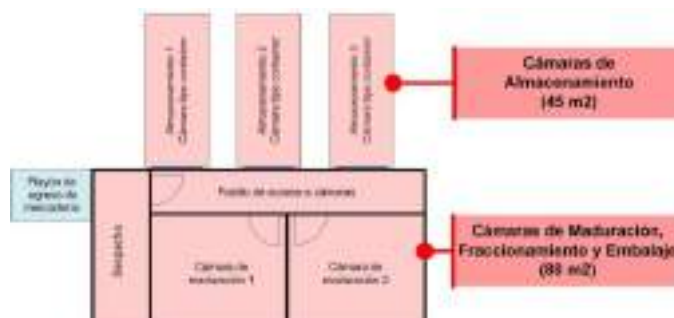


*Figura 3: Plano Cámaras de Maduración y Almacenamiento.*



Figura 4: Cámaras de maduración, (a) Cámara 1, (b) Cámara 2.

### Almacenamiento Producto final

Este sector se compone de tres cámaras independientes, cada una en estructura tipo *container*, con superficie de 15 m<sup>2</sup>, con dimensiones aproximadas de 2,5 m de ancho por 6 m de largo. Las cámaras están dispuestas en paralelo, alineadas junto a una compuerta del área de fraccionamiento.

Cada cámara está equipada con un sistema de refrigeración autónomo, accionado por un motor de 10 HP, con clasificación de eficiencia IE2. Las cámaras cuentan con iluminación interna mediante luminarias estancas, resistentes a la humedad.

El proceso dentro de estas cámaras incluye la colocación de los quesos en estanterías de acero inoxidable o material apto para uso alimentario, con circulación de aire forzada para garantizar uniformidad térmica y de humedad. La inspección periódica comprende control visual, rotación de piezas y verificación de parámetros físico-químicos y microbiológicos. La Figura 5 muestra el interior y exterior de las cámaras de almacenamiento.



Figura 5: Cámaras de almacenamiento producto final, (a) Interior, (b) Exterior.

### Diagnóstico energético

Para llevar adelante un diagnóstico adecuado se relevó la información de la planta en cuanto a demanda energética, consumo eléctrico y análisis de energía. Para ello, haciendo énfasis en los dos últimos puntos, se procedió a instalar el analizador de energía FLUKE 435-II en el Tablero de Comando General, con el objetivo de tener datos precisos sobre el consumo y calidad de energía (Figura 6). La función de este tablero es la distribución y protección de los circuitos de potencia de toda la planta. Los datos relevados fueron, tensión, corriente, potencia activa, factor de potencia, entre otros, con un intervalo de un minuto, durante cinco días continuos (considerando días hábiles y fines de semana), de manera de involucrar todos los procesos y los diferentes días de trabajo. Respecto a la demanda energética y a la instalación eléctrica se relevaron las cargas eléctricas compuestas por las diferentes máquinas junto con las luminarias de manera visual. Este analizador permitió obtener las curvas de cargas de los diferentes días de trabajo (Figura 7 y Figura 8), a la vez que se halló el consumo anual y, en conjunto con el relevamiento de la demanda, se pudo desagregar según los sectores de trabajo en el período de un año (Tabla 1 y Tabla 2). En el caso de la iluminación, si bien se detalla a nivel de sectores, para un mejor análisis, en Tabla 2 se concentraron todas las luminarias en un solo grupo, ya que los tiempos de encendido eran similares.





(a)



(b)

Figura 6: Instalación analizador de energía, (a) Tablero principal, (b) analizador.

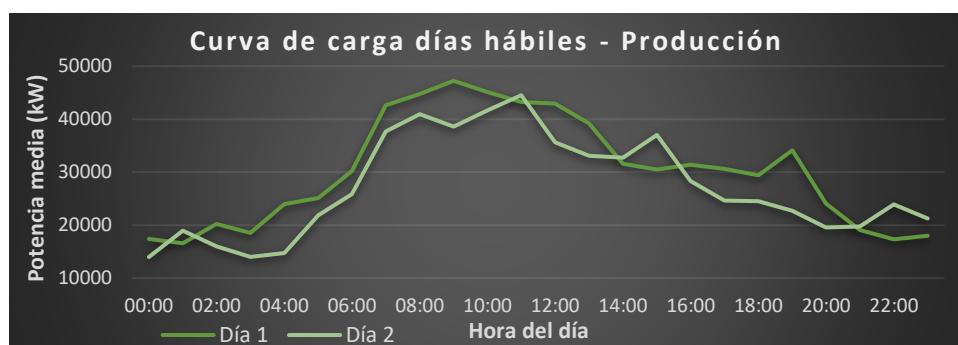


Figura 7: Curva de carga para días hábiles.



Figura 8: Curva de carga para días no hábiles.

Tabla 1: Consumo energético estimado

| Consumo estimado (kWh) |                    |                   |                   |
|------------------------|--------------------|-------------------|-------------------|
| Día                    | Día hábil          | Sábado            | Domingo           |
| Anual                  | 687,637            | 579,288           | 410,214           |
| <b>TOTAL (kWh)</b>     | <b>178.785,515</b> | <b>30.122,970</b> | <b>21.331,118</b> |
|                        |                    | <b>230.240</b>    |                   |

Tabla 2: Consumo de cargas eléctricas

| Pasteurizadora                 |               |
|--------------------------------|---------------|
| Motor (kW)                     | 9             |
| Funcionamiento (hs/sem)        | 16            |
| <b>Consumo anual (kWh/año)</b> | <b>7.488</b>  |
| Compresor                      |               |
| Motor (kW)                     | 7,46          |
| Funcionamiento (hs/sem)        | 5             |
| <b>Consumo anual (kWh/año)</b> | <b>1.940</b>  |
| Recepción leche                |               |
| Motor (kW)                     | 7,46          |
| Funcionamiento (hs/sem)        | 47,04         |
| <b>Consumo anual (kWh/año)</b> | <b>18.248</b> |



| <b>Máquinas de producción</b>        |               |
|--------------------------------------|---------------|
| Máquinas (kW)                        | 30            |
| Funcionamiento (hs/sem)              | 22            |
| <b>Consumo anual (kWh/año)</b>       | <b>34.320</b> |
| <b>Iluminación</b>                   |               |
| Iluminarias (kW)                     | 22            |
| Funcionamiento (hs/sem)              | 30,8          |
| <b>Consumo anual (kWh/año)</b>       | <b>35.235</b> |
| <b>Climatizadores elaboración</b>    |               |
| Motores (kW)                         | 11,2          |
| Funcionamiento (hs/sem)              | 8,8           |
| <b>Consumo anual (kWh/año)</b>       | <b>5.125</b>  |
| <b>Depósito maduración</b>           |               |
| Motores (kW)                         | 22,38         |
| Funcionamiento (hs/sem)              | 47,04         |
| <b>Consumo anual (kWh/año)</b>       | <b>61.509</b> |
| <b>Depósito almacenamiento final</b> |               |
| Motores (kW)                         | 22,38         |
| Funcionamiento (hs/sem)              | 47,04         |
| <b>Consumo anual (kWh/año)</b>       | <b>62.208</b> |

Respecto a la instalación eléctrica, para la alimentación de la planta industrial cuenta con cableado trifásico con conductores dimensionados para una corriente máxima de acuerdo al equipamiento actual, transportado por bandeja y tubería EMT/rigid, según recorrido. Posee, además, una malla de tierra y unión equipotencial para carcasas de máquinas, racks y metalizados, con comprobación periódica de resistencia de tierra ( $< 10 \Omega$  preferible para planta pequeña). A continuación, se describen los dos sectores principales y se realiza el diagnóstico correspondiente.

### **Sector Recepción, Producción y Administración**

El diagnóstico energético se hizo sobre los motores de mayores potencias y exigencias, y de la carga de iluminación. Para este caso es el motor del sistema frigorífico de la materia prima (10 HP), de la pasteurizadora (12 HP) y del compresor (10 HP).

Inventario de las cargas eléctricas principales (Tabla 2):

- Motor del sistema frigorífico de la materia prima: 10 HP de potencia nominal (7,46 kW); eficiencia eléctrica IE2; rendimiento  $\eta \approx 0,88$ ;  $\cos \varphi \approx 0,85$ ; corriente nominal  $I \approx 15,20$  A.
- Motor de pasteurizadora: 12 HP de potencia nominal (9 kW); eficiencia eléctrica IE2; rendimiento  $\eta \approx 0,88$ ;  $\cos \varphi \approx 0,85$ ; corriente nominal  $I \approx 15,70$  A.
- Motor del compresor de aire: 10 HP de potencia nominal (7,46 kW); eficiencia eléctrica IE2; rendimiento  $\eta \approx 0,88$ ;  $\cos \varphi \approx 0,85$ ; corriente nominal  $I \approx 15,40$  A.
- Iluminación de las diferentes áreas de Producción: Cuenta con luminarias fluorescentes T8, con reactancias magnéticas y lámparas leds en algunos espacios. La carga para luminarias se estima en 12 kW.

### **Sector Maduración, Almacenamiento y Despacho**

El diagnóstico energético se hizo sobre los dos motores de 15 HP de las cámaras de maduración más los tres motores de 10 HP de las cámaras (tipo contenedor) de almacenamiento. También se incluye en este análisis la instalación eléctrica asociada y el resto de los equipos eléctricos instalados en el sector. Las observaciones se basan en parámetros típicos de instalaciones industriales de proceso.

Inventario de las cargas eléctricas principales (Tabla 2):

- Motor del sistema frigorífico de Maduración (2 unidades): 15 HP de potencia nominal cada uno (11,19 kW); eficiencia eléctrica IE2; rendimiento  $\eta \approx 0,89$ ;  $\cos \varphi \approx 0,85$ ; corriente nominal  $I \approx 22,47$  A.
- Motor del sistema frigorífico de Almacenamiento (3 unidades): 10 HP de potencia nominal cada uno (7,46 kW); eficiencia eléctrica IE2; rendimiento  $\eta \approx 0,88$ ;  $\cos \varphi \approx 0,85$ ; corriente nominal  $I \approx 15,20$  A.

- Iluminación del área Maduración y Despacho: Cuenta con luminarias fluorescentes T8, con reactancias magnéticas y lámparas halógenas en áreas menores. La carga para luminarias se estima en  $\sim 30\text{--}45 \text{ W/m}^2 \rightarrow$  rango 2,4–3,6 kW.
- Iluminación interna por contenedor (3 unidades): Cuenta con luminarias estancas resistentes a humedad; se presume fluorescencia o LED de baja potencia, con una carga típica de 100–300 W.
- Sistema de ventilación y recirculación de aire forzado: motores para recirculación en cada contenedor y en el área de fraccionamiento, con potencias variables (entre 0,25–1,5 kW por ventilador).

A partir de los datos relevados, se realizó una estimación rápida de demanda y consumos, en el cual se obtuvieron los siguientes cálculos (cabe destacar que los mismos son orientativos):

- 2 motores frigoríficos:  $2 \times 14,79 \text{ kW} \approx 29,6 \text{ kW}$ .
- 3 motores frigoríficos:  $3 \times 9,98 \text{ kW} \approx 29,9 \text{ kW}$ .
- Iluminación área de maduración y fraccionamiento:  $\approx 4,2 \text{ kW}$ .
- Iluminación contenedores + controles + ventilación + auxiliares:  $\approx 4 \text{ kW}$ .
- Potencia activa total estimada  $\approx 67,7 \text{ kW}$ .
- Corriente total estimada en 380 V trifásica:  $I_{\text{total}} \approx 67700 \text{ W} / (\sqrt{3} \cdot 380) \approx 103 \text{ A}$ .

Como resultado de lo analizado en los dos grandes sectores se destacan los siguientes puntos:

- Motor del sistema frigorífico de la materia prima (10 HP): motor IE2, con menor eficiencia que un motor IE3/IE4. Aporta un consumo significativo en comparación con otras máquinas. Su reemplazo o incorporación de VFD puede reducir consumo y picos de arranque.
- Motores del sistema frigorífico de Maduración y Almacenamiento: son motores IE2, de 15 HP y 10 HP respectivamente, de eficiencia menor que motores IE3/IE4; representan la mayor fracción del consumo. Su reemplazo o incorporación de VFD puede reducir consumo y picos de arranque.
- Iluminación antigua en la mayoría de las áreas, en especial de Maduración y Fraccionamiento: alta densidad de potencia y reactancias magnéticas/pérdidas; impacto directo sobre kWh consumidos.
- Arranques directos o estrella-triángulo en diferentes motores de gran potencia: generan picos de intensidad y mayor consumo transitorio; los arranques frecuentes degradan eficiencia y aumentan costos de demanda.
- Ausencia o limitación de telemetría/monitorización continua: sin medidor de energía por sección no hay datos horarios ni perfil de demanda, dificultando optimización.
- Factor de potencia y armónicos: motores con variadores o cargas no lineales (reactancias magnéticas, electrónica) pueden producir desbalance, bajo factor de potencia y armónicos; sin corrección, penalizaciones en tarifa y pérdidas en cables/transformadores.
- Tableros y cableados precarios: conexiones flojas, aislamiento deteriorado y protecciones mal ajustadas pueden aumentar pérdidas y riesgos de indisponibilidad.

## RESULTADOS

A partir de los diagnósticos energéticos llevados a cabo se realizaron propuestas de eficiencia energética para los motores de mayor potencia y con gran impacto en el consumo eléctrico total, y de generación fotovoltaica. Además, al final de esta sección se agrega un apartado que resume una serie de recomendaciones técnicas tendientes a una mayor eficiencia de la planta.

### ***Propuesta de Eficiencia Energética***

A partir del relevamiento de las cargas eléctricas en la planta, se observa que el mayor potencial de reducción de energía está asociado a los motores de los sistemas de refrigeración. Para los motores eléctricos industriales, la clasificación IE (International Efficiency) es un estándar internacional que define distintos niveles de rendimiento energético. La categoría IE2 (los instalados actualmente) corresponde a una eficiencia estándar mientras que IE4 se clasifica como “super premium” y presenta menores pérdidas eléctricas y mecánicas. Adoptar un motor con eficiencia IE4 implica consumir menos energía para generar la misma potencia mecánica, lo que se traduce en una disminución directa de los costos operativos. Al mismo tiempo, la industria logra una mayor competitividad, ya que reduce el costo energético por cada unidad de producto fabricado. Esta mejora en la eficiencia energética también conlleva beneficios ambientales, ya que se reducen las emisiones indirectas de gases de efecto

invernadero por cada kg de queso producido. Asimismo, los motores IE4 suelen operar a temperaturas más bajas, lo que prolonga su vida útil y aumenta su confiabilidad.

### Evaluación del retorno de inversión (ROI) para las cámaras de maduración

Se ha evaluado el reemplazo de un motor trifásico de 15 HP (11,19 kW) de clase de eficiencia IE2 por uno de igual potencia en clase IE4, a fin de determinar el ahorro energético anual y el tiempo de retorno de la inversión, ver Tablas 3 y 4.

Tabla 3: Cálculo del consumo de cada motor para las condiciones de operación

| Tipo de motor | Potencia Nominal (kW) | Duty Cycle | Potencia Mecánica (kW) | Rend. (η) | Energía Eléctrica (MWh/año) |
|---------------|-----------------------|------------|------------------------|-----------|-----------------------------|
| IE2           | 11,19                 | 0,28       | 3,133                  | 0,889     | 30,874                      |
| IE4           |                       |            |                        | 0,938     | 29,261                      |

Tabla 4: Detalle de las variables económicas para calcular el ROI

| Tipo de motor | Ahorro (MWh/año) | Costo energía (USD/MWh) | Ahorro (USD/año) | Costo Motor (USD) | Diferencia de precio (USD) |
|---------------|------------------|-------------------------|------------------|-------------------|----------------------------|
| IE2           | 1,613            | 65,82                   | 106,16           | 1.588,46          | 800,04                     |
| IE4           |                  |                         |                  | 2.388,50          |                            |

De acuerdo a los resultados obtenidos en Tabla 3 y, con los datos que se muestran en Tabla 4 se puede evaluar la tasa de retorno ROI del siguiente modo:

$$ROI = \frac{\text{Diferencia de precio}}{\text{Ahorro anual}} = \frac{800,04}{106,16} = 7,54 \text{ años}$$

### Evaluación del retorno de inversión (ROI) para las cámaras de almacenamiento

Se ha evaluado el reemplazo de un motor trifásico de 10 HP (7,46 kW) de clase de eficiencia IE2 por uno de igual potencia en clase IE4, a fin de determinar el ahorro energético anual y el tiempo de retorno de la inversión, ver Tablas 5 y 6.

Tabla 5: Cálculo del consumo de cada motor para las condiciones de operación

| Tipo de motor | Potencia Nominal (kW) | Duty Cycle | Potencia Mecánica (kW) | Rend. (η) | Energía Eléctrica (MWh/año) |
|---------------|-----------------------|------------|------------------------|-----------|-----------------------------|
| IE2           | 7,46                  | 0,28       | 2,089                  | 0,880     | 20,793                      |
| IE4           |                       |            |                        | 0,926     | 19,760                      |

Tabla 6: Detalle de las variables económicas para calcular el ROI

| Tipo de motor | Ahorro (MWh/año) | Costo energía (USD/MWh) | Ahorro (USD/año) | Costo Motor (USD) | Diferencia de precio (USD) |
|---------------|------------------|-------------------------|------------------|-------------------|----------------------------|
| IE2           | 1,033            | 65,82                   | 67,99            | 827,70            | 395,75                     |
| IE4           |                  |                         |                  | 1.223,45          |                            |

De acuerdo a los resultados obtenidos en Tabla 5 y, con los datos que se muestran en Tabla 6 se puede evaluar la tasa de retorno ROI del siguiente modo:

$$ROI = \frac{\text{Diferencia de precio}}{\text{Ahorro anual}} = \frac{395,75}{67,99} = 5,82 \text{ años}$$

### Resumen de la propuesta

La sustitución de motores IE2 por IE4 generará un ahorro anual de 1,613 MWh (10 HP) y 1,033 MWh (15 HP), equivalente a 106,16 USD y 67,99 USD, respectivamente. El tiempo estimado de recuperación de la inversión es de aproximadamente 7,5 y 5,8 años.

Aunque el periodo de retorno es relativamente largo, el cambio aporta beneficios energéticos y ambientales. Además, en un contexto tarifario y puede resultar más atractivo si el costo de la energía aumenta o si se consideran incentivos por eficiencia energética.

Si el recambio se realiza sobre los 5 motores (2 de 15 HP y 3 de 10 HP) el ahorro de energía será de 6,325 MWh. Este volumen de energía ahorrada significa un ahorro respecto del consumo total de energía eléctrica del 3 %.

### ***Propuesta de Generación con Fuentes Renovables***

De los relevamientos realizados se observa que el principal vector energético de la planta es la energía eléctrica. Por lo tanto, a fin de compensar el impacto ambiental producido por el consumo de energía eléctrica se propone la instalación de una planta solar fotovoltaica.

A partir de los datos de la red solarimétrica de la provincia de Santa Fe (Risso, 2015), se tiene que la producción de energía por cada kWp de planta fotovoltaica instalada en la localidad de Elortondo será de aproximadamente unos 1.540 kWh/(kWp año). A partir de este dato se propone instalar una planta fotovoltaica que genere alrededor del 10 % del consumo total que tiene la planta que se calculó en 230.240 kWh/año. Así, tenemos la siguiente potencia pico de la planta:

$$P_{nom} = \frac{23024 \text{ kWh/año}}{1540 \text{ kWh/kWp.año}} = 14,95 \text{ kWp}$$

### **Evaluación del retorno de inversión (ROI) para una planta FV de 15 kWp**

Datos iniciales:

- Potencia: 15 kWp
- Producción año 1:  $15 \times 1540 = 23100 \text{ kWh}$
- Precio energía: 65,82 USD/MWh (0,06582 USD/kWh)
- Inversión inicial:  $15 \times 820 = 12225 \text{ USD}$
- Degradación anual: 1 %
- Horizonte de análisis: 25 años

Producción total en 25 años:

- Usamos la fórmula de suma geométrica con degradación:
- Producción total =  $23.100 \times \frac{1 - (0,99)^{25}}{1 - 0,99}$
- Producción total  $\approx 23.100 \times 22,207 \approx 512.977 \text{ kWh}$
- Ingresos totales:  $512977 \text{ kWh} \times 0,06582 \text{ USD/kWh} = 33.726 \text{ USD}$

Rentabilidad:

- Inversión inicial: 12.225 USD
- Beneficio neto:  $33.726 \text{ USD} - 12.225 \text{ USD} \approx 21.501 \text{ USD}$
- Payback simple (con 1.519 USD en el primer año menos 1 % anual): 8,6 años.

### **Resumen de la propuesta**

La instalación de una planta FV de 15 kWp permite generar el 10 % del consumo total de la energía de la planta productiva. La inversión inicial de 12.225 USD (820 USD/kWp). La planta generará unos 23.100 kWh/año inicialmente (1.540 kWh/kWp), con una degradación anual del 1%, y la energía se valora en 65,82 USD/MWh. El flujo de caja acumulado supera la inversión en unos 8,6 años, y, considerando una vida útil de 25 años, la planta generaría 512.977 kWh, con ingresos totales de unos 33.800 USD. Este estudio preliminar no incluye costos de operación, subsidios o inflación, pero demuestra viabilidad económica con un retorno atractivo.

### **Recomendaciones técnicas**

Para una mayor eficiencia del uso de la energía eléctrica en la planta, se detallan a continuación, una serie de recomendaciones aplicables de manera gradual:

- Medición y diagnóstico en sitio: instalar analizadores de red en el tablero de la sección por al menos 30 días de monitoreo en sistemas frigoríficos de Recepción de leche, Maduración y Almacenamiento.
- Sustitución progresiva de motores IE2 (los de mayores consumos) por motores de mayor eficiencia (IE3/IE4) o, si la aplicación requiere control de carga, instalar VFD adecuados con filtros de salida para reducir armónicos. Calcular ROI antes de sustitución estacionaria.
- En motores de pasteurizadora y compresor de aire, por el momento no se sugieren modificaciones, ya que su consumo es menor respecto a otros motores.
- Retrofit de iluminación: sustituir luminarias obsoletas por LED de alta eficiencia con drivers electrónicos y control por zonificación/ocupación + sensor crepuscular. Se recomienda mejorar la iluminación en algunos sectores productivos.
- Corrección del factor de potencia: mejorar y actualizar el banco de condensadores con control automático o soluciones de corrección activa para mantener factor  $> 0,95$  si la facturación lo requiere.
- Implementar control y automatización: programar ciclos de ventilación y recirculación por demanda, interlocks con compuertas, horarios de iluminación en baja ocupación.
- Mantenimiento predictivo: termografía en bornes y motores, verificación de torque y alineación, limpieza de condensadores/evaporadores para mantener eficiencia frigorífica.

## CONCLUSIONES

En una empresa láctea del sur de la provincia de Santa Fe se realizó un diagnóstico energético a través del relevamiento de las diferentes cargas eléctricas, junto con el análisis de energía en el Tablero de Comando General de la planta, mediante el analizador FLUKE 435-II, midiendo de manera continua durante varios días, que involucren todos los procesos y los diferentes días de trabajo. El diagnóstico involucró el análisis del consumo de energía de acuerdo a la eficiencia de los motores de mayor consumo, la eficiencia de diferentes cargas eléctricas como las luminarias y el impacto de la instalación de una planta fotovoltaica que genere el 10 % del consumo anual. En el caso de los motores de mayor consumo, se recomendó el cambio gradual de los mismos hacia motores de alta eficiencia (los actuales son de baja eficiencia, IE2), permitiendo un ahorro energético del 3 % y un impacto directo en los costos de producción. De la misma manera, se recomendó cambios graduales en las luminarias de tecnología antigua, de modo de disminuir la intensidad energética por área, además de disminuir el consumo de energía derivado de estas. Por último, en el caso de la planta fotovoltaica, se hizo un estudio sobre la instalación de un sistema de 15 kWp para cubrir el 10 % de la generación, el cual se demostró viabilidad económica para llevar adelante, con un payback simple de 8,6 años. Estas medidas, implementadas de manera gradual, permitirían disminuir los costos de producción, recuperar la inversión en un tiempo de 5 a 8 años y reducir de manera efectiva la huella de carbono de la empresa, lo que haría de ella una empresa alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y normativas locales de generación distribuida.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue desarrollado gracias al financiamiento otorgado por la Universidad Nacional de Rafaela y el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

## REFERENCIAS

- Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico Sociedad Anónima (CAMMESA). (2025). *Matriz de generación eléctrica*. <https://cammesaweb.cammesa.com/>
- Fluke Corporation. (2013). *Service manual: Fluke 434, 435 three-phase power quality analyzer* (Rev. 2). Fluke Corporation. <https://www.testworld.com/wp-content/uploads/service-manual-fluke-434-435-three-phase-power-quality-analyzer.pdf>
- Gobierno de la Provincia de Santa Fe. (2025). *Lechería en Santa Fe: Tambos, vacas y producción de leche cruda*. <https://www.santafe.gov.ar/index.php/web/content/view/full/235296/>
- Gobierno de la Provincia de Santa Fe. (2005). *Ley Provincial N.º 12.503: Energías renovables*. Boletín Oficial.

- Gobierno de la Provincia de Santa Fe. (2006). *Ley Provincial N.º 12.692: Régimen de promoción de energías renovables*. Boletín Oficial.
- Instituto Nacional de Estadística y Censos (INDEC). (2021). *Censo Nacional Económico 2020/21: Distribución de unidades productivas por rama de actividad*. <https://www.indec.gob.ar/indec/web/Nivel4-Tema-3-49-167>
- Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI). (s.f.). *Buenas prácticas en refrigeración e iluminación industrial y comercial*. Argentina.gob.ar. <https://www.argentina.gob.ar/inti/eficiencia-energetica>
- Argentina. Congreso de la Nación. (2017). *Ley N.º 27.424: Régimen de fomento a la generación distribuida de energía renovable integrada a la red eléctrica pública*. Boletín Oficial de la República Argentina, 27 de diciembre de 2017. <https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/ley-27424-275848>
- Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación de Argentina. (2023). *Argentina innovadora 2030*. <https://www.argentina.gob.ar/ciencia/plan-nacional-cti/plan-cti>
- Provincia de Santa Fe. (2007). *Decreto N.º 158/07: Reglamentación de la Ley 12.692 (Secretaría de Energía como autoridad de aplicación)*. <https://www.santafe.gob.ar/ms/generfe/wp-content/uploads/sites/23/2018/11/DECRETO-158-07-Reglamentación-Ley-12.692.pdf>
- Provincia de Santa Fe. (2024, 18 de abril). *Ley N.º 14.259: Adhiérese la provincia de Santa Fe a la Ley Nacional N.º 27.424 de generación distribuida* (B.O. 26-abr-2024). <https://www.santafe.gob.ar/boletinoficial/ver.php?seccion=2024%2F2024-04-26ley14259-2024.html>
- Argentina. Ministerio de Hacienda. (2019, 11 de abril). *Resolución N.º 83/2019: Reglamentación del FODIS y FANSIGED, programas de financiamiento e incentivos para generación distribuida*. Boletín Oficial de la República Argentina. <https://www.boletinoficial.gob.ar/detalleAviso/primera/205434/20190411>
- Risso, G., Battioni, M., Cutrera, M., Bleger, D., & Schmidt, J. (2015, noviembre). Solar resource assessment in the province of Santa Fe for energy generation. En *Proceedings of the XXXVIII Argentinian Association on Renewable Energy and Environment Working Meeting* (Vol. 3, pp. 04.85–04.91). San Rafael, Argentina.
- Secretaría de Industria y Desarrollo Productivo, Ministerio de Economía de la Nación. (2023-2024). *Informe de empleo registrado privado y dinámica de PyMEs en Argentina*. <https://www.argentina.gob.ar/>
- Secretaría de Gobierno de Energía de Argentina. (2019). *Informe de gestión: Eficiencia energética en Argentina*. Presidencia de la Nación. [https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/if-2019-97939676-apn-dneemha\\_ig\\_eficiencia\\_energetica\\_version\\_impresa.pdf](https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/if-2019-97939676-apn-dneemha_ig_eficiencia_energetica_version_impresa.pdf)

## ENERGY ASSESSMENT AND PROPOSED ENERGY EFFICIENCY AND RENEWABLE ENERGY SOLUTIONS FOR A DAIRY PROCESSING PLANT IN SANTA FE PROVINCE

**ABSTRACT** This study presents an energy assessment of a dairy company located in the Santa Fe province. The research evaluates potential energy efficiency improvements through analysis of refrigeration motor consumption, while also proposing the integration of a small-scale photovoltaic plant capable of supplying approximately 10% of the facility's electricity demand. The methodology included on-site measurements using a FLUKE 435-II power analyzer, supplemented with data collection and processing related to production, provided by the company itself. The results showed that the gradual replacement of motors with higher efficiency ones would yield an annual energy saving of 3 %, while the photovoltaic plant would supply 10 % of the total consumption, with a simple payback of 8.6 years. These measures would reduce production costs while also lowering the company's carbon footprint, aligning it with the Sustainable Development Goals and regional distributed generation regulations.

**Keywords:** Energy efficiency, photovoltaic plant, motor efficiency, dairy industry, energy analysis.

## **ANÁLISIS DEL CRÉDITO DE CAPACIDAD PARA LA GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE ENERGÍAS RENOVABLES EN LA MATRIZ ELÉCTRICA ARGENTINA**

**Daniela Keesler<sup>1</sup>, Gabriel Blanco<sup>1</sup>, María E. Ramadan<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Centro de Tecnologías Ambientales y energía (CTAE) - Departamento de Ingeniería Electromecánica  
– Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires  
(UNICEN)

Tel.: +54 02284 670320 - e-mail: ingenieria@fio.unicen.edu.ar

**RESUMEN:** Ante la creciente incorporación de potencia renovable intermitente en la matriz de generación eléctrica actual y en escenarios futuros que buscan una matriz libre de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), es preciso establecer metodologías que permitan predecir si habrá suficiente energía para abastecer las diferentes demandas horarias durante todo el año.

El factor que permite determinar la capacidad de una planta de generación eléctrica para atender la demanda de manera “firme” y confiable es el “crédito de capacidad”. Este factor depende de numerosas variables como la tecnología, la locación, el porcentaje de participación de esta tecnología en la matriz, los patrones de demanda, entre otros. Determinar entonces este factor resulta de vital importancia para la prospectiva del sector energético de una región o de un país, así como también para la planificación diaria de la operatoria del parque de generación eléctrica.

Existen diversas metodologías que intentan determinar el crédito de capacidad para las energías renovables intermitentes, como la energía solar fotovoltaica y la energía eólica, basadas principalmente en métodos estadísticos y probabilísticos. En este trabajo se propone la aplicación de alguno de estos métodos a fin de calcular el crédito de capacidad para la generación eléctrica a partir de estas dos fuentes renovables, en diferentes escenarios de penetración en la matriz eléctrica argentina.

Se encontró que el crédito de capacidad para energía solar fotovoltaica varía entre 0 % y 94 %, mientras que para energía eólica oscila entre 5 % y 67 %, dependiendo de la región y del momento del año, reflejando la variabilidad de estos recursos a lo largo del país.

El análisis gráfico de la tecnología eólica arroja una tendencia decreciente de los valores obtenidos, mientras que, para la energía solar fotovoltaica, ese patrón es más difuso. Este análisis revela cómo la variabilidad temporal de los recursos renovables impacta en el crédito de capacidad y en su capacidad para satisfacer la demanda. El comportamiento real, basado en datos reales discretos, brinda valores que resultan confiables y útiles para la planificación. La acumulación de datos reales a lo largo del tiempo contribuirá a mejorar de manera gradual la precisión y robustez de los resultados.

Evaluar el crédito de capacidad considerando la simultaneidad con respecto a la demanda horaria y mensual es clave para una planificación energética efectiva. Esto contribuye a optimizar la expansión del sistema eléctrico mediante la implementación de energías renovables y a cumplir con objetivos ambientales nacionales de reducción de emisiones.

**Palabras clave:** energía solar, energía eólica, crédito de capacidad, confiabilidad, generación variable.

### **INTRODUCCIÓN**

Para asegurar la cobertura de la demanda a lo largo de todas las horas del año, los sistemas eléctricos se conciben con un margen de seguridad que se conoce como margen de reserva. Este margen de reserva





se calcula como la relación entre la llamada “potencia firme” del parque de generación y el máximo pico de demanda registrado o proyectado, y suele fijarse entre un 10% a 25% (IRENA, 2017). La potencia firme se define como la cantidad de generación de energía eléctrica que se puede garantizar para satisfacer la demanda en un momento dado, incluso en condiciones adversas.

Actualmente, en nuestro país, se considera que las energías renovables intermitentes no aportan potencia firme al sistema eléctrico. Esta consideración limita la incorporación masiva de energías renovables al sistema eléctrico, dificulta planificar el reemplazo de las centrales térmicas con el objetivo de reducir las emisiones de GEI y, además, puede volver más costosos los sistemas de generación eléctrica por la necesidad de contar con fuentes de potencia firme adicionales. Sin embargo, en diferentes países del mundo y la región se acepta el aporte de energía firme por parte de tecnologías renovables intermitentes (ej. Chile, Perú, México, entre otros) (ASEP, 2019).

En este trabajo, se busca determinar cuál podría ser el aporte de potencia firme de centrales solares fotovoltaicas y eólicas en la matriz eléctrica argentina para diferentes escenarios de penetración. Para una nueva instalación, la potencia firme puede calcularse como el producto entre la potencia instalada y el crédito de capacidad (CC), donde el CC puede definirse como la porción de capacidad nominal que estará disponible en los momentos de mayor demanda (Ibanez, Milligan, 2014). Para su determinación existen distintos métodos basados en dos conceptos: series estadísticas y cálculos probabilísticos. El desarrollo a continuación se basa en cálculos probabilísticos, siguiendo la metodología propuesta por Ferreira, Carvalho (1998). Esta metodología fue ajustada para optimizar su aplicación en la matriz eléctrica argentina.

## METODOLOGÍA

A continuación, se detallan los modelos implementados y los pasos seguidos (Ferreira, Carvalho, 1998) para alcanzar el objetivo antes propuesto.

### Definiciones

Considerando la potencia instalada de las fuentes de energía convencionales como  $R$  y a la demanda de energía eléctrica como  $D$ , la confiabilidad con la que debe ser satisfecha la demanda se expresa en la Ecuación (1). Esta confiabilidad representa la probabilidad de que la potencia instalada convencional supere a la demanda con una confiabilidad  $\alpha$ .

$$P(R - D \geq 0) \geq \alpha \quad (1)$$

Para analizar el efecto de la incorporación de fuentes renovables, se plantean dos escenarios. En ellos,  $R_1$  y  $R_2$  corresponden a valores específicos de la potencia instalada convencional  $R$ , mientras que  $G$  representa la potencia proveniente de fuentes de energía renovable. Las Ecuaciones (2) y (3) representan estos escenarios, identificando el aporte de las renovables en la segunda de ellas. Además, se introduce el concepto de demanda residual, definida como la demanda neta una vez considerado el aporte renovable ( $D - G$ ).

$$P(R_1 - D \geq 0) = \alpha \quad (2)$$

$$P(R_2 + G - D \geq 0) = \alpha \quad (3)$$

En este marco:

$R_1$  denota la potencia instalada convencional mínima requerida para satisfacer la demanda con el nivel de confiabilidad especificado, sin considerar generación renovable.

$R_2$  por su parte, representa la potencia instalada convencional mínima necesaria teniendo en cuenta la contribución renovable.

Con base en estas definiciones, el crédito de capacidad (CC) se define como se muestra en la Ecuación (4). Esta métrica cuantifica la reducción potencial de la capacidad convencional gracias a la inclusión de renovables, expresada como el porcentaje de potencia instalada renovable que efectivamente reemplaza a la potencia instalada convencional, manteniendo los niveles de confiabilidad establecidos

$$CC = \frac{R_1 - R_2}{P_{instalada}} \cdot 100 \quad (4)$$

### **Consideraciones previas**

Para los cálculos y modelos probabilísticos presentados, se realizaron las siguientes consideraciones.

En primer lugar, se debe tener en cuenta que, tanto  $D$  como  $G$  representan distribuciones de probabilidad, mientras que  $R_1$  y  $R_2$  corresponden a un parámetro constante en el análisis, sin variación estadística. Por otro lado, es necesario distinguir el tipo de fuente de energía renovable a evaluar, ya que sus comportamientos son diferentes. Este estudio se centró únicamente en la energía solar fotovoltaica y la energía eólica. El método de análisis resulta en una “resta” de distribuciones de probabilidad, se debe establecer el tipo de distribución de cada serie de datos a analizar: demanda de energía eléctrica y generación de cada fuente renovable a considerar. El comportamiento de la demanda de energía eléctrica ( $D$ ) sigue una distribución normal (Ferreira, Carvalho, 1998), así como también la generación solar fotovoltaica (Dominguez Gutierrez, 2014), mientras que la generación eólica sigue una distribución del tipo Weibull (Tuller, Brett, 1984). Esto hace que las distribuciones de probabilidades de demanda y generación eólica no puedan restarse directamente y sea necesario recurrir a la Simulación Montecarlo para esta operación (Illana, 2013). Para asegurar la confiabilidad del método y la suavidad de las curvas, se realizó dicha simulación con  $10^6$  muestras.

Finalmente, el análisis se llevó a cabo dividiendo el país en distintas regiones, siguiendo las establecidas para el Mercado Eléctrico Mayorista (MEM), conforme a la categorización utilizada por CAMMESA (2025), entidad responsable de la operación del mercado eléctrico mayorista en Argentina.

Asimismo, se consideró una desagregación temporal a escala mensual. Esta metodología responde a la variabilidad espacial y temporal de los recursos naturales, tanto a lo largo del territorio nacional como a lo largo del año. Las regiones consideradas se ilustran en la Figura 1.



Figura 1: División por regiones en Argentina.

### Análisis previos

Previo al modelado de cada distribución, se realizó un análisis basado en datos históricos de demanda máxima correspondientes al período 2007-2023. El objetivo fue identificar, para cada mes, el horario de máxima demanda. Esta información es necesaria para la aplicación del método, pero también porque dicho horario representa el momento de mayor estrés del sistema eléctrico, en línea con la definición del crédito de capacidad.

Los datos de demanda máxima horaria fueron obtenidos de las bases de datos disponibles en la página web de CAMMESA (2025). El análisis se realizó a partir de datos mensuales, los cuales fueron segmentados en 2 franjas horarias: desde las 00:00 hasta las 17:00 horas, identificando una primera mitad del día, y desde las 17:00 hasta las 00:00 horas, como segunda mitad del día. Esta división se estableció tras observar que el comportamiento de la demanda eléctrica presenta dos picos característicos a lo largo del día. Para cada franja horaria se identificaron los horarios con mayor recurrencia en los valores registrados. Finalmente, mediante un promedio ponderado en función de la demanda en MW para cada horario, se determinó el horario con el mayor pico de demanda. Estos pueden verse en la Tabla 1.

Tabla 1: Resumen de horarios de demanda máxima por mes.

|    | Ene   | Feb   | Mar   | Abr   | May   | Jun   | Jul   | Ago   | Sept  | Oct   | Nov   | Dic   |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Hr | 15 hs | 15 hs | 20 hs | 20 hs | 20 hs | 20 hs | 20 hs | 20 hs | 20 hs | 20 hs | 21 hs | 15 hs |

### Modelado probabilístico

El modelado se basó en las series de datos históricas también obtenidos de CAMMESA. Estos datos cuentan con información horaria y mensual desagregada por región de la energía generada y demandada en el país. Los datos de energía demandada fueron tomados del año 2021 al año 2024, mientras que, para los datos de energía generada no fue posible tomar datos en un rango más allá de 1 año, debido a la variación de la potencia instalada, por la incorporación de nuevas centrales. Ampliar el rango temporal de los datos de energía generada para futuros análisis permitiría obtener estimaciones más robustas y

con mayor validez estadística sobre el comportamiento. Para este caso se tomaron datos desde abril de 2024 a marzo de 2025.

A partir de los datos en el horario de mayor demanda se logró confirmar las distribuciones antes propuestas. Una vez determinada la distribución de probabilidades que mejor se ajusta a cada serie de datos a analizar, se realizó el cálculo de los parámetros y distribuciones de cada una. A modo de ejemplo esto puede verse en la Figura (2) correspondiente a energía solar fotovoltaica para la región de Cuyo y en la Figura (3) correspondiente a energía eólica para Buenos Aires.

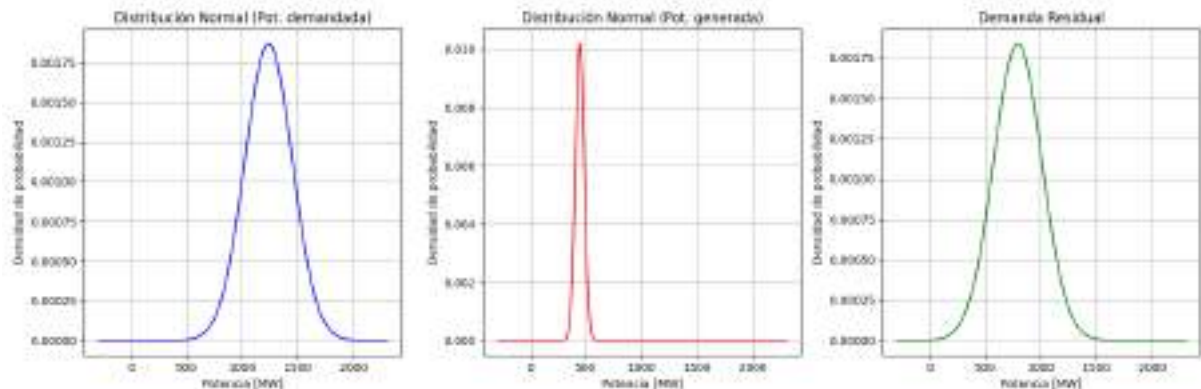


Figura 2: Gráficas de densidad de probabilidad, mes de enero región Cuyo, análisis energía solar fotovoltaica.

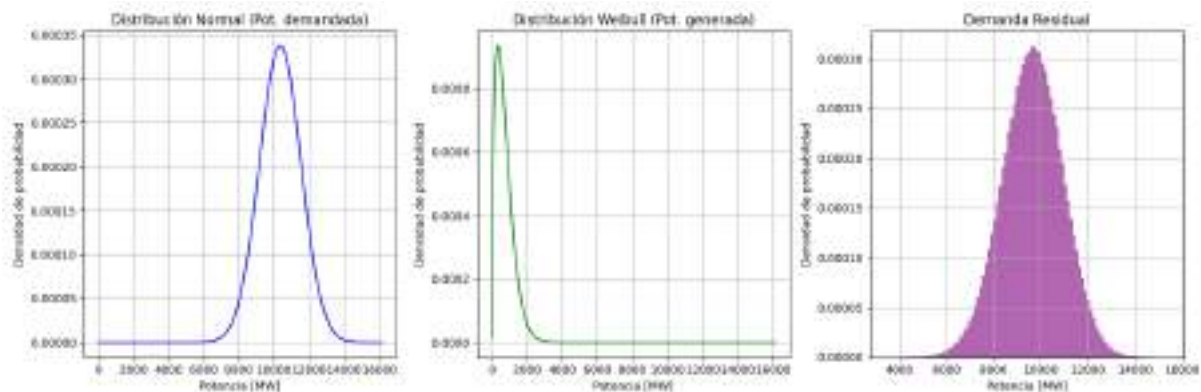


Figura 3: Gráficas de densidad de probabilidad, mes de julio región Buenos Aires, análisis energía eólica.

**Procedimiento de cálculo**

Luego de ajustar individualmente las distribuciones, se procedió a transformarlas en distribuciones acumuladas para facilitar la aplicación del método (Figuras 4 y 5). Las constantes  $R_1$  y  $R_2$  representan valores de potencia correspondientes al cuantil asociado al nivel de confiabilidad establecido. En este caso, se adoptó una confiabilidad de  $\alpha = 0.99$ . En la Tabla 2 se muestra la potencia instalada para cada fuente (solar y eólica) por región.

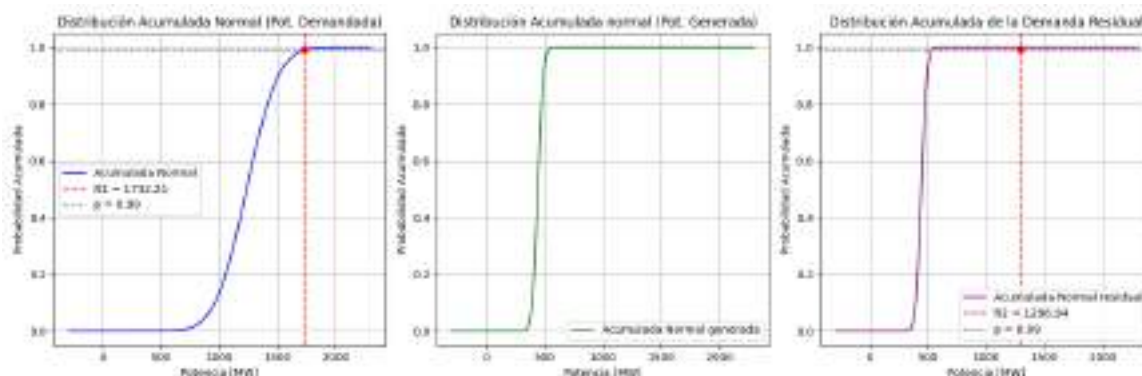


Figura 4: Gráficas de distribución acumulada, mes de enero región Cuyo.

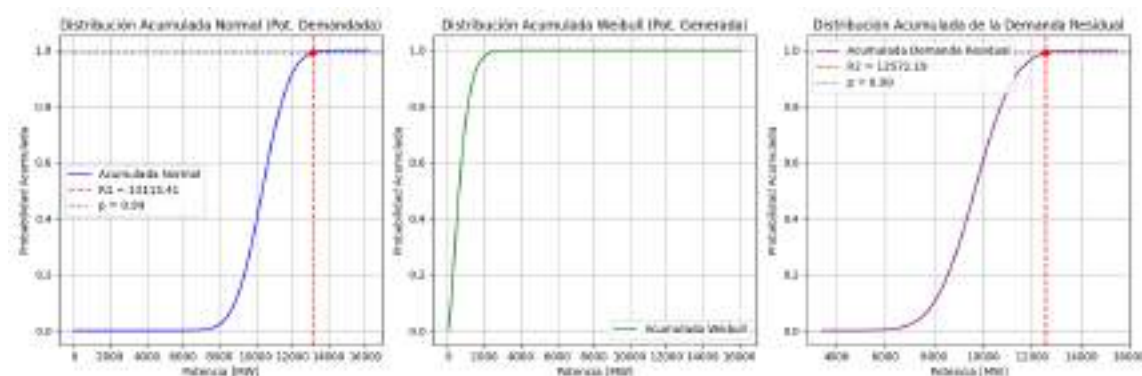


Figura 5: Gráficas de distribución acumulada, mes de julio región Buenos Aires.

En la Tabla 2 se muestra la potencia instalada para cada fuente (solar y eólica) por región.

Tabla 2: Resumen de potencia instalada por región y tipo de energía en MW.

|           | CUY | COM | NOA | CEN | BSAS | NEA | PAT  | PAÍS |
|-----------|-----|-----|-----|-----|------|-----|------|------|
| <b>FV</b> | 565 | 10  | 850 | 118 | 0    | 145 | 0    | 1688 |
| <b>EO</b> | 0   | 253 | 194 | 395 | 1821 | 0   | 1656 | 4319 |

Con la potencia instalada, y los valores de  $R_1$  y  $R_2$  obtenidos para cada una de estas regiones, se calculó el crédito de capacidad, considerando la Ecuación 4.

## RESULTADOS

A continuación, en Tabla 3 y Tabla 4, se detallan los resultados obtenidos para cada región y cada mes, correspondientes a las energías analizadas.

Tabla 3: Crédito de capacidad para energía eólica en %.

|  | Prome<br>dio | Desvío<br>estándar | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sept | Oct | Nov | Dic |
|--|--------------|--------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|
|--|--------------|--------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|

|                   |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <b>BSAS</b>       | 29,82 | 10.98 | 25,52 | 17,67 | 30,32 | 28,06 | 21,4  | 31,74 | 28,91 | 39,38 | 26,78 | 34,19 | 41,5  | 32,38 |
| <b>CEN</b>        | 22,2  | 7.46  | 19,84 | 15,32 | 21,64 | 18,41 | 14,82 | 31,74 | 17,21 | 22,03 | 26,71 | 31,89 | 38,86 | 22,23 |
| <b>COM</b>        | 21,42 | 5.57  | 18,85 | 18,97 | 25,84 | 21,74 | 17,9  | 17,41 | 12,34 | 20,72 | 29,91 | 20,68 | 32,43 | 23,7  |
| <b>NOA</b>        | 46,97 | 14.61 | 45,07 | 31,52 | 56,63 | 53,3  | 42,47 | 13,97 | 32,71 | 43,02 | 49,25 | 63,25 | 67,09 | 44,43 |
| <b>PAT</b>        | 15,1  | 6.5   | 14,52 | 15,12 | 17,6  | 13,45 | 10,8  | 34,84 | 15,75 | 10,8  | 22,88 | 15,88 | 13,85 | 16,44 |
| <b>COM + BSAS</b> | 30,66 | 7.94  | 24,97 | 19,87 | 30,75 | 29,24 | 22,89 | 14,05 | 29,09 | 38,33 | 29,22 | 34,68 | 43    | 32,98 |
| <b>PAÍS</b>       | 35,42 | 11.37 | 31    | 29,06 | 38,85 | 34,87 | 26,27 | 32,96 | 35,25 | 35,12 | 37,38 | 40,72 | 45,29 | 38,55 |

*Tabla 4: Crédito de capacidad para energía solar fotovoltaica en %.*

|             | <b>Prome<br/>dio</b> | <b>Desvío<br/>estándar</b> | <b>Ene</b> | <b>Feb</b> | <b>Mar</b> | <b>Abr</b> | <b>May</b> | <b>Jun</b> | <b>Jul</b> | <b>Ago</b> | <b>Sept</b> | <b>Oct</b> | <b>Nov</b> | <b>Dic</b> |
|-------------|----------------------|----------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|------------|------------|------------|
| <b>CEN</b>  | 19,63                | 34.54                      | 81,64      | 67,24      | 2,79       | 0,06       | 0          | 0          | 0          | 0,028      | 0,29        | 2,55       | 0,05       | 80,91      |
| <b>COM</b>  | 22,91                | 40.30                      | 93,93      | 84,62      | 4,29       | 0,01       | 0          | 0          | 0          | 0          | 0,11        | 1,56       | 0,05       | 90,37      |
| <b>CUY</b>  | 20,09                | 34.18                      | 77,04      | 74,51      | 5,63       | 0,21       | 0,0005     | 0          | 0          | 0,085      | 0,92        | 4,01       | 0,16       | 78,48      |
| <b>NOE</b>  | 19,26                | 34.80                      | 70,25      | 79,06      | 0,54       | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0           | 0,09       | 0          | 81,16      |
| <b>NOA</b>  | 19                   | 33.26                      | 73,25      | 63,4       | 3,36       | 0,23       | 0,0001     | 0          | 0          | 0,07       | 0,75        | 2,69       | 0,005      | 84,24      |
| <b>PAÍS</b> | 20,4                 | 35.89                      | 77,51      | 77,5       | 1,03       | 0,2        | 0,0002     | 0          | 0          | 0,065      | 0,73        | 3,19       | 0,06       | 84,49      |

Por otro lado, se observan en la Figura (6) y Figura (7) las gráficas “CC% vs. Potencia instalada”, para cada energía. Para un mejor desarrollo de las gráficas, la potencia instalada se normaliza en función a la demanda máxima. A su vez, en la Figura (8) y Figura (9), se detallan las gráficas “CC% vs. Potencia instalada” con respecto a los valores a nivel país.

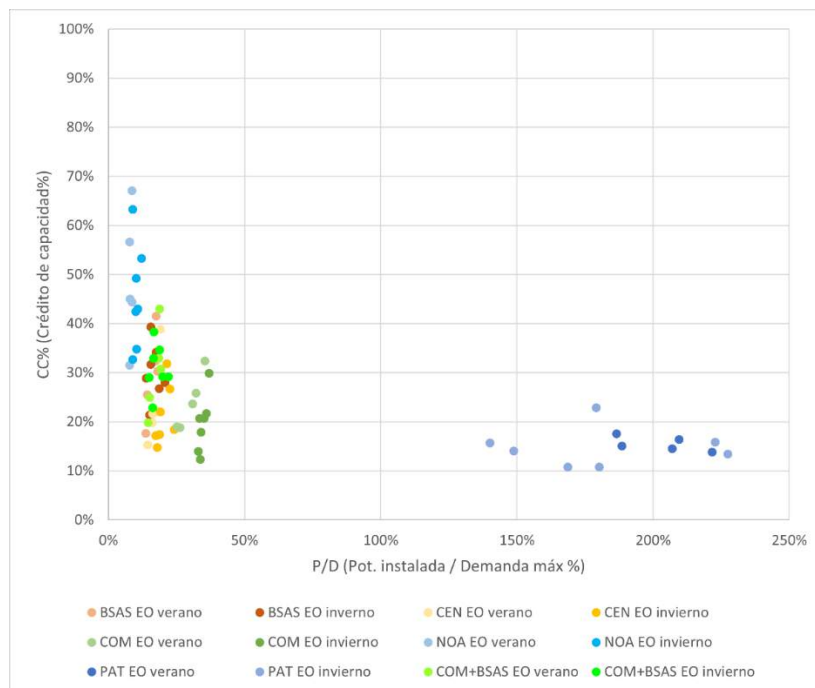


Figura 6: Gráfica del comportamiento del crédito de capacidad de la potencia eólica en función a la potencia instalada para los meses de enero a diciembre.

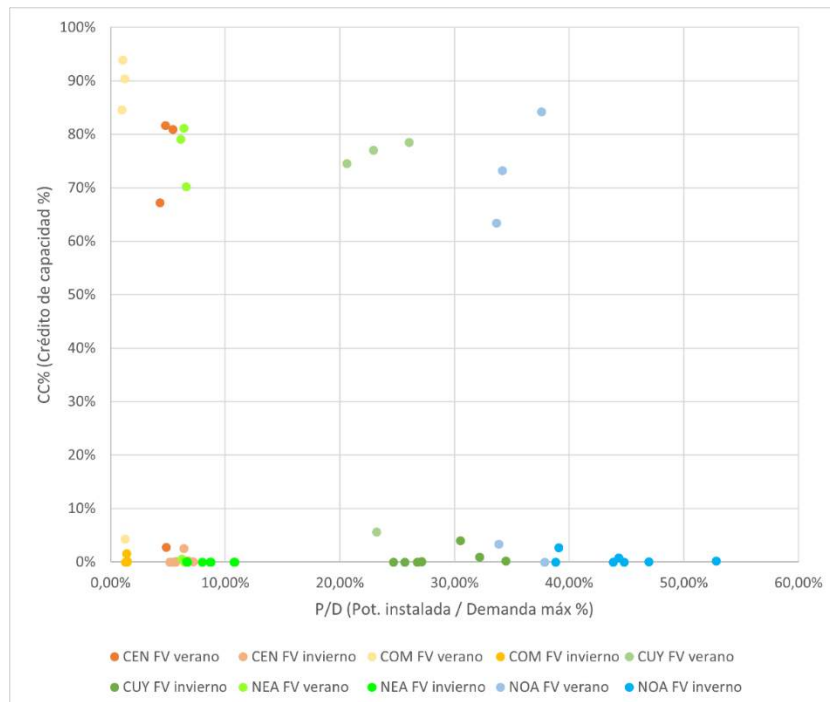


Figura 7: Gráfica del comportamiento del crédito de capacidad de la potencia solar fotovoltaica en función a la potencia instalada para los meses de enero a diciembre.



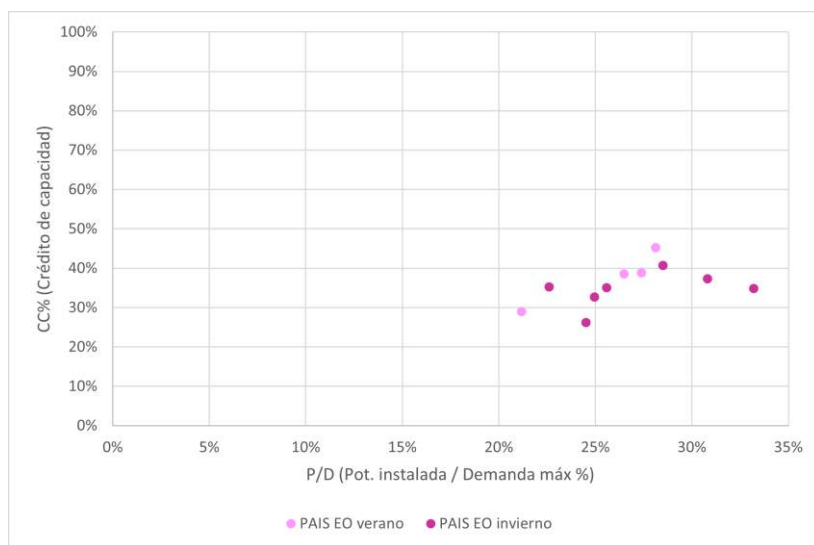


*Figura 8: Gráfica del comportamiento del crédito de capacidad de la potencia eólica en función a la potencia instalada a nivel país.*

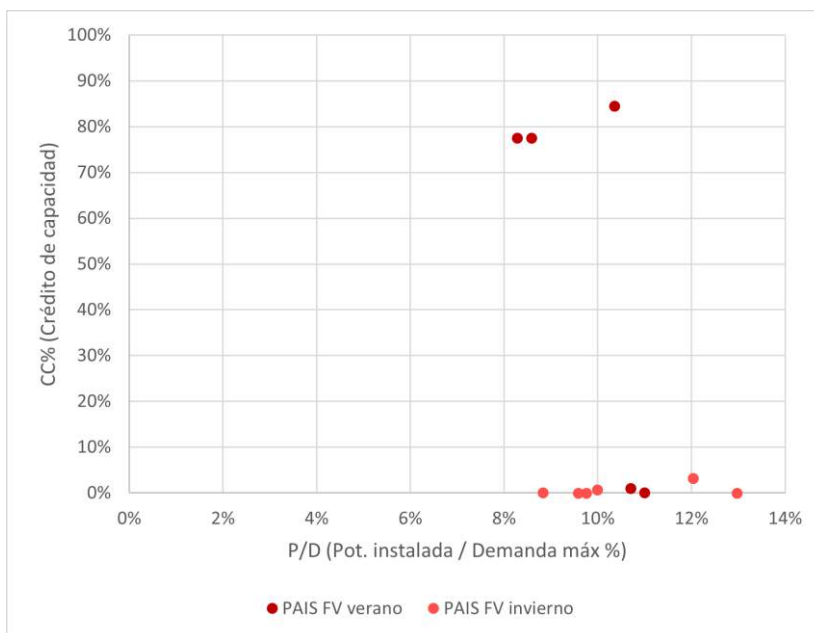


*Figura 8: Gráfica del comportamiento del crédito de capacidad de la potencia solar fotovoltaica en función a la potencia instalada a nivel país.*

Al iniciar el estudio, se indicaba que el crédito de capacidad presentaría un comportamiento exponencial decreciente respecto de la potencia instalada. Analizando los resultados obtenidos en la Figura (6) puede observarse una tendencia aproximada para el crédito de capacidad en el caso de energía eólica (EO), mientras que en la Figura (7) correspondiente a la energía solar fotovoltaica (FV), la tendencia resulta menos clara. Esta diferencia no se debe a la variabilidad intrínseca del recurso, sino a que el método original utiliza una función matemática que genera datos continuos de potencia, mientras que en este estudio se trabajó con datos reales discretos, los cuales reflejan de manera más precisa y representativa el comportamiento verdadero de las tecnologías consideradas.

### ***Dificultades presentadas***

Si bien en una primera instancia se analizaron metodologías desarrolladas por organismos como el NREL, IRENA y la IEA, que incorporan indicadores de confiabilidad como el LOLE, LOLP o ELCC, estas no fueron finalmente utilizadas ya que los datos reales disponibles, no se ajustaban a los requerimientos de estos modelos y, por lo tanto, no garantizaba una mejora sustancial en la representatividad de los resultados, en consecuencia, se aplicó el método previamente descrito, considerado más adecuado dadas las características de los datos disponibles.

Durante el desarrollo del estudio surgieron diversas dificultades para aplicar de manera estricta el método inicialmente propuesto. Dicha metodología se fundamentaba en datos de velocidad del viento, los cuales se transformaban posteriormente en estimaciones de potencia generada, conforme a las especificaciones técnicas de los aerogeneradores (VESTAS, 2025). Sin embargo, la dispersión geográfica de las estaciones meteorológicas disponibles en el país (SMN, 2025), muchas de las cuales se encuentran alejadas de los emplazamientos reales de los parques eólicos, junto con la variabilidad introducida por las diferencias en la altura de medición respecto al eje del rotor, motivaron un ajuste en el enfoque metodológico. En lugar de estimar la generación a partir de datos meteorológicos, se optó por trabajar directamente con los registros reales de potencia generada.

Por otro lado, el método (Ferreira, Carvalho, 1998) detalla únicamente su aplicación para la energía EO. Si bien se menciona la posibilidad de extenderlo a otras fuentes renovables variables, como la energía FV, no se proporciona una guía clara sobre qué tipo de distribución estadística utilizar ni cómo modelar su comportamiento. Esto implicó la necesidad de realizar un análisis previo específico, con el fin de identificar el modelo más adecuado para representar su variabilidad y ajustar los datos de forma coherente.

## **ANÁLISIS DE RESULTADOS**

El crédito de capacidad calculado para cada fuente renovable refleja con claridad la variabilidad inherente a ambos recursos naturales. En el caso de la energía solar fotovoltaica, se evidencia una mayor dispersión en los valores, e incluso en algunos casos se observan créditos de capacidad superiores a los correspondientes a la energía eólica. Esta variabilidad se atribuye al comportamiento particular de la radiación solar, la cual presenta fluctuaciones no solo a escala mensual, sino también a lo largo del día. Por ejemplo, en los meses en que el pico de demanda ocurre alrededor de las 20 horas, el crédito de capacidad tiende a 0 %, dado que en ese horario la generación solar es prácticamente nula. En contraste, cuando la demanda máxima se presenta alrededor de las 15 horas, el crédito de capacidad aumenta considerablemente, al coincidir con el período de mayor irradiancia.

Por su parte, la energía eólica muestra un comportamiento relativamente más estable a lo largo del día, ya que depende de la velocidad del viento, la cual suele presentar, comparativamente, menor variabilidad horaria, aunque sí puede experimentar fluctuaciones significativas a lo largo del año.

Este comportamiento se observa con mayor claridad en las Tablas 3 y 4, donde se presentan los promedios mensuales del crédito de capacidad por región, junto con su desvío estándar. Es decir, para los meses en los que el pico de demanda ocurre en momentos sin generación, un crédito de capacidad del 0% refleja que la energía solar FV no puede considerarse para cubrir dicho pico. Por el contrario, en los meses en los que la generación coincide con el pico de demanda, un crédito de capacidad, por ejemplo, del 81,64% para la fuente FV o del 19,84% para la fuente EO, en el mes de enero en la región CENTRO, indica que dichas tecnologías pueden aportar ese porcentaje de su potencia instalada para atender la demanda en ese momento crítico, con la confiabilidad considerada.

## CONCLUSIONES

Como conclusión, se puede destacar que el análisis desarrollado muestra de manera clara el impacto de la variabilidad de los recursos renovables en la generación de energía eléctrica para el adecuado abastecimiento de la demanda. Aunque se evidencian diferencias entre el comportamiento teórico esperado y los resultados obtenidos en base a datos reales. Según el marco metodológico, se anticipaba una curva exponencial decreciente para cada tecnología, en la cual el crédito de capacidad disminuye a medida que aumenta la potencia instalada, hasta alcanzar una asíntota que representa un valor límite. Sin embargo, esta forma idealizada no se reflejó con precisión con los datos reales.

Para la energía eólica, si bien se identificó una tendencia decreciente general del crédito de capacidad al incrementarse la potencia instalada, la dispersión de los datos impidió identificar con claridad la estabilización asintótica esperada. Para la energía solar fotovoltaica, la discrepancia con la situación teórica es aún mayor, ya que no se muestra un comportamiento decreciente definido ni se alcanza a generar una estabilización en los valores. Estas diferencias entre el comportamiento teórico y los resultados obtenidos reflejan las limitaciones del modelo cuando se trabaja con datos reales discretos, que reflejan el verdadero comportamiento del sistema.

No obstante, se considera que los valores obtenidos de crédito de capacidad son representativos y confiables, ya que, a pesar de no seguir con exactitud la curva teórica, se mantienen dentro de los rangos esperados y aceptados. Asimismo, ampliar el rango temporal de los datos de energía generada en futuros análisis permitiría obtener estimaciones más robustas y con mayor relevancia estadística sobre el comportamiento del crédito de capacidad.

Estos resultados remarcen la importancia de considerar no solo la cantidad de energía eléctrica generada por las fuentes renovables, sino también la simultaneidad de esta generación con las curvas de demanda. Para lograr una planificación energética efectiva, es clave evaluar el crédito de capacidad en función de esta simultaneidad entre el comportamiento horario, diario y mensual de la demanda y de los recursos renovables.

Se destaca la importancia de adaptar el uso del crédito de capacidad al contexto específico del análisis. En ciertos estudios puede ser más apropiado emplear valores desagregados por región y mes, mientras que, en otros, el uso de un promedio —simple o ponderado según la demanda máxima— puede ser suficiente, aunque con menor precisión. Esta flexibilidad permite ajustar las herramientas de planificación energética a diferentes escalas y necesidades del sistema.

Finalmente, la determinación del crédito de capacidad no solo es clave para una mejor planificación de la expansión del sistema eléctrico, sino también para contar con una representación más precisa de la matriz energética nacional. Asignar un valor de CC distinto de cero a las energías renovables evita sobredimensionar innecesariamente el sistema con el agregado de centrales térmicas. Esto no solo permite optimizar inversiones en infraestructura, sino que también contribuye a la reducción del impacto ambiental y de las emisiones de gases de efecto invernadero, en línea con los compromisos asumidos por la Argentina en los últimos años.

En este sentido, resulta evidente que la mejora en la disponibilidad y calidad de los datos constituye un factor clave para fortalecer el análisis del crédito de capacidad en energías renovables. Si bien este estudio no profundiza en aspectos regulatorios, futuras investigaciones podrían explorar cómo los marcos normativos y de planificación energética pueden contribuir a garantizar el relevamiento sistemático de la información necesaria.

## FUENTES DE FINANCIAMIENTO

El trabajo presentado en este documento fue realizado en el marco de una Beca de Estímulo a las Vocaciones Científicas del Consejo Interuniversitario Nacional (CIN) y contó con el apoyo del Centro de Tecnologías Ambientales y Energía de la Facultad de Ingeniería de la UNICEN.

## NOMENCLATURA

$\alpha$ : Confiabilidad.  
BSAS: Región Buenos Aires.  
CC: Crédito de capacidad. [%]  
CEN: Región Centro.  
COM: Región Comahue.  
CUY: Región Cuyo.  
D: Potencia demandada. [MW]  
EO: Eólica.  
ELCC: Effective load carrying capability  
FV: Fotovoltaica.  
G: Potencia generada. [MW]  
GEI: Gases de efecto invernadero.  
LOLE: Expectativa de pérdida de carga.  
LOLP: Probabilidad de pérdida de carga.  
MEM: Mercado a término mayorista.  
NEA: Región Noreste.  
NOA: Región Noroeste.  
PAT: Región Patagonia.  
R: Potencia fuentes convencionales. [MW]

## REFERENCIAS

- CAMMESA (2025). *Parte post-operativo*. En CAMMESA. Recuperado de <https://cammesaweb.cammesa.com/parte-post-operativo/> el 17 de junio de 2025.
- CAMMESA (2025). *Informes y estadísticas*. En CAMMESA. Recuperado de <https://cammesaweb.cammesa.com/informes-y-estadisticas/> el 17 de junio de 2025.
- Estudios Energéticos Consultores & Autoridad Nacional de los Servicios Públicos (ASEP). (2019). Consultoría para la revisión del cálculo de la potencia firme de las centrales de generación conectadas al Sistema Interconectado Nacional (Informe final) (Informe N.º R1101-16). Estudios Energéticos Consultores.
- Ferreira, L. A. F. M., & Carvalho, P. M. S. (1999, January). Capacity credit for renewable energy resources. In IEEE Power Engineering Society. 1999 Winter Meeting (Cat. No. 99CH36233) (Vol. 1, pp. 471-475). IEEE.
- Gutiérrez, A. D. (2014). Contribución de la energía solar fotovoltaica a la fiabilidad del sistema eléctrico. (Doctoral dissertation, Universidad Carlos III de Madrid).
- Ibáñez, E., & Milligan, M. (2014, July). Comparing resource adequacy metrics and their influence on capacity value. In 2014 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS) (pp. 1-6). IEEE.
- Illana, J. (2013). I.: Métodos Montecarlo. Departamento de física teórica y del cosmos universidad de granada. 26. Ene.

- IRENA, L. (2017). *Planning for the renewable future: Long-term modelling and tools to expand variable renewable power in emerging economies*. 2021-02-02]. <https://xueshu.baidu.com/usercenter/paper/show>.
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN) (2025). Descarga de datos. En Servicio Meteorológico Nacional. Recuperado de <https://www.smn.gob.ar/descarga-de-datos> el 17 de junio de 2025.
- Tuller, S. E., & Brett, A. C. (1984). The characteristics of wind velocity that favor the fitting of a Weibull distribution in wind speed analysis. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 124-134.
- Vestas (2025). V150-4.5 MW – 4 MW Platform. En Vestas. Recuperado de <https://www.vestas.com/en/energy-solutions/onshore-wind-turbines/4-mw-platform/v150-4-5-mw> el 17 de junio de 2025.

## **ANALYSIS OF CAPACITY CREDIT FOR ELECTRICITY GENERATION FROM RENEWABLE ENERGIES IN THE ARGENTINE ELECTRICITY MATRIX**

**ABSTRACT:** Given the increasing integration of intermittent renewable power in the current electricity generation matrix and in future scenarios aiming for a greenhouse gas emissions (GHG) free matrix, it becomes essential to establish methodologies capable of predicting whether there will be sufficient energy to meet hourly demand throughout the year.

The metric used to determine the capacity of a power plant to reliably supply demand is the capacity credit. This factor depends on numerous variables such as technology type, geographical location, the share of that technology in the generation mix, and demand patterns, among others. Therefore, determining this factor is of vital importance for both regional or national energy sector planning and the daily operation of the power generation fleet.

Various methodologies have been proposed to estimate the capacity credit of intermittent renewable energies, most of them based on statistical and probabilistic approaches. This study proposes the application of such methods to calculate the capacity credit of renewable energy generation under different levels of penetration within the Argentine electric power system.

**Keywords:** solar energy, wind power energy, capacity credit, confiability, variable generation.

## EVALUACIÓN COMPARATIVA DEL DESARROLLO DEL HIDRÓGENO VERDE EN LATINOAMÉRICA

Ernesto Coutsiers<sup>1,2</sup>, Marcelo Gea<sup>3</sup>, Ramiro Rodríguez<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup> Calden Consultoría SRL

Av. Padre Mariani 478, Villa Allende (5105), Provincia de Córdoba

[www.caldenconsultoria.com](http://www.caldenconsultoria.com) +54 351 7000717, [ecoutsiers@caldenconsultoria.com](mailto:ecoutsiers@caldenconsultoria.com)

<sup>2</sup> Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de Salta

Av. Bolivia 5150, Salta (4408), Provincia de Salta

[www.exactas.unsa.edu.ar](http://www.exactas.unsa.edu.ar) +54 387 4255408, [ecoutsiers@exa.unsa.edu.ar](mailto:ecoutsiers@exa.unsa.edu.ar)

<sup>3</sup> Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Universidad Nacional de Salta

Av. Bolivia 5150, Salta (4408), Provincia de Salta

[www.inenco.unsa.edu.ar](http://www.inenco.unsa.edu.ar) +54 387-4255424, [geam@unsa.edu.ar](mailto:geam@unsa.edu.ar)

<sup>4</sup> Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba,

Av. Vélez Sarsfield 299, Córdoba (5000), Córdoba

[www.fcefyn.unc.edu.ar](http://www.fcefyn.unc.edu.ar) +54 351 5353800, [ramiro.rodriguez@unc.edu.ar](mailto:ramiro.rodriguez@unc.edu.ar)

**RESUMEN:** Este trabajo analiza el desarrollo de la economía del hidrógeno verde en seis países de Latinoamérica: Argentina, Brasil, Chile, Colombia, México y Perú. El objetivo es contrastar su progreso en marcos regulatorios, proyectos e incentivos, y evaluar la viabilidad económica de la cadena de valor del hidrógeno verde. La metodología se basa en el Índice H2LAC 2024, que evalúa cinco categorías clave: políticas y regulaciones, proyectos, economía local, aplicaciones y acuerdos internacionales. La puntuación final refleja el progreso promedio de estas áreas hacia una economía de hidrógeno ideal de 100 puntos. Los resultados muestran una gran heterogeneidad. Chile (73,25%), Brasil (72,75%) y Colombia (72,5%) lideran el desarrollo, mientras que Argentina (51%), Perú (44%) y México (35,5%) se encuentran rezagados. Argentina, a pesar de su potencial, enfrenta costos elevados en las etapas intensivas en capital. Se concluye que, si bien los recursos renovables son una ventaja natural, las políticas de incentivo y un marco regulatorio estable son cruciales para atraer inversiones y catalizar el despliegue del hidrógeno verde a gran escala en la región.

**Palabras clave:** Hidrógeno verde, Latinoamérica, costo nivelado, riesgo país, transición energética.

### INTRODUCCIÓN

El desarrollo del hidrógeno verde (H2V) está experimentando en la actualidad un impulso global de importancia. Esto es consecuencia de dos causas: la primera, los objetivos gubernamentales de descarbonización (que pueden ser efecto de compromisos políticos internacionales o Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional - NDC) y la posibilidad de aprovechar la amplia disponibilidad de recursos para generación de energía renovable a bajo costo que ostentan diferentes regiones para convertirse en proveedoras globales (Cheekatamarla, 2024).

Los informes de la Agencia Internacional de Energía indican que la demanda mundial de hidrógeno alcanzó 97 Mt en 2023, principalmente para refinación y química, y que ésta se cubrió con hidrógeno producido a partir de combustibles fósiles (IEA, 2024). El hidrógeno de bajas emisiones fue marginal, pero se espera un crecimiento significativo. La producción global de hidrógeno podría alcanzar 49 Mt para 2030, gracias a proyectos de electrólisis y tecnologías con Captura, Uso y Almacenamiento de



Carbono (CCUS por sus siglas en inglés). A pesar de que la producción de proyectos con decisión de inversión final se ha duplicado (3,4 Mt/año), alcanzar la meta de 2030 requerirá un crecimiento anual superior al histórico de la energía solar. La materialización de estos proyectos enfrenta importantes obstáculos como la falta de claridad en la demanda, dificultades financieras, demoras en los incentivos y desafíos regulatorios y de permisos, lo que ha provocado retrasos y cancelaciones (Sakib et al., 2024).

El desarrollo del H2V en América Latina y el Caribe enfrenta desafíos debido a que su cadena de valor es intensiva en capital y requiere inversiones a muy largo plazo. Por lo tanto, las políticas y planes en la región se centran en la reducción de riesgos para atraer y asegurar la inversión.

De esta manera, a partir de normas, planes e incentivos, los estados de la región intentan reducir el riesgo país, proveer infraestructura soporte y garantizar los marcos normativos y regulatorios del sector (O'Rourke et al, 2023). En consecuencia, se desarrolla en cada estado una “ruta de hidrógeno” o “estrategias de desarrollo” que involucran la expectativa de creación de una ley de hidrógeno<sup>1</sup> con incentivos administrativos y fiscales, se desarrollan alianzas con países con tecnología más desarrollada en el área y que (particularmente) resultan ser off takers<sup>2</sup> y planes de desarrollo para la infraestructura requerida: sistemas de transmisión eléctrica, puertos, carreteras y vías ferroviarias, entre otros. Así, los diferentes países compiten para ofrecer las mejores condiciones que pueden verse reflejadas en menores costos nivelados y, por lo tanto, mejores condiciones de competitividad (Hydrogen Council, 2022).

Este trabajo ofrece un análisis comparativo del desarrollo del H2V en seis países de Latinoamérica: Argentina, Brasil, Chile, Colombia, México y Perú, seleccionados por la relevancia de su economía en la región que los coloca como referencias. El objetivo es analizar los contrastes de desarrollo entre estos países, los desafíos que enfrentan y sus estrategias. La comparación se realiza tomando como base el Índice 2024 H2LAC, que analiza la evolución de la economía del hidrógeno en la región y, adicionalmente, se presenta una evaluación de la viabilidad económica de la cadena de valor del H2V mediante la cuantificación de sus costos nivelados.

## METODOLOGÍA

### *Índice de hidrógeno*

El Índice 2024 H2LAC analiza la evolución de la economía del hidrógeno renovable y de bajas emisiones en América Latina y el Caribe (2021-2024), examinando cinco categorías clave: *políticas y regulaciones, proyectos, economía local del hidrógeno, aplicaciones y planificación/acuerdos internacionales* (H2LAC, n.d.). La metodología consistió en encuestar a más de 60 representantes gubernamentales, expertos en hidrógeno (públicos y privados) y de organizaciones internacionales. La información colectada se procesó, analizó y se validaron sus respuestas contrastándolas con datos adicionales de cada país (Hinicio-Newenergy, 2024). La Tabla 1 describe las dimensiones de las 5 áreas clave que componen el índice H2LAC.

La calificación final refleja el progreso promedio ponderado de las cinco áreas clave hacia una economía de hidrógeno ideal (100 puntos). De este modo, un gran número de proyectos no asegura una buena puntuación si la regulación y el ecosistema no están suficientemente desarrollados. Un puntaje perfecto indica una economía de hidrógeno madura con regulación sólida, objetivos definidos, un ecosistema dinámico, múltiples proyectos en diversos sectores y acuerdos comerciales internacionales fuertes.

---

<sup>1</sup> En Latam hasta el presente sólo hay una la Ley de Hidrógeno Bajo en Carbono (Ley 14948/2024), aprobada en Brasil.

<sup>2</sup> *Off takers*: entidad compradora del hidrógeno o su derivado.



*Tabla 1: Dimensiones de las 5 áreas clave que componen el índice H2LAC*

| Área Clave |                                                                                           | Descripción de la dimensión                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| A          | Políticas públicas, incentivos y regulaciones a nivel nacional respecto al H <sub>2</sub> | Cubre el desarrollo del marco regulatorio, beneficios fiscales e integración del H <sub>2</sub> dentro de los planes nacionales de desarrollo. También abarca la presencia de hojas de ruta del hidrógeno, así como el establecimiento de esquemas de certificación y/o directrices en torno a la certificación en el país.                                     |
|            | Nivel de desarrollo del ecosistema H <sub>2</sub> a nivel nacional                        | Evalúa varios factores, incluyendo la variedad de métodos de producción de H <sub>2</sub> considerados, la existencia de estudios o proyecciones que determinen el potencial de generación y consumo de H <sub>2</sub> , la disponibilidad de financiamiento para I+D, la existencia de asociaciones relevantes y eventos especializados en torno al hidrógeno. |
| C          | Número de proyectos de hidrógeno renovable en operación o en desarrollo                   | Se centra en mapear la cantidad de proyectos de H <sub>2</sub> renovable en operación y en desarrollo dentro del país.                                                                                                                                                                                                                                          |
| D          | Áreas de aplicación y penetración actual del H <sub>2</sub> renovable a nivel nacional    | Evalúa la demanda nacional actual de H <sub>2</sub> renovable/bajo en carbono dentro del país para aplicaciones en transporte y movilidad, energía y almacenamiento, uso industrial y generación para exportación.                                                                                                                                              |
| E          | Nivel de cooperación internacional y planificación de exportación de H <sub>2</sub>       | Evalúa el nivel de compromiso del país con otras naciones en torno al comercio de hidrógeno a través de los acuerdos firmados y de la aspiración de posicionarse como un hub energético de H <sub>2</sub> en la región LAC y/o para mercados de exportación extranjeros.                                                                                        |

## RESULTADOS

### ***Análisis comparativo del desarrollo del H2V en América Latina y El Caribe.***

El hallazgo principal del análisis comparativo, respaldado por el Índice H2LAC 2024, es la marcada heterogeneidad en el avance entre los países. Chile (73,25%), Brasil (72,75%) y Colombia (72,5%) lideran el desarrollo, mientras que Argentina, Perú y México se encuentran por detrás con puntuaciones de 51%, 44% y 35,5% respectivamente. Esta brecha no solo se manifiesta en el número de proyectos, sino, crucialmente, en la madurez de sus marcos regulatorios, políticas de incentivos, desarrollo de ecosistemas locales y planificación para la exportación. La interrelación entre estos hallazgos es fundamental: los países con marcos regulatorios y de incentivos más avanzados (Área A del índice) son consistentemente los que exhiben un mayor número de proyectos (Área C) y una planificación más sólida para la exportación (Área E). Esto subraya que la sola existencia de abundantes recursos renovables, una ventaja natural de la región no es suficiente para impulsar el desarrollo del H2V, sino que se requiere de un entorno propicio creado activamente por el gobierno.

### ***Descripción por país de los seis países referenciales de Latinoamérica***

**Argentina.** La investigación sobre el uso de hidrógeno como vector energético en Argentina se remonta a finales de los años 90 donde en algunos centros de investigación ya se estudiaban la producción, las aplicaciones y el almacenamiento del gas. En particular se destacan las actividades del laboratorio de hidrógeno del Centro Atómico Bariloche (Zorrero, 2021).

Por iniciativa del Dr. José Podestá de la Universidad Nacional de la Plata y durante el Seminario de hidrógeno llevado a cabo en la ciudad de Buenos Aires, el 7 de junio de 1996 se fundó la Asociación Argentina del Hidrógeno AAH. Desde aquel entonces su presidente es el Dr. Juan Carlos Bolcich. Desde mayo de 1998 la AAH edita, bajo la dirección del ingeniero José Luis Aprea la revista Hidrógeno, que constituye la primera publicación del mundo dedicada al vector energético y sus tecnologías en idioma español, que puede descargarse del sitio web [www.aah2.org](http://www.aah2.org) (Revista Hidrógeno, n.d.).

En el año 2002 como resultado de un acuerdo firmado entre la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) y la Secretaría de Energía del país, se crea el Instituto de Energía y Desarrollo Sustentable (IEDS) de Argentina, con el propósito de promover la investigación y el desarrollo en el área de energía y sustentabilidad, enfocándose en fuentes limpias y renovables. En el año 2005 el IEDS crea HYFUSEN (Hidrógeno y Fuentes Sustentables de Energía), un congreso bianual, con el objetivo de promover el desarrollo nacional y la integración regional de sistemas energéticos basados en energías renovables y

el hidrógeno, impulsado por el Dr. Daniel M. Pasquevich, director del IEDS y presidente de la Organización (DGCyE, 2024).

La primera Ley de Promoción del Hidrógeno fue sancionada en 2006 (Ley N° 26.123) y, si bien caducó a fines de 2021 por falta de reglamentación, alentó numerosos estudios sobre la factibilidad técnica y económica de producir y aplicar estas tecnologías en el país.

En el año 2014, Sigal et al. realizaron un análisis detallado del potencial de producción de hidrógeno a partir de tres fuentes renovables principales (energía eólica, solar y biomasa) en Argentina. La investigación destaca que cada provincia del país cuenta con al menos un departamento donde el potencial de producción de hidrógeno renovable supera en diez veces sus necesidades de consumo de combustible. Finalmente, Argentina podría producir casi mil millones de toneladas métricas anuales de hidrógeno a partir de las fuentes renovables mencionadas. Este es el mismo potencial estimado para Estados Unidos, un país con una superficie 3,5 veces mayor que la de Argentina (Sigal et al., 2014).

En septiembre de 2023, Argentina presentó la "Estrategia Nacional para el Desarrollo de la Economía del Hidrógeno" (ENH) con metas hasta 2050. Resultado de la Mesa Intersectorial del Hidrógeno y precedida por el documento "Hacia una estrategia nacional de Hidrógeno 2030", la ENH establece directrices para el desarrollo del hidrógeno de bajas emisiones como vector energético e insumo industrial. Busca promover la sostenibilidad ambiental y el desarrollo económico mediante infraestructura, producción y puertos, posicionando al país como proveedor internacional. Sus tres ejes son desarrollo tecnológico y productivo, uso de diversas tecnologías de producción y despliegue de la demanda interna y exportación, con una meta de al menos 5 millones de toneladas anuales de producción doméstica para 2050 (Gobierno de Argentina, 2023).

Argentina cuenta con la Planta Experimental Pico Truncado en Santa Cruz, dedicada a capacitación y pruebas tecnológicas, y la Planta Piloto Hychico en Chubut, operativa desde 2008, que produce hidrógeno verde de alta pureza con electrolizadores, almacenamiento y pruebas de mezcla con gas natural. Las capacidades nucleares, como el proyecto CAREM, permiten la producción de hidrógeno "rosa". Actualmente, Hychico es la única planta operativa, con 120 Nm<sup>3</sup>/h de hidrógeno y 60 Nm<sup>3</sup>/h de oxígeno. Se exploran colaboraciones con Chile para transporte, pero la limitada cantidad de plantas destaca la necesidad de escalar proyectos y atraer inversión.

En 2025, el gobierno nacional impulsa cuatro leyes energéticas para dar continuidad a sectores beneficiados por incentivos previos (biocombustibles y renovables). El paquete incluye un Régimen de Incentivo a las Grandes Inversiones (RIGI) específico para el desarrollo del hidrógeno y una ley para certificar emisiones de carbono, buscando adaptar al país a las normativas ambientales internacionales para potenciar la exportación de petróleo, gas licuado, cobre y litio.

La Figura 1 muestra esquemáticamente la evolución de la economía del hidrógeno en Argentina. La Estrategia Nacional resalta que el país cuenta con ventajas naturales y desarrolladas que lo posicionan como un productor competitivo de hidrógeno de bajas emisiones (verde, azul y rosa) para los mercados interno e internacional, favoreciendo un despliegue territorial sólido y arraigado.

Para 2050 se proyecta una producción mundial de 500 Mt de hidrógeno de bajas emisiones, de las cuales 415 Mt serán para consumo local y 85 Mt para comercio a larga distancia. Argentina apunta a aportar 4 Mt anuales, cubriendo el 5 % del mercado internacional de largo plazo, aprovechando sus recursos naturales, capacidades industriales y científicas para desarrollar su mercado interno y las cadenas de valor asociadas.

**Brasil.** Hasta 2022, la demanda de hidrógeno en Brasil (87 %) provenía principalmente de las industrias petroquímica y de fertilizantes, usando reformado de gas natural sin captura de carbono. Con el Programa Nacional del Hidrógeno (PNH2) y el plan del CNPE 2023-2025, el país inició una transición hacia hidrógeno bajo en carbono, impulsando la descarbonización, el abastecimiento de sectores difíciles de descarbonizar (acero, aviación, transporte de carga) y la exportación de energía renovable.

La EPE, junto al programa británico BEP, publicó estudios sobre hidrógeno gris, turquesa y azul, sentando las bases para la legislación del sector (Calixto E. y Salgado V., 2024).

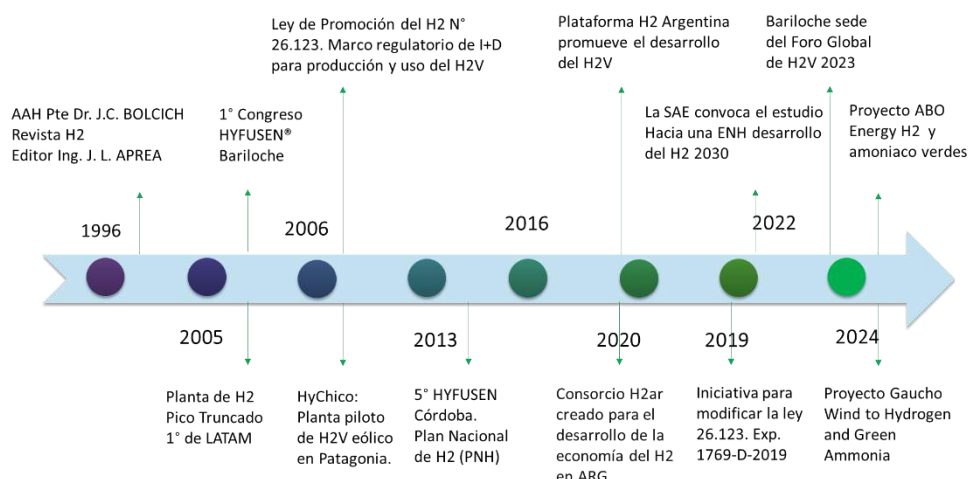


Figura 1: Línea de tiempo del desarrollo del hidrógeno en Argentina (elaboración propia).

En 2023, la cartera de proyectos de hidrógeno bajo en carbono en Brasil se estimó en 30.000 MM USD, muchos desarrollándose como centros de hidrógeno integrados a la infraestructura portuaria en zonas francas industriales (Mega Trends & Analysis, 2023). La región Nordeste concentra más del 58% del potencial de producción, gracias a sus vastos recursos renovables. Petrobras lidera la producción de hidrógeno azul con al menos dos proyectos de captura, utilización y almacenamiento de carbono en refinerías. Además, en el último año se anunciaron proyectos de hidrógeno bajo en carbono integrados en diversas industrias como cementeras, vidrieras y siderúrgicas.

En agosto de 2024 se promulgó la Ley 14948, que crea un marco legal para producir, procesar, almacenar, transportar, comercializar y exportar hidrógeno de bajas emisiones de carbono, bajo supervisión de la ANP, que emitirá regulaciones complementarias (ANP, 2024). La norma promueve proyectos con incentivos fiscales desde enero de 2025 e incorpora un sistema de certificación. En septiembre de 2024 se presentó además el Programa para el Desarrollo del Hidrógeno de Bajas Emisiones de Carbono (Ley 14990).

El proyecto H2Brasil apoya la expansión del mercado de hidrógeno verde en Brasil como elemento clave para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y contribuir a la descarbonización de la economía brasileña. El primer proyecto piloto en Brasil para la producción de combustible de aviación sostenible (SAF) se encuentra en Rio Grande do Norte, resultado de una asociación entre Brasil y Alemania. Petrobras construye su primera planta piloto en Brasil para la producción de hidrógeno renovable en Rio Grande do Norte, utilizando energía solar que deberá estar operativa en 2026. El proyecto de vehículo de hidrógeno verde de Neoenergía desarrolla, desde 2022, la primera estación de servicio de hidrógeno verde en Brasil, utilizando una planta fotovoltaica dedicada y la Universidad de São Paulo (USP) puso en marcha la primera estación experimental del mundo dedicada a la producción de hidrógeno renovable a partir de etanol (Ministério de Minas e Energia, 2023). La Figura 2 representa una línea de tiempo que muestra esquemáticamente para la evolución de la economía en Brasil.

**Chile.** Es líder en el mercado de H2V en Latinoamérica y cuenta con una planificación energética de largo plazo 2023-2027 (H2news, 2022), abierta a la planificación ciudadana, y con una Estrategia Nacional de H2V, que en su sección 5 “Plan de Acción”, en lo referente a normativa, seguridad y pilotaje se compromete a:

- Desarrollar la regulación y normativa del H2V para resguardar aspectos de seguridad y dar certeza a los inversionistas.
- Establecer un equipo operativo para acompañar la tramitación de permisos y el desarrollo de pilotajes de H2V y sus derivados.

- Revisar la regulación y la infraestructura del gas natural para promover la introducción de cuotas de H2V.

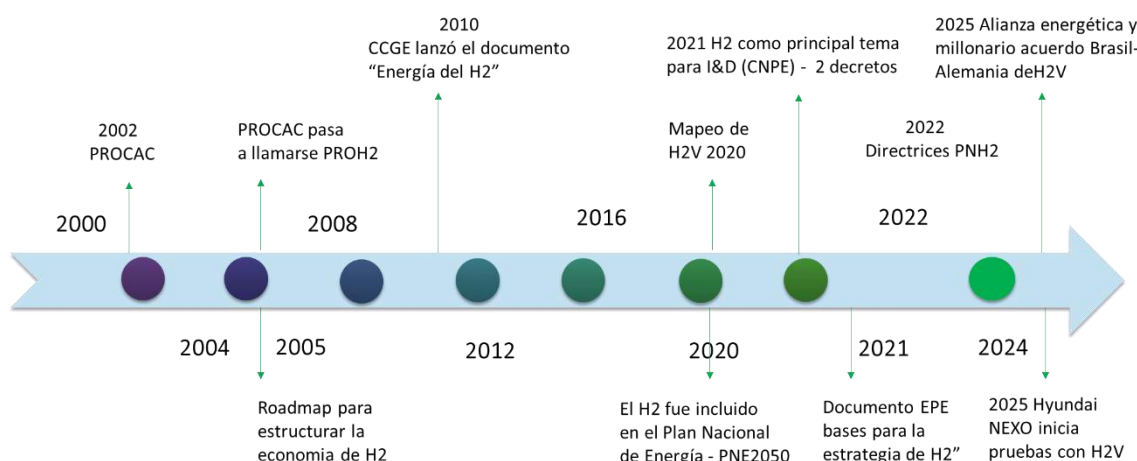


Figura 2: Línea de tiempo del desarrollo del hidrógeno en Brasil (elaboración propia).

El Plan de Acción 2023-2030 de H2V, tendiente a definir la hoja de ruta, tuvo consulta pública, que finalizó en febrero de 2024. Los detalles y resultados de esta consulta fueron:

- El proceso de consulta pública comenzó el 22/12/2023 y finalizó el 13/02/2024.
- La consulta contó con la participación de la ciudadanía, organizaciones de la sociedad civil y representantes del sector privado. Se recibieron cerca de 1900 sugerencias y observaciones.
- El Ministerio de Energía revisó, evaluó y ponderó las observaciones recibidas.
- Las observaciones que se acogieron se integraron a la versión final del Plan de Acción.

Este Plan de Acción de H2V busca contribuir con la descarbonización energética nacional para alcanzar la meta legal de un país carbono neutral y resiliente antes del 2050. Junto a ello, y aprovechando la extensa cadena de valor del hidrógeno, se busca industrializar la economía nacional mediante una reconversión productiva y laboral en los distintos territorios del país, en el contexto de una transición energética acelerada y justa, acompañando el recambio de industrias contaminantes hacia industrias sostenibles (Gob. de Chile, 2023).

El Servicio de Evaluación Ambiental de Chile (SEA, 2025) informa que, hasta agosto de 2025, se han ingresado 18 proyectos relacionados con la cadena de valor del hidrógeno verde. De ellos, 6 están aprobados en Antofagasta, Magallanes y Antártica Chilena y Valparaíso, con una inversión de 954 MM USD; 7 están en calificación por 41.253 MM USD; 4 fueron desistidos y 1 no admitido.

El proyecto Haru Oni en Magallanes, desarrollado por HIF Global junto a Porsche, Siemens Energy y Enel, es la primera planta de e-combustibles operativa del mundo. Utiliza energía eólica y electrólisis para generar hidrógeno verde, captura CO<sub>2</sub> biogénico y lo combina con hidrógeno para producir e-combustibles como e-Gasolina y e-LG, permitiendo una infraestructura de combustibles baja en carbono mediante el reciclaje continuo de CO<sub>2</sub> (HIF, 2022).

En la Minera San Pedro, en la Región Metropolitana, se lleva a cabo el proyecto piloto de hidrógeno verde (H2V) que tiene como objetivo proporcionar energía limpia al campamento minero y servirá de plataforma para probar y validar nuevas tecnologías en operaciones mineras. La planta cubre toda la cadena de valor del hidrógeno y servirá como un centro de formación para técnicos y profesionales en nuevas tecnologías de hidrógeno (gob.cl, 2024).

La Universidad Católica de la Santísima Concepción (UCSC) en la región del Biobío presentó la infraestructura de la primera planta de hidrógeno verde en una universidad chilena. La planta cuenta con cuatro electrolizaciones tipo AEM que permiten aumentar la potencia en caso de ser requerido y generar

hidrógeno a 35 bar, con energía renovable proveniente de la MicroRed UCSC, compuesta por paneles fotovoltaicos, para luego ser almacenado. La Figura 3 representa una línea de tiempo que muestra esquemáticamente para la evolución de la economía en Chile.

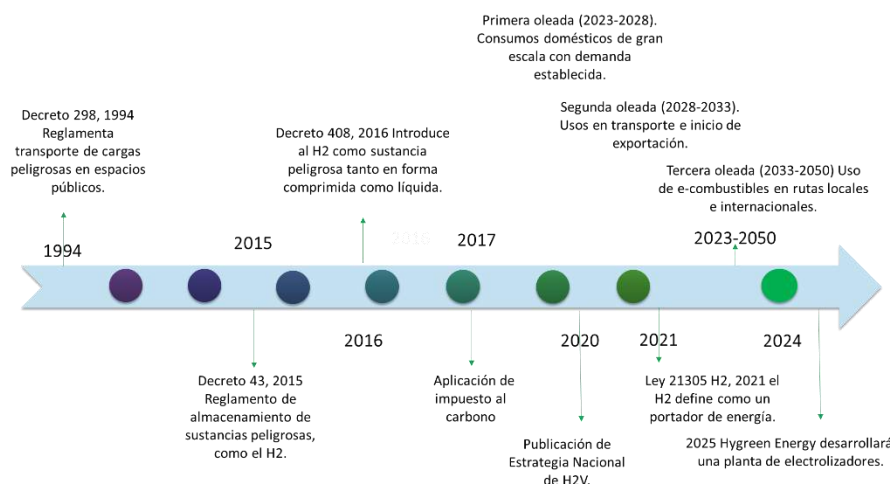


Figura 3: Línea de tiempo del desarrollo del hidrógeno en Chile. Fuente: Elaboración propia.

**Colombia.** Cuenta con una Hoja de Ruta del Hidrógeno, realizada con apoyo del BID en el año 2021, en la cual busca desarrollar e implementar hidrógeno de bajas emisiones para cumplir los compromisos del Acuerdo de París. Se basa en análisis de producción, demanda, reducción de emisiones, potencial exportador y regulación. El hidrógeno es clave para la transición energética por su versatilidad y nulas emisiones directas, siendo la producción baja en emisiones crucial para la descarbonización (gov.co, 2021).

El Ministerio de Minas y Energía de Colombia presentó un proyecto de resolución para definir los lineamientos de evaluación, exploración y posible explotación de hidrógeno geológico. El documento está en consulta pública hasta el 17 de abril de 2025, abierto a aportes de sector privado, academia y sociedad civil. Esta iniciativa fortalece el marco regulatorio para posicionar al país en el mercado de hidrógeno bajo en carbono.

Se espera que el desarrollo del hidrógeno en Colombia impulse la integración de energías renovables mediante almacenamiento, transporte y uso de infraestructura existente de gas y carbón con captura de carbono. Con planes de inversión, incentivos, regulaciones, políticas de I+D y acuerdos de cooperación, la Hoja de Ruta y la Ley 2099 de 2021 crean un marco para su adopción. Entre 2020 y 2050 se proyecta una transición: hasta 2030 predominará el hidrógeno azul; entre 2030 y 2040 coexistirán azul y verde; desde 2035 el azul podría superar al gris por el costo del CO<sub>2</sub>; y a partir de 2040 el hidrógeno verde sería la opción más competitiva en todo el país. La Figura 4 resume estas fases y costos por región (Minenergía, 2021).

En relación con los proyectos destacados, en marzo de 2022, Ecopetrol y Promigas inauguraron los dos primeros proyectos piloto de hidrógeno de bajas emisiones en Cartagena. Ecopetrol lleva a cabo un proyecto piloto de producción de hidrógeno verde en la Refinería de Cartagena, utilizando un electrolizador PEM de 50 kW alimentado por paneles solares. Por su parte Promigas, arrancó con un piloto exploratorio de producción de hidrógeno verde y blending (mezcla) con gas natural en redes de transporte y distribución, ubicado en la Estación Heroica, en la zona industrial de Mamonal.

El Fondo de Energías No Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía (Fenoge) anunció en julio de 2024 a los ganadores de la convocatoria +H2 Colombia, que se llevó a cabo para financiar los estudios de inversión de 10 proyectos para la producción y usos del hidrógeno verde y azul. El programa se enfocará en que los usos del hidrógeno sean para el transporte de carga pesada, transporte urbano, la operación de una planta siderúrgica y la comercialización de oxígeno, creando de esta manera el primer Hub de H2V en el país (Fenoge, 2023).



Figura 4: Horizonte del Hidrógeno en Colombia. Fuente: (Mesa Puyo D., 2021).

**México.** La Asociación Mexicana de Hidrógeno (AMH2) presentó el 25 de mayo de 2022 el estudio “Hidrógeno verde: El vector energético para descarbonizar la economía de México” y una Hoja de Ruta para el impulso a esta industria, la que podría generar 3,2 millones de empleos y tener un impacto de 46 MM USD en el Producto Interno Bruto (PIB) entre 2025 y 2050 (AMH2, 2022). El estudio se enfocó en las 7 industrias con mayores emisiones de GEI en México mediante:

- Sustitución directa; en la industria Petroquímica reemplazando H2G por H2V para el proceso de refinación de petróleo
- Mezcla de H<sub>2</sub> con gas natural; en la generación de electricidad en los Ciclos Combinados, en las industrias de hierro, acero, vidrio, química y cemento en las aplicaciones térmicas de cada una de las industrias para la elaboración de sus productos finales
- Cambio de tecnología; en la sustitución vehículos de diésel y gasolina por tecnología de H<sub>2</sub> en autos, autobuses y camiones de carga privados

Se prevé que la demanda de H2V comience en 2025, alcance unos 230 kt en 2030 y llegue a 2.700 kt en 2050. Los costos se estiman en 5,3 USD/kg para 2030 y 2,4 USD/kg para 2050. Para cubrir esa demanda se requerirán 79 GW de capacidad renovable y 51 GW de electrólisis, lo que permitiría reducir 53 Mt de CO<sub>2</sub> en 2050, un 14 % menos que en 2019.

Se establecieron cinco líneas de acción para la Hoja de Ruta de H2V: estratégicas, regulatorias o jurídicas, económicas o de mercado, tecnológicas y de infraestructura, y ambientales y sociales. Los hitos correspondientes, organizados en tres escenarios temporales, se presentan en la Figura 5.

México impulsa la transición energética con 24 proyectos de hidrógeno verde por 21.000 MMUSD en 13 estados, destacando Sonora, Yucatán, Nuevo León y Baja California. Según la AMH2, podrían producir 196,7 t de H2V, 970.000 t de amoníaco verde y 2,1 millones de toneladas de metanol verde y azul, mediante 4.104 MW de nueva capacidad solar y eólica que reforzará la infraestructura renovable.

En el marco de esta transformación energética, Pemex anunció su intención de sustituir el H2G que actualmente utiliza en sus refinerías por H2V y planea comercializar este recurso en un mercado que, según estimaciones, alcanzará un valor de 4000 MMUSD en la próxima década.

Por su parte, la Comisión Federal de Electricidad (CFE) también está explorando el uso del H2V en sus operaciones. La estrategia incluye su integración en las Centrales de Ciclo Combinado mediante una mezcla con gas natural, así como la adquisición de nuevas turbinas diseñadas para este propósito. Estas acciones buscan reducir las emisiones de carbono y diversificar las fuentes de energía utilizadas en el país. En la actualidad, con el financiamiento de BID el país está realizando una ruta del hidrógeno de bajas emisiones.





Figura 5: Principales hitos en la hoja de ruta para la implementación del H2V en México.

**Perú.** Se destaca por poseer el primer electrolizador de potencia en el mundo conectado al sistema eléctrico. Este electrolizador alcalino de 25 MW para la producción de  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  data del año 1963 y es el más grande operativo en la región. Este electrolizador se encuentra en la actualidad produciendo H2V desde el año 2022 a través de la compra de IRECs<sup>3</sup> para compensar su producción (Engie, 2022).

El Perú aún carece de un marco legal para el H2V. En 2022, H2Perú presentó al poder político una propuesta de ley y una hoja de ruta para su promoción. Aunque el Ministerio de Energía y Minas (MINEM) quiso elaborar su propia ruta, en 2023 el BID financió un estudio para el ministerio que fue concluido, pero no difundido ni adoptado. Ese mismo año, el Congreso dio un dictamen favorable a la ley, mostrando cierto avance. La Figura 6 resume los hitos principales del estudio.

Durante la elaboración de esta ruta, se tuvo participación de los stakeholders del sector de la energía, gobierno, la cámara H2 Perú, entre otros participantes. De esta manera, la ley de promoción del hidrógeno propuesta por la cámara tuvo su instancia de revisión previa por el equipo de consultores que trabajó durante la elaboración de la ruta como por el propio ministerio.

Por otro lado, lo cual puede verse también como un avance regulatorio, el hidrógeno proveniente de fuentes renovables se introdujo en el decreto de emergencia climática en 2022, destacando acciones como la elaboración de programas de promoción para el desarrollo tecnológico, uso y producción de H2V. A su vez, este decreto también promovía la entrada de vehículos energizados a partir de H2V.

Los usos finales del hidrógeno en Perú son principalmente: Refino de Petróleo, Químicos (Principalmente  $\text{NH}_3$ ), Cemento. La elaboración de amoníaco es para su uso en fertilizantes (nitrato de amonio) y explosivos para la industria minera. La demanda total en 2019 de hidrógeno, en su gran mayoría gris, fue de 42 kt.

Tanto el norte como el sur del Perú poseen recursos eólicos que pueden ofrecer bajos costos nivelados. El sur, además, posee uno de los principales yacimientos en el mundo de energía solar. Perú tiene un potencial de 100 GW de fuentes hidroeléctricas, solares y eólicas. La potencia total de los recursos renovables podría llegar a ser entre 15,8 y 21,3 GW en el año 2050, lo que podría implicar 9 GW de potencia de electrolizadores para ese año.

Este país también tiene un amplio desarrollo del sector de gas natural que permitiría introducir en el futuro el blending en el sistema de distribución, blending en gas natural vehicular HGNV, con una

<sup>3</sup> Los IRECs (International Renewable Energy Certificates) son certificados internacionales que garantizan que la energía se generó a partir de fuentes renovables. Son un tipo de Certificado de Atributo Energético (EAC) o Certificado de Energía Renovable (CER).



plataforma establecida. De hecho, el distribuidor de gas natural de la zona de Lima y Callao (Cálidda) se encuentra actualmente analizando blending en los calentadores del uno de sus Citygates.

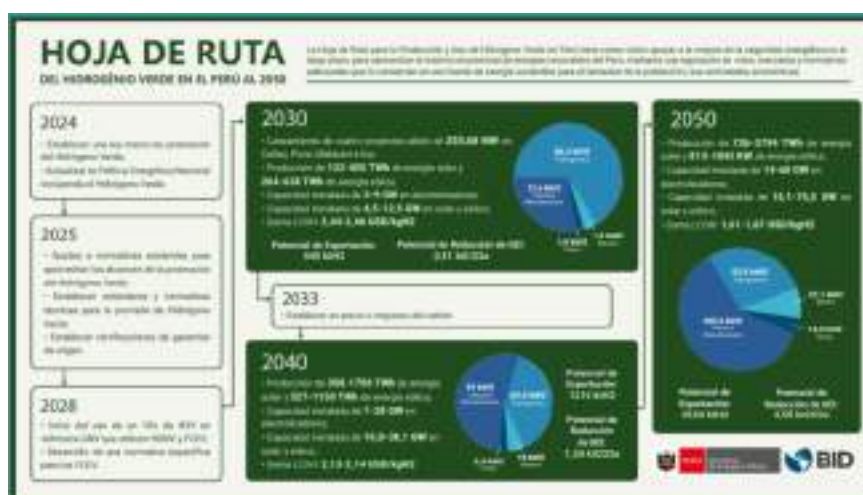


Figura 6: Hoja de ruta del hidrógeno verde en el Perú hacia 2050. Fuente: (EDP New, 2023).

La normativa de energías renovables en Perú se basa en el Decreto Legislativo 1002, que promueve la inversión en generación eléctrica con fuentes renovables, y en el Decreto Supremo 012-2011-EM, su reglamento. Actualmente, la generación renovable compite en el mismo mercado que las fuentes convencionales al considerarse que ya existe competitividad suficiente.

## CONCLUSIONES

En este estudio se llevó adelante un análisis del desarrollo regulatorio, de incentivos y proyectos de H2V para seis países referenciales en Latinoamérica: Argentina, Brasil, Chile, Colombia, México y Perú. Si bien cada uno de los países analizados presenta características sumamente destacadas en cuanto los recursos naturales requeridos para el desarrollo de esta tecnología, presentan distintos grados de avance en la evolución de la economía del hidrógeno renovable y de bajas emisiones.

Para considerar y contrastar los distintos aspectos de este progreso, se tomó el Índice 2024 H2LAC que examina cinco categorías clave: políticas y regulaciones, proyectos, economía local del hidrógeno, aplicaciones y planificación/acuerdos internacionales. La Figura 7 muestra la calificación final que refleja el progreso promedio ponderado de las cinco áreas clave definidas en la Tabla 1 hacia una economía de hidrógeno ideal (100 puntos), donde se ubicaron de izquierda a derecha los países de acuerdo con el puntaje obtenido.

Se puede concluir que, hasta el presente, el desarrollo de Chile, Brasil y Colombia es parejo y está por encima del 70% de la puntuación ideal (73,25%, 72,75%, 72,5%), mientras que Argentina con 51%, Perú con 44% y México con 35,5% vienen por detrás. En términos generales se puede destacar lo siguiente:

- Actualmente, existen proyectos piloto y algunas iniciativas concretas en varios de los países analizados, pero aún falta una infraestructura robusta y marcos regulatorios claros para impulsar su crecimiento a gran escala.
- Las oportunidades son significativas, incluyendo la descarbonización de sectores clave (industria, transporte, energía), la creación de nuevos empleos, la atracción de inversión extranjera y la posibilidad de convertirse en un exportador importante de H2V a nivel global.
- LAC tiene la oportunidad de jugar un papel crucial en la economía global del H2V, pero requiere un esfuerzo coordinado público – privado.

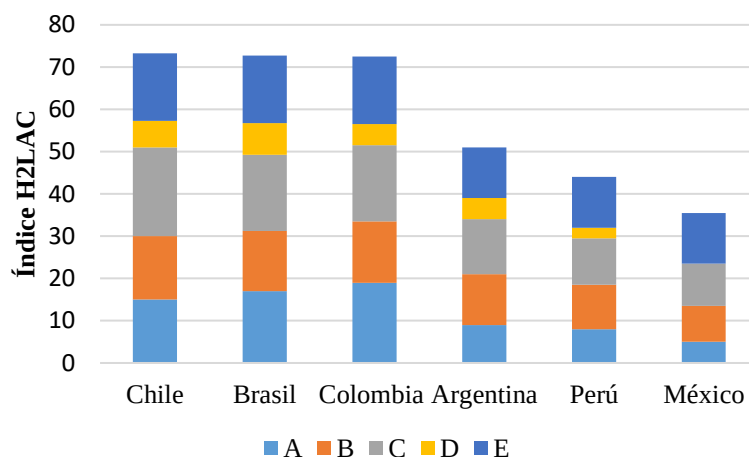


Figura 7: Índice H2LAC comparado para los países referentes de LAC. A, B, C, D, E remiten a las 5 áreas clave de la Tabla 1. Elaboración propia en base a (Hinicio-Newenergy, 2024).

## FUENTES DE FINANCIAMIENTO

Los autores agradecen a la SECyT\_UNC por el financiamiento del proyecto 33620230100934CB.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Calden Consultoría SRL por el aporte de datos y las discusiones ofrecidas.

## REFERENCIAS

- AMH2. (2022). *Hidrógeno Verde: El vector energético para descarbonizar la economía de México*.
- Calixto E. y Salgado V. (2024). *Hydrogen law and regulation in Brazil* CMS Expert Guides. <https://cms.law/en/int/expert-guides/cms-expert-guide-to-hydrogen/brazil>
- Cheekatamarla, P. (2024). Hydrogen and the global energy transition—Path to sustainability and adoption across all economic sectors. *Energies*, 17(4), 807.
- DGCyE. (2024). HYFUSEN 2024. Recuperado de <https://hyfusen2024.unlp.edu.ar/> el 10 de febrero de 2024.
- Engie. (2022). *Reporte-Integrado-EEP-2022*. <https://engie-energia.pe/wp-content/uploads/2023/05/Reporte-Integrado-EEP-2022-D-ENGIE-A-4.pdf>
- Gobierno de Argentina. (2023). *Estrategia nacional para el Desarrollo de la Economía del Hidrógeno*. [https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/2023/07/estrategia\\_nacional\\_de\\_hidrogeno\\_-\\_sae.pdf](https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/2023/07/estrategia_nacional_de_hidrogeno_-_sae.pdf)
- Gob. de Chile. (2023). *Plan de Acción de Hidrógeno Verde*. <https://www.planhidrogenoverde.cl/>
- gob.cl. (2024). *Inauguramos plan piloto de hidrógeno verde para la minería - Gob.cl*. <https://www.gob.cl/noticias/proyecto-piloto-hidrogeno-verde-mineria-plan-accion-h2v/>
- gov.co. (2021). *Ruta de hidrógeno de Colombia* | MINCIT - Ministerio de Comercio, Industria y Turismo. <https://www.mincit.gov.co/minindustria/reindustrializacion-basada-en-energias-renovables/ruta-de-hidrogeno-de-colombia>
- H2LAC. (n.d.). *Índice H2LAC 2024*. Recuperado de H2LAC (h2lac.org) el 10 de febrero de 2024.
- H2news. (2022). *PELP 2023 - 2027 INFORME PRELIMINAR*. <https://h2news.cl/2022/01/28/pelp-2023-2027-informe-preliminar/>
- H2 Perú. (2022). *H2 Perú propondrá una normativa del hidrógeno durante el primer trimestre del año*. <https://h2.pe/noticias/h2-peru-propondra-una-normativa-del-hidrogeno-durante-el-primer-trimestre-del-ano/>
- HIF. (2022). *Haru Oni*. <https://hifglobal.com/haru-oni>
- Hinicio-Newenergy. (2024). *H2LAC Index 2024 Report*. <https://hinicio.com/h2lacindex/>
- Hydrogen Council, 2022. *Global Hydrogen Flows: Hydrogen trade as a key enabler for efficient decarbonization*. <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2022/10/Global-Hydrogen-Flows.pdf>

- IEA (2024), Global Hydrogen Review 2024, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024>, Licence: CC BY 4.0
- Mega Trends & Analysis. (2023). *Brazil Expands Network: EPE recommends huge outlay for regional interconnections* - REGlobal. <https://reglobal.org/brazil-expands-network-epe-recommends-huge-outlay-for-regional-interconnections/>
- Minenergía. (2021). *Colombia's Hydrogen Roadmap*. [https://www.minenergia.gov.co/documents/5862/Colombias\\_Hydrogen\\_Roadmap\\_2810.pdf](https://www.minenergia.gov.co/documents/5862/Colombias_Hydrogen_Roadmap_2810.pdf)
- Ministério de Minas e Energia. (2023). *Programa Nacional de Hidrogênio - PNH2*. <https://www.gov.br/mme/pt-br/programa-nacional-do-hidrogenio-1>
- O'Rourke, P., Mignone, B. K., Kyle, P., Chapman, B. R., Fuhrman, J., Wolfram, P., & McJeon, H. (2023). Supply and demand drivers of global hydrogen deployment in the transition toward a decarbonized energy system. *Environmental Science & Technology*, 57(48), 19508-19518.
- Revista Hidrógeno. (n.d.). *Revista Hidrógeno*. Recuperado de <https://www.aah2.org/> el 10 de febrero de 2025.
- SEA, 2025. Servicio de Evaluación Ambiental. <https://www.sea.gob.cl/>
- Sakib, A. N., Mehjabin, F., Schmidt, J. B., Haque, M., Saha, K., & Bhuiyan, M. M. H. (2024). Harnessing hydrogen: A comprehensive literature review on strategic launching initiatives in the global energy market. *International Journal of Energy Research*, 2024(1), 3265065.
- Sigal, L., et al. (2014). Analysis of the potential for hydrogen production from three renewable sources: wind, solar and biomass in Argentina. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39, 1459-1471.
- Zorrero, S. (2021). *Desafíos del hidrógeno verde*. Recuperado de <https://www.cnea.gob.ar/es/noticias/desafios-del-hidrogeno-verde/> el 10 de febrero de 2024.

## **COMPARATIVE EVALUATION OF THE DEVELOPMENT AND VIABILITY OF THE H2V VALUE CHAIN IN LATIN AMERICA**

**ABSTRACT.** This work analyzes the development of the green hydrogen (H2V) economy in six Latin American countries: Argentina, Brazil, Chile, Colombia, Mexico, and Peru. The objective is to contrast their progress in regulatory frameworks, projects, and incentives, and to evaluate the economic viability of the H2V value chain. The methodology is based on the H2LAC 2024 Index, which evaluates five key categories: public policies and regulations, projects, the local hydrogen economy, applications, and international planning and agreements. The final score represents the weighted average progress of these five key areas toward achieving an ideal hydrogen economy, with a maximum score of 100 points. The results show significant heterogeneity. Chile (73.25%), Brazil (72.75%), and Colombia (72.5%) lead the development, while Argentina (51%), Peru (44%), and Mexico (35.5%) are lagging. Despite its potential, Argentina faces high costs in capital-intensive stages. The conclusion is that, while renewable resources are a natural advantage, incentive policies and a stable regulatory framework are crucial to attract investment and catalyze large-scale H2V deployment in the region.

**Keywords:** Green hydrogen, Latin America, levelized cost, country risk, energy transition.

## **MITIGACIÓN DE ISLAS DE CALOR URBANAS. ESTUDIO ANUAL DE CAMPO Y LABORATORIO**

**Pablo Cabrera<sup>1</sup>, Gerardo Botasso<sup>1</sup>, Ana M. Castro Luna<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional La Plata, LEMaC Centro de Investigaciones Viales UTN FRLP – CIC PBA, La Plata, Buenos Aires, Argentina.

<sup>2</sup>Comisión de Investigaciones Científicas CIC PBA, La Plata, Buenos Aires, Argentina.

e-mail: [pcabrera@frlp.utn.edu.ar](mailto:pcabrera@frlp.utn.edu.ar)

**RESUMEN:** La Isla de Calor Urbana (ICU) describe el calentamiento del aire y las superficies en áreas urbanas respecto a zonas no urbanizadas. Durante el día, el pavimento oscuro absorbe radiación solar, alcanzando altas temperaturas superficiales (especialmente en verano), almacena ese calor y lo libera al aire circundante. Con la incorporación de  $\text{TiO}_2$  a la mezcla asfáltica, el pavimento se aclara, reduciendo la absorción de calor solar y disminuyendo tanto su temperatura superficial como la del aire adyacente. Este estudio analiza cambios de color, valores de albedo y temperaturas superficiales en probetas de pavimento con y sin adición de  $\text{TiO}_2$ , expuestas al aire libre durante doce meses, determinando la energía transferida al entorno y el Potencial de Isla de Calor Urbano (PICU) para evaluar la influencia de ambas mezclas en la ICU. Los resultados muestran que el pavimento con  $\text{TiO}_2$  reduce su temperatura superficial respecto al de referencia, tanto al inicio del estudio como tras doce meses de exposición; además, se reduce la energía transferida al entorno debido al  $\text{TiO}_2$ . Como resultado, el Potencial de Isla de Calor Urbana (PICU) para los pavimentos con  $\text{TiO}_2$  es menor en condiciones diurnas.

**Palabras Clave:**  $\text{TiO}_2$ , ICU, albedo, envejecimiento UV del asfalto.

### **INTRODUCCION**

Más de la mitad de la población mundial vive en ciudades y se espera que llegue al 68% para 2050. Las ciudades densamente pobladas, requieren viviendas y acceso vial, lo que se logra usando dos materiales fundamentales como son el cemento portland y el asfalto, en edificios, calles y estacionamientos. Para abordar los problemas de tráfico vial, el suelo natural suele sustituirse por superficies impermeables como pavimentos.

Durante el verano, los pavimentos asfálticos que se calientan significativamente por la incidencia de radiación solar, y su color oscuro, alcanzan temperaturas elevadas. Las altas temperaturas superficiales del pavimento explican en parte la isla de calor urbana (ICU), con una temperatura ambiente más alta en la ciudad que en las zonas rurales circundantes. El aumento de temperaturas urbanas agrava el consumo energético para refrigeración, incrementa la demanda eléctrica máxima, intensifica la contaminación, aumenta la huella de carbono y causa problemas de salud. La isla de calor es un ejemplo de modificación climática que sucede cuando la urbanización altera las características de la superficie del terreno y del aire que lo envuelve.

La radiación solar reflejada por una superficie está determinada por su albedo, el cual da cuenta de la relación entre la radiación solar que refleja y la radiación incidente total sobre ella, su valor varía de 0 (absorbedor absoluto) a 1 (reflector absoluto). Los materiales de color claro, con mayor albedo (materiales reflectantes), absorben menos radiación solar y al reflejar más radiación diurna



almacenan menos calor que los materiales oscuros. Se han propuesto numerosas medidas para disminuir la contribución de los pavimentos a la ICU, por ejemplo, recubrir la superficie del pavimento con materiales claros que tienen mayor albedo, utilizar asfaltos sintéticos modificados con pigmentos que reflejan la radiación solar (Martínez et al., 2024), o emplear sistemas mecánicos que extraen calor excedente haciendo circular agua por tubos embebidos en el pavimento, donde el fluido captura el calor almacenado, enfriando la superficie y reduciendo su temperatura (García & Partl, 2014). El recubrimiento con pinturas de alto albedo ha probado ser una tecnología eficaz contra la ICU, de duración temporal reducida. La vegetación es un factor importante para mejorar el entorno urbano. Las áreas verdes pueden mitigar significativamente la ICU si se integran en la planificación urbana (Suárez-Gómez et al., 2024). Un pavimento frío se define como aquel que, en comparación con un pavimento convencional, alcanza valores de temperatura superficial más bajos al exponerse a la misma radiación solar. Si el pavimento se calienta menos, se logra un ahorro energético y se mejora la calidad del microclima urbano (Cabrera et al., 2025).

Cuando un pavimento se expone al aire libre, su color se aclara con el tiempo. El asfalto, que es una mezcla compleja de hidrocarburos, participa en reacciones fotoquímicas inducidas por la componente UV de la radiación solar cuando el pavimento se expone a factores ambientales variables, como radiación solar, temperatura del aire y humedad. Estas reacciones iniciadas por la interacción UV y asfalto generan radicales libres que se propagan, rompiendo cadenas moleculares del asfalto, lo que causa cambios en su color, pérdida de flexibilidad y otros deterioros.

En este trabajo se compara la capacidad de reflejar la radiación solar de probetas de pavimento sin y con modificación por adición de  $\text{TiO}_2$ , y se estudia la influencia de la exposición prolongada a la intemperie en la variación del albedo y en la temperatura superficial. Se realizan cálculos de la temperatura del aire sobre ambos tipos de pavimentos, del flujo energía que transfieren a su entorno, y del potencial de generar una isla de calor urbana (PICU).

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

Una mezcla asfáltica es un material compuesto por asfalto, agregados pétreos (áridos) y relleno mineral. El asfalto es el aglutinante que une los áridos y el relleno mineral. Una correcta distribución granulométrica de los áridos y la presencia del relleno mineral son clave para lograr una mezcla homogénea con las propiedades mecánicas que satisfacen los requisitos de capacidad de carga y seguridad vial del pavimento.

Se prepararon dos mezclas asfálticas densas representativas con asfalto CA-30. La primera empleó además del asfalto, agregados pétreos comerciales 6:12 (grueso), 0:6 (fino) y rellenos combinados (cal + partículas de los agregados grueso y fino que pasan el tamiz #200). Con esta mezcla se fabricaron las probetas de pavimento de referencia. En la segunda mezcla se sustituyó el relleno combinado por 5% de una cantidad equivalente de micropartículas de pigmento  $\text{TiO}_2$  (ASTM C979) manteniendo invariable las cantidades de todos los componentes restantes. Con esta mezcla asfáltica se fabricaron las probetas de pavimento modificadas con  $\text{TiO}_2$ .

Los ensayos de laboratorio se realizaron con probetas cilíndricas (Marshall:  $\varnothing 102 \text{ mm} \times 64 \text{ mm}$ ). Para las experiencias al aire libre, se utilizaron probetas prisma cuadrangulares ( $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ ).

Las probetas prisma cuadrangulares se expusieron a la intemperie durante doce meses para analizar el efecto de las condiciones climáticas (radiación UV, lluvia, temperatura, etc.) en las mismas. Adicionalmente, se simuló en el laboratorio el efecto específico de la componente UV de la radiación solar. Para ello, se trataron las probetas Marshall en una cámara equipada con lámparas UV-A, siguiendo la norma ASTM G154. Como radiación solar simulada, se seleccionó la banda UV-A de 360 nm.

El albedo de cada muestra (referencia y modificada) se midió según la norma ASTM E1918A modificada por (Akbari et al., 2008), utilizando un piranómetro Kipp & Zonen CMP-3 conectado a un almacenador de datos Campbell CR300. Para determinar la influencia de la exposición al aire libre en las muestras que se analizan, se midió el albedo al inicio y a los 12 meses del estudio. Las mediciones térmicas y de albedo se realizaron con las probetas situadas en la azotea de la universidad UTN-FRLP.

El comportamiento térmico por incidencia sobre las probetas de la radiación solar directa se evaluó utilizando termocupas tipo K y data logger Testo. La emisividad ( $\epsilon$ ) se midió siguiendo la norma ASTM E1933-99<sup>a</sup> utilizando una cámara termográfica Testo (resolución IR 320×240 píxeles, sensibilidad 0,1°C). Con la cámara termográfica, se obtuvieron también imágenes térmicas, las temperaturas que se muestran en las imágenes coloreadas complementan y acuerdan con los datos obtenidos con las termocupas.

## RESULTADOS

### *Variación del color de las probetas*

En la Figura 1 se muestran imágenes de las probetas al inicio de la exposición al aire libre (a) referencia color negro y (b) modificada con TiO<sub>2</sub> color marrón. Tras 12 meses al aire libre la probeta de referencia (c) es más clara que al inicio y la modificada con TiO<sub>2</sub> (d) modifico su color a gris claro. Es probable que el cambio de color en las probetas se realice con participación de la componente UV de la radiación solar, y los componentes del asfalto descrito previamente como una mezcla compleja de hidrocarburos saturados, aromáticos, resinas y asfaltenos algunos de ellos coloreados. La probeta más clara es la de pavimento modificado con TiO<sub>2</sub>, que es un semiconductor capaz de interaccionar con la energía de la radiación UV-A que ayuda a la transición de electrones de la banda de valencia a la de conducción y posibilita la competencia del TiO<sub>2</sub> con los componentes del asfalto por los fotones UV y actuar en la eliminación de contaminantes ambientales (Wang et al., 2022). La imagen de los cortes transversales en las probetas luego de 12 meses muestra que el cambio de color en ambas probetas es solo superficial.

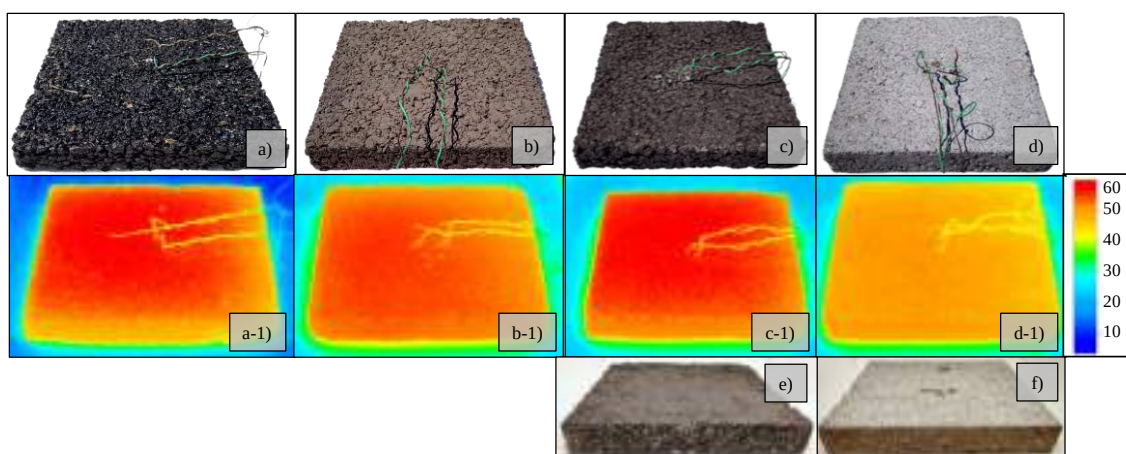


*Figura 1: Probetas de pavimento al inicio (a, b) y tras 12 meses de exposición al aire libre (c, d). Arriba: fotografías de las muestras de referencia (a, c) y con TiO<sub>2</sub> (b, d). En medio: imágenes térmicas correspondientes (a-1 a d-1). Abajo: cortes transversales que muestran que el cambio de color es superficial (e: referencia, f: con TiO<sub>2</sub>).*

Una confirmación de la influencia de la radiación UV sobre el cambio de color en las probetas expuestas al aire libre se realizó en el laboratorio, exponiendo probetas cilíndricas a radiación en la cámara UV. En la Figura 2 se muestra el cambio de color superficial de las probetas luego de



ser expuestas al UV un tiempo equivalente a 8 años de exposición, y un corte longitudinal de las mismas, que confirma que el efecto de la radiación UV sobre las muestras de mezcla asfáltica es solo superficial.

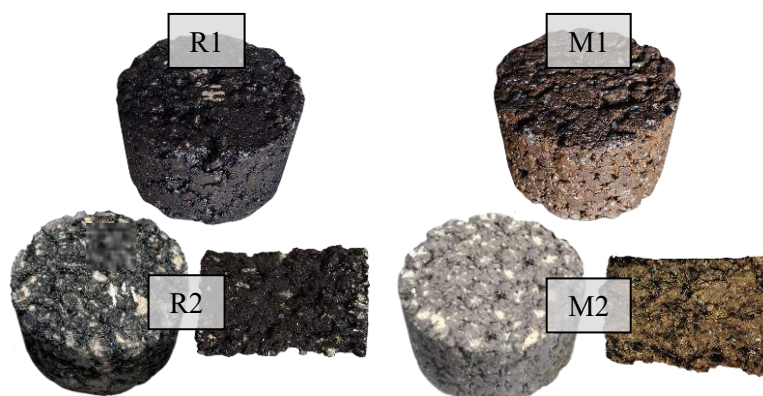


*Figura 2: Probetas Marshall de referencia (R) y modificada con  $\text{TiO}_2$  (M) antes (1) y después (2) de 8 años exposición en cámara UV.*

#### **Valores de albedo determinados al inicio y luego de 12 meses exposición al aire libre**

En la Tabla 1 se exhiben los valores del albedo de las muestras de pavimento referencia y modificada con  $\text{TiO}_2$  al inicio y luego de 12 meses al aire libre.

*Tabla 1 Valores de albedo medidos en los dos tipos de pavimento, al inicio y luego de 12 meses al aire libre.*

| TIPO DE PAVIMENTO                                 | Albedo<br>Inicio | Albedo<br>A los 12 meses |
|---------------------------------------------------|------------------|--------------------------|
| Pavimento asfáltico de referencia                 | 0,05             | 0,11                     |
| Pavimento asfáltico modificado con $\text{TiO}_2$ | 0,15             | 0,26                     |

Al comenzar la exposición al aire libre, el pavimento de referencia tiene un valor de albedo bajo, absorbe el calor solar y su temperatura superficial es más elevada que la del pavimento modificado con  $\text{TiO}_2$ , cuyo valor de albedo inicial es mayor. Luego de la exposición a la intemperie por 12 meses, expuestos a variaciones de la radiación solar incidente, la temperatura y humedad, los pavimentos se decoloran, su albedo aumenta y sus temperaturas superficiales son menores. Las muestras de mayor albedo tienen temperatura superficial más baja. Esta afirmación coincide con el cambio de color experimentado por la muestra de pavimento modificado con  $\text{TiO}_2$ , que cambió de marrón a gris claro, muestra mayor albedo y su temperatura superficial es más baja.

#### **Variación diaria de la temperatura superficial de probetas de pavimento expuestas al aire libre.**

Durante 10 días consecutivos se registraron en las probetas expuestas al aire libre, los valores de temperatura superficial, así como de la intensidad de la radiación solar, temperatura del aire, velocidad del viento y humedad.

Se compara el comportamiento térmico de la probeta de referencia y la modificada con  $\text{TiO}_2$  graficando uno de los 10 días consecutivos medidos al inicio y luego de 12 meses de exposición a la intemperie. También se evalúa el calentamiento del aire sobre la superficie del pavimento a 0,5, 1 y 2 metros de altura. Este cálculo se realizó utilizando un modelo numérico que resuelve la ecuación de difusión turbulenta vertical con forzamiento radiativo (Stull, 2003).

La temperatura del aire caliente disminuye con la altura debido a la convección y la expansión del aire ascendente. El aire es más cálido cerca del pavimento, asciende, se enfría al expandirse a mayor altitud y luego es reemplazado por aire más cálido proveniente de abajo. Esto crea un



gradiente de temperatura, con el aire más cálido cerca del pavimento y el aire más frío a mayor altitud.

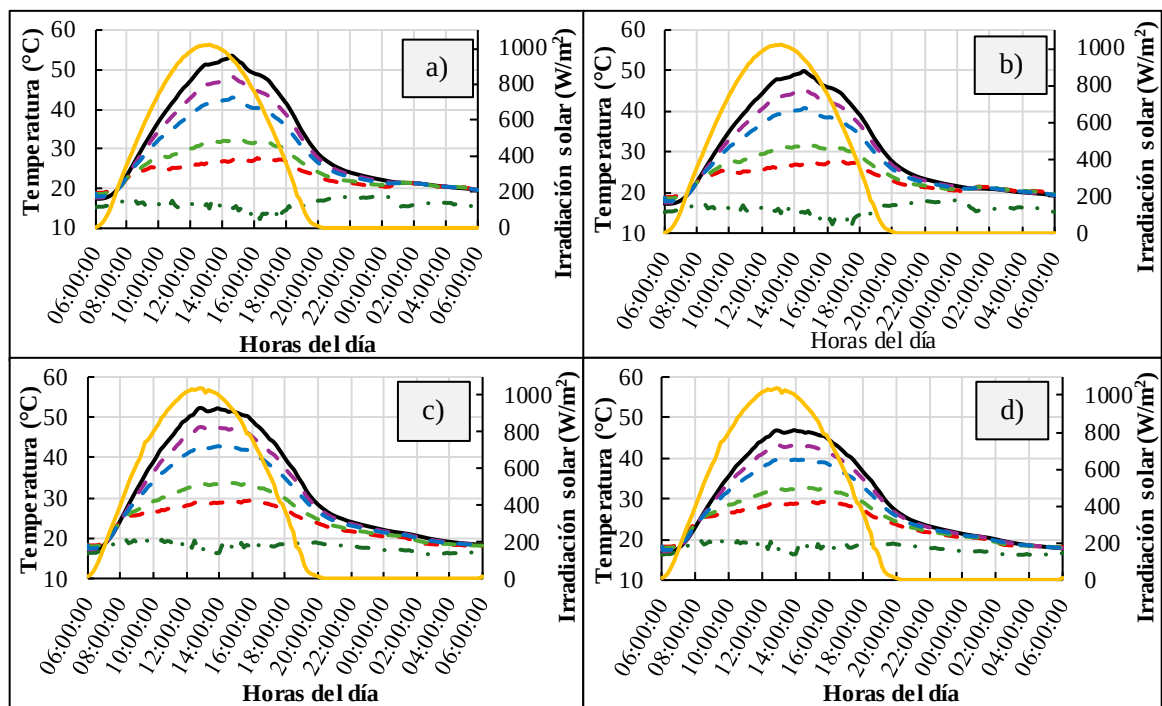


Figura 3: Perfiles diarios de temperatura e irradiación solar para las probetas de referencia (a, c) y con TiO<sub>2</sub> (b, d), medidas al inicio (a, b) y a los 12 meses (c, d). Se muestran la temperatura superficial del pavimento, la del aire a 2,5 m, el punto de rocío y las temperaturas modeladas del aire a diferentes alturas.

En la Figura 3 se muestra la evolución diaria de la irradiación solar (amarillo), temperatura superficial de pavimento (negro, línea sólida), temperatura del aire a 2,5 m (roja; línea discontinua), temperatura de rocío (verde oscuro; línea discontinua), y temperaturas calculadas del aire a: 0,5 m (violeta línea discontinua), 1 m (celeste línea discontinua) y 2 m (verde línea discontinua). Al inicio de la exposición al aire libre y en el cenit solar, la temperatura superficial de la muestra modificada con TiO<sub>2</sub> (b) registró 4°C menos que la de la probeta de referencia (a). Esto indica que el pavimento modificado con TiO<sub>2</sub> absorbió menos calor solar, manteniéndose más frío y emitiendo menos calor al aire ambiente. Tras 12 meses de exposición a la intemperie, esta diferencia se acentuó: el pavimento modificado con TiO<sub>2</sub> (más claro que el de referencia) mostró una temperatura superficial 8°C más baja (c) que la probeta de referencia (d). En la Tabla 2, realizando las diferencias entre la temperatura del aire sobre la probeta de referencia y la temperatura del aire sobre la probeta modificada a distintas alturas sobre las probetas se observa que, la temperatura del aire sobre la probeta modificada es siempre de menor valor que la del aire a la misma altura sobre la probeta de referencia.

Tabla 2: Comparación a diferentes alturas de la temperatura del aire sobre la muestra modificada respecto de la temperatura del aire sobre la muestra de referencia.

| Tiempo de exposición             | Inicio |      |      | Mes 12 |      |      |
|----------------------------------|--------|------|------|--------|------|------|
| Altura del aire sobre superficie | 0,5 m  | 1 m  | 2 m  | 0,5 m  | 1 m  | 2 m  |
| ΔT <sub>ref-mod</sub> (°C)       | 2.96   | 2.22 | 0.74 | 4.32   | 3.22 | 1.02 |

### ***Cálculo de la transferencia de calor al medioambiente de las muestras estudiadas***

Según (Qin & Hiller, 2014), en una superficie de pavimento seco, donde la evaporación es insignificante, la absorción de calor proveniente de la irradiación solar sobre el pavimento ( $Q_{\text{solarabs}}$ ) se expresa como:

$$Q_{\text{solarabs}} = I(\text{abs}) \quad (1)$$

donde  $I$  es la irradiación solar incidente ( $\text{W/m}^2$ ) y  $\text{abs}$  es la absorción del pavimento, la cual se calcula de acuerdo con:

$$\alpha = 1 - \text{albedo} \quad (2)$$

El pavimento absorbe la energía solar incidente y se calienta. El calor absorbido es transferido a todo el volumen del pavimento por conducción aumentando su temperatura.

Un cuerpo caliente emite calor en la región del infrarrojo, IR. Esta transferencia de calor depende del valor de la temperatura superficial y la emisividad del pavimento. Además, si la temperatura superficial del pavimento es mayor que la temperatura del aire sobre él, parte de la energía absorbida será transferida desde el pavimento hacia el aire por convección. Esta transferencia depende del valor de la temperatura superficial de la muestra caliente, de la temperatura del aire circundante, así como de la velocidad del viento sobre la superficie analizada.

La energía transferida desde el pavimento hacia el ambiente circundante será la suma de la energía que el pavimento transfiere por convección y por emisión radiativa, lo que se expresa como:

$$Q_{\text{transferida}} = h_c \cdot (T_s - T_{\text{amb}}) + \sigma \cdot \epsilon \cdot (T_s^4 - T_c^4) \quad (3)$$

Donde  $h_c$  ( $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ) es el coeficiente convectivo que depende de la velocidad del viento según la ecuación (4);  $T_s$  (K) es la temperatura superficial del pavimento;  $T_{\text{amb}}$  es la temperatura del aire registrada (K);  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann cuyo valor es  $5,67 \times 10^{-8}$  ( $\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ),  $\epsilon$  es la emisividad del pavimento y es adimensional, variando sus valores entre 0 y 1;  $T_c$  es la temperatura del cielo, la temperatura promedio que resulta entre aquella del suelo sobre el cual se está trabajando y la temperatura en la parte superior de la tropósfera donde el contenido de vapor de agua es mínimo que se calcula según la ecuación (5).

$$\begin{aligned} h_c &= 7,2 \times v^{0,78} & v \geq 5 \text{ m/s} \\ h_c &= 5,6 + 4 \cdot v & v < 5 \text{ m/s} \end{aligned} \quad (4)$$

$$T_c = (0,754 + 0,0044 \cdot T_d)^{0,25} \cdot T_{\text{amb}} \quad (5)$$

$T_d$  es la temperatura del punto de rocío ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Aplicando las ecuaciones 1 a 5, se calcula la energía que entrega al medio ambiente cada una de las superficies analizadas. En la Figura 4 se muestran los flujos de: irradiancia solar (amarillo), energía solar absorbida (azul), energía transferidos por convección (celeste) y radiación (rojo) desde las muestras de referencia y modificada al inicio de la exposición al aire libre y luego de 12 meses.

Se observa en el período diurno la menor transferencia de calor por convección desde la muestra modificada, tanto al inicio como luego de 12 meses de exposición, lo que está de acuerdo con el incremento del albedo de la muestra modificada con  $\text{TiO}_2$ , y las menores temperaturas superficiales registradas.

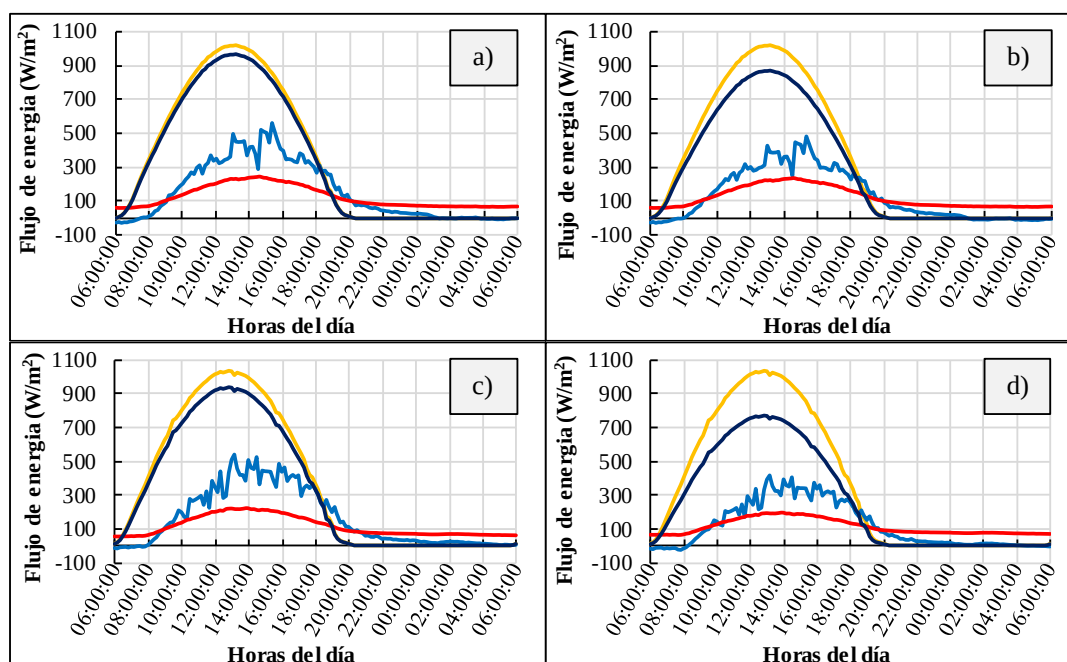


Figura 4: Balance energético diario para las muestras de referencia (a, c) y con  $\text{TiO}_2$  (b, d), al inicio (a, b) y a los 12 meses (c, d). Las curvas representan la energía solar absorbida, la irradiancia incidente, el calor transferido por convección y la radiación infrarroja emitida.

En la Tabla 3 se muestran los valores de energía acumulada transferida por convección y radiación IR al ambiente durante los 10 días de medición. Los valores se calculan durante el período de calentamiento de las muestras (6 a 14 hs), de enfriamiento (14 a 20 hs), y durante la noche (20 a 6 h)

Tabla 3: Valores de energía acumulada.

|        | Muestra referencia             |                                  | Muestra $\text{TiO}_2$         |                                  |            |
|--------|--------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|------------|
|        | Convección ( $\text{Wh/m}^2$ ) | Radiación IR ( $\text{Wh/m}^2$ ) | Convección ( $\text{Wh/m}^2$ ) | Radiación IR ( $\text{Wh/m}^2$ ) |            |
| Mes 1  | 13140,72                       | 9634,71                          | 10666,62                       | 9435,22                          | 6 a 14 hs  |
| Mes 12 | 9993,59                        | 9283,91                          | 6831,91                        | 8529,72                          |            |
| Mes 1  | 24441,15                       | 11482,55                         | 20998,97                       | 11083,31                         | 14 a 20 hs |
| Mes 12 | 21610,29                       | 11295,90                         | 16764,72                       | 10237,63                         |            |
| Mes 1  | 7582,94                        | 8924,85                          | 6190,74                        | 9062,37                          | 20 a 6 hs  |
| Mes 12 | 7398,61                        | 8891,47                          | 5514,46                        | 8809,61                          |            |

De la Tabla 3 se puede concluir que el período de mayor transferencia de calor al ambiente es el que transcurre entre las 14 y las 20 hs. La contribución convectiva es la predominante en ese período. En todos los períodos analizados la transferencia convectiva en la muestra modificada con  $\text{TiO}_2$  es menor que en la de referencia. La menor transferencia de calor en el mes 12 se debe a las menores temperaturas superficiales registradas.

#### **Potencial de Isla de Calor Urbana, PICU, cálculo a partir de las temperaturas obtenidas experimentalmente**

Los distintos pavimentos presentan temperaturas superficiales variables, determinadas por su composición, propiedades térmicas, color y textura. Sin embargo, todos comparten una característica clave: durante las horas de sol, su temperatura supera a la del aire circundante. Este diferencial térmico genera una transferencia de calor desde el pavimento hacia el aire, calentando

la atmósfera y contribuyendo así a la formación de islas de calor urbanas. Para cuantificar este fenómeno, se define el Potencial de Isla de Calor Urbano (PICU) como un indicador que mide la energía térmica liberada por los pavimentos hacia su entorno en ubicaciones específicas (Yang et al., 2020).

El PICU puede calcularse según la Ec. 1:

$$\text{PICU } (\%)_i = \frac{T_{\text{sup}, i} - T_{\text{aire}, i}}{T_{\text{aire}, i}} \times 100 \quad (6)$$

donde PICU (%) es el Potencial de Isla de Calor en diferentes horas del día,  $i$  es el paso horario,  $T_{\text{sup}, i}$  es la temperatura superficial en cada paso horario, y  $T_{\text{aire}, i}$  es la temperatura del aire ambiente registrada en cada paso horario.

La Figura 5 muestra los valores del Potencial de Isla de Calor Urbano (PICU, %) para las probetas de referencia y modificadas con  $\text{TiO}_2$  en distintos horarios. Estos datos, obtenidos de las temperaturas superficiales de la Figura 3 durante un día representativo de los 10 registrados, comparan mediciones iniciales y tras 12 meses de exposición. Como se observa, el PICU alcanza su máxima intensidad durante las horas de sol, especialmente en el cenit solar. En el mes 1 (líneas punteadas), el pico máximo a las 14 h de la muestra con  $\text{TiO}_2$  (línea roja) presenta un 13% menos que la referencia. Para el mes 12, esta diferencia aumenta al 20% debido al mayor albedo adquirido por la muestra modificada. Esto indica que tras un año, el pavimento con  $\text{TiO}_2$  reduce su contribución a la isla de calor urbana en casi un 40%.

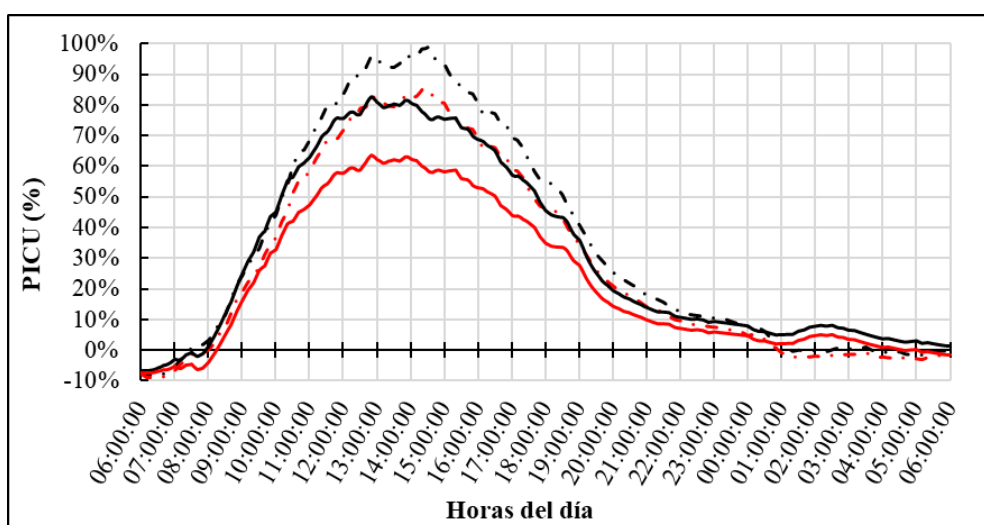


Figura 5: Variación porcentual de PICU a lo largo de un día: línea punteada, mes 1, negra (referencia) y roja (modificada con  $\text{TiO}_2$ ), línea continua, mes 12, negra (referencia) y roja (modificada con  $\text{TiO}_2$ ).

## CONCLUSIONES

Se prepararon dos mezclas asfálticas para pavimento: una con asfalto CA-30 áridos y rellenos combinados, muestra de referencia, otra con  $\text{TiO}_2$ , una mezcla similar pero sustituye el relleno combinado por polvo micrométrico de  $\text{TiO}_2$ , mezcla modificada. Se evaluó el comportamiento térmico de las probetas fabricadas con estas mezclas asfálticas antes y después de la exposición a la intemperie durante 12 meses, así como luego de una exposición prolongada a luz UV en laboratorio.

Las conclusiones más relevantes son:

1. Aumento significativo y sostenido del albedo con TiO<sub>2</sub>: La incorporación de TiO<sub>2</sub> en la mezcla asfáltica incrementa el albedo superficial inicial de 0.05 a 0.15 comparado con el valor del pavimento de referencia. Luego de 12 meses de exposición a la intemperie, este efecto se mantiene y amplía: el albedo del pavimento con TiO<sub>2</sub> alcanza un valor de 0.26 (1,4 veces más que el valor del pavimento de referencia envejecido). Esto se atribuye a las propiedades fotocatalíticas del TiO<sub>2</sub>, que previenen el oscurecimiento y promueven un aclaramiento superficial.
2. Reducción efectiva de la temperatura superficial: El pavimento con TiO<sub>2</sub> registra temperaturas superficiales consistentemente más bajas que el pavimento de referencia, tanto en el inicio del estudio (nuevo) como después de envejecido. Esta diferencia es particularmente notable durante horas diurnas de alta radiación solar, donde la reflectividad elevada del TiO<sub>2</sub> reduce la absorción de calor, lo que se verifica con las imágenes térmicas de las superficies de cada probeta.
3. Mitigación cuantificable del efecto isla de calor urbana (ICU): El "Potencial de Isla de Calor Urbana" (PICU) calculado para pavimentos con TiO<sub>2</sub> es significativamente menor, especialmente en condiciones diurnas. Tras 12 meses, el PICU del pavimento modificado es hasta un 40% inferior al convencional durante picos de calor. Esto demuestra que el TiO<sub>2</sub> no solo reduce la temperatura superficial, sino que también limita la contribución del pavimento al ICU al disminuir la liberación del calor almacenado.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el soporte financiero de UTN-FRLP. PC agradece la beca doctoral otorgada por CONICET.

## REFERENCIAS

- Akbari, H., Cartalis, C., Kolokotsa, D., Muscio, A., Pisello, A., Rossi, F., . . . Zinzi, M. (2016). Local climate change and urban heat island mitigation techniques the state of the art. *Journal of Civil Engineering and Management*(22), 1-16. <http://dx.doi.org/10.3846/13923730.2015.1111934>
- Akbari, H., Levinson, R., & Stern, S. (2008). Procedure for measuring the solar reflectance of flat or curved roofing assemblies. *Solar Energy*, 82(7), 648-655. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2008.01.001>
- Asaeda, T., Vu, C., & Wake, A. (1996). Heat storage of pavement and its effect on the lower atmosphere. *Atmospheric Environment*, 3(30), 413-427. [http://dx.doi.org/10.1016/1352-2310\(94\)00140-5](http://dx.doi.org/10.1016/1352-2310(94)00140-5)
- ASTM C979. (1999). Standard Specification for Pigments for Integrally Colored Concrete.
- ASTM E1918. (2006). Standard Test Method for Measuring Solar Reflectance of Horizontal and Low-Sloped Surfaces in the Field.
- ASTM E1933. (2006). Standard Test Methods for Measuring and Compensating for Emissivity Using Infrared Imaging Radiometers.
- ASTM G154. (2016). Standard Practice for Operating Fluorescent Ultraviolet (UV) Lamp Apparatus for Exposure of Nonmetallic Materials.
- Ayar, P., Ruhi, A., Baibordy, A., Asadi Azadgoleh, M., Mahdi Mohammadi, M., & Abdipour, S. (2024). Toward sustainable roads: a critical review on nano-TiO<sub>2</sub> application in asphalt pavement. *Innovative Infrastructure*, 5(9). <http://dx.doi.org/10.1007/s41062-024-01450-4>
- Cabrera, P., Botasso, G., & Castro Luna, A. (2025). Contribution of an asphalt pavement modified with TiO<sub>2</sub> to the moderation of the Urban Heat Island (UHI). *DYNA*, 237(92), 80-88. <https://dx.doi.org/10.15446/dyna.v92n237.119489>
- García, A., & Partl, M. (2014). How to transform an asphalt concrete pavement into a solar turbine. *Applied Energy*, 119, 431-437. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.01.006>

- Gong, X., Liu, Q., Lv, Y., Shuaichao, C., Wu, S., & Ying, H. (2023). A systematic review on the strategies of reducing asphalt pavement temperature. *Case Studies in Construction Materials*, 18. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01852>
- Gul, B., Naveed, A., Hafiz, M., Tufail, A., & Muhammad, S. (2021). Effect of addition of pigments on thermal characteristics and the resulting performance enhancement of asphalt. *Construction and Building Materials*, 302. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124212>
- Huang, M., & Wen, X. (2019). Experimental Study on Photocatalytic Effect of Nano TiO<sub>2</sub> Epoxy Emulsified Asphalt Mixture. *Applied Sciences*, 9. <http://dx.doi.org/10.3390/app9122464>
- Li, Y., Feng, J., Wu, S., Anqi, C., Kuang, D., Bai, T., . . . Gu, D. (2022). Review of ultraviolet ageing mechanisms and anti-ageing methods for asphalt binders. *Journal of Road Engineering*, 2(2), 137-155. <https://doi.org/10.1016/j.jreng.2022.04.002>
- Martinez, A., López-Montero, T., Miró, R., & Villar, R. (2024). PAVIMENTOS REFLECTANTES PARA REDUCIR EL EFECTO DE LAS ISLAS DE CALOR URBANAS. *Memoria técnica XXII CILA de Granada*, (págs. 1489-1510).
- Omairey, E., Zhang, Y., Al-Malaika, S., Sheena, H., & Gu, F. (2019). Impact of anti-ageing compounds on oxidation ageing kinetics of bitumen by infrared spectroscopy analysis. *Construction and Building Materials*, 223, 755-764. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.021>
- Qin, Y., & Hiller, J. (2014). Understanding pavement-surface energy balance and its implications on cool pavement development. *Energy and Buildings*(85), 389-399. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.076>
- Qin, Y., Hiller, J., & Meng, D. (2019). Linearity between Pavement Thermophysical Properties and Surface Temperatures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 11(31). [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002890](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002890)
- Santamouris, M. (2013). Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island - A review of the actual developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*(26), 224-240. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.047>
- Sirin, O., Paul, D., & Kassem, E. (2018). State of the Art Study on Aging of Asphalt Mixtures and Use of Antioxidant Additives. *Hindawi Advances in Civil Engineering*, 18. <https://doi.org/10.1155/2018/3428961>
- Stull, R. B. (2012). *An introduction to boundary layer meteorology* (Vol. 13). Springer Science & Business Media.
- Suárez-Gómez, P., Cantón-Ivanishevich, M., & Correa-Cantaloube, É. (2024). Evaluación de estrategias de enverdecimiento vertical en clima árido. El caso de las fachadas verdes. *Revista de Arquitectura*, 26, 75-90. <https://doi.org/10.14718/RevArq.2024.26.5014>
- Wang, X., Li, S., Chen, P., Li, F., Hu, X., & Hua, T. (2022). Photocatalytic and antifouling properties of TiO<sub>2</sub>-based photocatalytic membranes. *materials today chemistry*, 23, 100650. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2021.100650>
- Xu, L., Wang, J., Xiao, F., El-Badawy, S., & Awed, A. (2021). Potential strategies to mitigate the heat island impacts of highway pavement on megacities with considerations of energy uses. *Applied Energy*(281). <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116077>
- Xu, S., Wang, C., Wang, Y., Yao, Q., Ma, H., Jia, X., & Fang, L. (2023). Evaluation of asphalt ageing degree based on asphalt color. *Engineering Research Express*, 1(5). <https://doi.org/10.1088/2631-8695/acb11f>
- Yang, H., Yang, K., Miao, Y., Wang, L., & Ye, C. (2020). Comparison of Potencial Contribution of Typical Pavement Materials to Heat Island Effect. *Sustainability*, 12(11). <http://dx.doi.org/10.3390/su12114752>
- Zeng, W., Wu, S., Mei Pang, L., Chen, H., Hu, J., Sun, Y., & Chen, Z. (2018). Research on Ultra-Violet (UV) aging depth of asphalts. *Construction and Building Materials*, 160, 620-627. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.047>

## URBAN HEAT ISLAND MITIGATION ANNUAL FIELD AND LABORATORY STUDY

**ABSTRACT:** The Urban Heat Island (UHI) describes the warming of air and surfaces in urban areas relative to non-urbanized areas. During the day, dark pavement absorbs solar radiation, reaching high surface temperatures (especially in summer), stores this heat, and releases it to the surrounding air. With the addition of  $\text{TiO}_2$  to the asphalt mixture, the pavement becomes lighter, reducing solar heat absorption and lowering both its surface temperature and that of the surrounding air. This study analyzes color changes, albedo values, and surface temperatures in pavement probes with and without the addition of  $\text{TiO}_2$ , exposed to the outdoors for twelve months, determining the energy transferred to the environment and the Urban Heat Island Potential (UHIP) to evaluate the influence of both mixtures on the UHI. The results show that the pavement with  $\text{TiO}_2$  reduces its surface temperature compared to the reference pavement, both at the beginning of the study and after twelve months of exposure; in addition, the energy transferred to the environment is reduced due to the  $\text{TiO}_2$ . As a result, the Urban Heat Island Potential (UHI) for  $\text{TiO}_2$  pavements is lower under daytime conditions.

**Keywords:**  $\text{TiO}_2$ , UHI albedo, UV aging of asphalt.



## **SIMULADOR TÉRMICO DE PAVIMENTOS URBANOS CON INTERFAZ ACCESIBLE PARA EL USUARIO**

**Pablo Cabrera<sup>1</sup>, Maximiliano Martínez<sup>1</sup>, Gerardo Botasso<sup>1</sup>, Ana M. Castro Luna<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional La Plata, LEMaC Centro de Investigaciones  
Viales UTN FRLP – CIC PBA, La Plata, Buenos Aires, Argentina.

<sup>2</sup>Comisión de Investigaciones Científicas CIC PBA, La Plata, Buenos Aires, Argentina.

e-mail: [pcabrera@frlp.utn.edu.ar](mailto:pcabrera@frlp.utn.edu.ar)

**RESUMEN:** La predicción de temperaturas superficiales en pavimentos es clave para evaluar cómo los pavimentos fríos contribuyen a mitigar islas de calor urbanas, optimizar durabilidad de materiales y mejorar eficiencia energética en entornos construidos. Sin embargo, su compleja interacción con variables climáticas (radiación solar, viento, humedad) requiere herramientas de simulación numérica accesibles, capaces de integrar datos reales y evaluar diseños estructurales bajo múltiples escenarios. Este trabajo aborda este desafío mediante el desarrollo de un programa interactivo que combina un modelo de balance energético (flujos conductivos, convectivos y radiativos) con una interfaz gráfica intuitiva (GUI). El software, desarrollado en Python, permite cargar series climáticas históricas en formato CSV y simular la evolución térmica del pavimento, considerando propiedades opto-térmicas como albedo, emisividad, espesor, densidad, conductividad térmica y calor específico. La interfaz, diseñada para usuarios no expertos, facilita comparar múltiples configuraciones estructurales y cuantificar la sensibilidad térmica ante cambios en variables clave. Validado con datos experimentales, el programa emerge como una herramienta versátil para la toma de decisiones en diseño urbano resiliente al cambio climático, disminuyendo el impacto al ambiente y priorizando soluciones que equilibren desempeño técnico y sostenibilidad ambiental.

**Palabras clave:** modelado térmico, isla de calor urbana, interfaz gráfica, pavimentos sostenibles, Python.

### **INTRODUCCIÓN**

La energía que los pavimentos de asfalto u hormigón pueden absorber o emitir hacia el entorno, difiere considerablemente de la de las superficies naturales de suelo debido a las propiedades térmicas y de absorción distintivas de estos materiales (Qin & Hiller, 2014). Estas estructuras tienen una menor capacidad de reflejar la radiación solar que incide sobre ellas (albedo), lo que incrementa la cantidad de energía que absorben con respecto al suelo natural. De hecho, pavimentos nuevos elaborados con mezcla asfáltica reflejan solo el 5% de la radiación solar incidente, contribuyendo a que sus superficies alcancen valores cercanos a 70 °C en días de verano. Además, al ser predominantemente de estructura cerrada o densa, sellan el suelo natural subyacente y reducen notablemente la evapotranspiración, lo que hace que toda la energía solar absorbida se traduzca en calor sensible e incremente la temperatura del material (Santamouris, 2013). Considerando que los pavimentos comprenden entre el 20 y el 40% de un tejido urbano típico, estas superficies calientes descargan calor sensible a la atmósfera urbana, agravando así el efecto de isla de calor urbano (ICU) (Wang et al., 2022).

Investigaciones previas han demostrado que existen diversas estrategias para mitigar la contribución de los pavimentos a las islas de calor, las cuales se basan en: i) aplicar recubrimientos superficiales con elevados valores de albedo y emisividad; ii) incorporar materiales modificadores que incrementen dichas propiedades en las mezclas; iii) diseñar pavimentos retentivos de agua para transformar la energía

solar absorbida en calor latente; iv) utilizar sistemas mecánicos que extraen calor excedente mediante circulación de agua por tubos embebidos; y v) emplear ligantes sintéticos de alto albedo y emisividad (Gong et al., 2023; Martinez et al., 2024; Pascual Muñoz et al., 2013).

Los pavimentos fríos se definen como aquellos que, bajo mismas condiciones de irradiancia solar, alcanzan menores valores de temperatura superficial y emiten menos calor sensible que un pavimento convencional. La predicción de temperaturas superficiales en pavimentos fríos es clave para evaluar cómo contribuyen a mitigar las islas de calor urbanas, optimizar su durabilidad y mejorar su eficiencia energética. Sin embargo, su compleja interacción con variables climáticas (radiación solar, viento, humedad, temperatura del aire) requiere herramientas de simulación accesibles, que puedan integrar datos reales y evaluar diseños bajo múltiples escenarios. Tradicionalmente, herramientas como SUPERPAVE y el modelo LTPP han utilizado aproximaciones simplificadas o datos climáticos sintetizados, lo que limita su precisión en escenarios reales. Este enfoque, aunque valioso en etapas de diseño preliminar, depende de modelos climáticos teóricos (e.g., curvas de radiación solar aproximadas o perfiles de temperatura sinusoidal), los cuales no capturan la variabilidad horaria real, la altura del terreno o cambios de color por incorporación de materiales modificadores (Saleh & Trad, 2011; Abo-Hashema et al., s.f.). Otros autores han desarrollado modelos numéricos basados en diferencias o elementos finitos, que permiten simular con gran precisión el comportamiento térmico de pavimentos, pero requieren conocimientos avanzados de programación, una condición que no siempre está presente.

Conocer las temperaturas superficiales de los pavimentos es importante; no obstante, como el pavimento frío está destinado a mitigar las ICU, esta temperatura puede no ser indicativa de su eficacia real. La cualidad de "frío" en un pavimento debe juzgarse por su reducción del calor sensible que calienta el ambiente urbano (Qin & Hiller, 2014).

Para superar las limitaciones de las herramientas existentes, el objetivo principal de este trabajo es presentar y validar PML-Term, una herramienta computacional con interfaz accesible y de alta precisión para simular el comportamiento térmico de pavimentos urbanos bajo condiciones climáticas reales. Este modelo se desarrolló mediante un esquema de diferencias finitas (FTCS) que permite un modelado físico riguroso de estructuras multicapa, considerando propiedades térmicas y espesores variables. A diferencia de las aproximaciones simplificadas, PML-Term utiliza como input datos climáticos reales horarios (irradiación solar, temperatura del aire, humedad y velocidad del viento) ingresados mediante un archivo CSV, lo que garantiza una alta fidelidad en las simulaciones.

En concreto, los objetivos específicos de este artículo son: (1) describir en detalle los fundamentos físicos y numéricos del modelo; y (2) validar su precisión contrastando las simulaciones con mediciones in situ de temperatura superficial en pavimentos convencionales. Los resultados de esta validación demuestran la capacidad de PML-Term para predecir con exactitud el desempeño térmico tanto de pavimentos convencionales como de tecnologías "frías", consolidándolo como una herramienta confiable para el diseño de infraestructuras urbanas sostenibles y la evaluación de estrategias de mitigación de islas de calor urbanas.

## **MODELO TÉRMICO**

### ***Balance térmico entre el pavimento y su entorno***

Los pavimentos que están en contacto con los neumáticos y, a su vez, están expuestos a las condiciones climáticas, se colocan sobre una serie de capas que en su conjunto se conoce como paquete estructural. Imagínelo como una torta de varias capas, donde cada nivel cumple una función esencial para soportar vehículos, resistir el clima y garantizar durabilidad. En términos prácticos, consta de cuatro capas clave: i) capa de rodamiento, que es la superficie sobre la cual pasan los neumáticos y cuya función es resistir el desgaste diario, brindar adherencia y seguridad, ii) base, capa intermedia que va debajo de la capa de rodamiento y cuya función es soportar y distribuir el peso de los vehículos, evitando deformaciones, iii) subbase, es una capa que según el diseño puede o no estar, y su función es dar soporte adicional, iv) subrasante, que es el suelo natural el cual debe cumplir mínimos requisitos para soportar todas las capas superiores (Rivera, 2023).

El comportamiento térmico del pavimento se ve afectado conjuntamente por factores propios del material, como los parámetros termofísicos, y factores externos como el clima local. Los primeros incluyen el albedo y la emisividad de la capa de rodamiento, así como la conductividad térmica, densidad y capacidad calorífica de todas las capas del paquete estructural, Figura 1.

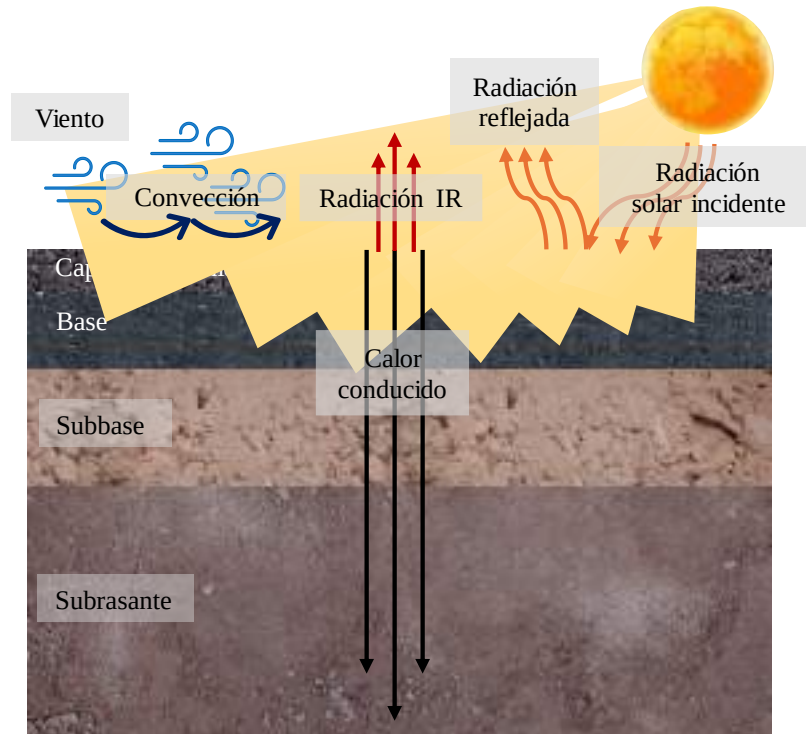


Figura 1: Balance energético en un paquete estructural.

La transferencia de calor entre el suelo y las capas subyacentes puede ser tratado como una transferencia de calor transitoria unidimensional en un cuerpo semiinfinito que obedece la Ec. 1:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho \cdot C_p} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (1)$$

donde  $T$  (K) es el perfil de temperatura del suelo,  $C_p$  (J/kg.K) es el calor específico de cada capa,  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>) es la densidad de cada capa,  $t$  (s) es el tiempo,  $z$  (m) es la coordenada vertical que comienza desde la superficie del pavimento con el positivo hacia abajo, y  $k$  (W/(m.K)) es la conductividad térmica de cada capa.

La variación de temperatura del paquete estructural es impulsada por la irradiación solar incidente ( $I_{sol}$ ) que, dependiendo del albedo ( $a$ ) que tenga la superficie de la capa de rodamiento, parte se refleja nuevamente hacia el entorno. El albedo es una propiedad óptica de la superficie del material, cuyos valores van de 0 a 1, e indica qué fracción de la irradiancia solar incidente sobre la superficie del pavimento es reflejada nuevamente hacia el entorno. Si el valor de albedo es igual a cero, el material absorbe el 100% de la irradiancia solar incidente, y si el valor de albedo es igual a uno, el material refleja el 100% de la irradiancia solar incidente. La irradiancia solar restante se absorbe y se divide en conducción, convección, y radiación infrarroja (IR). El equilibrio de energía en la superficie del suelo obedece a la Ec. 2 (Qin et al., 2019):

$$I_{sol} \cdot (1 - a) = -k \cdot \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} + h_c \cdot (T_s - T_{aire}) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_s^4 - T_{cielo}^4) \quad (2)$$

donde el término a la izquierda del igual representa la irradiancia solar absorbida (W/m<sup>2</sup>), el primer término de la derecha representa el calor conducido en sentido vertical a través de las distintas capas

(W/m<sup>2</sup>), el segundo término representa el término convectivo (W/m<sup>2</sup>) siendo  $h_c$  (W/(m<sup>2</sup>.K)) el coeficiente convectivo que se calcula según la Ec. 3, y  $T_s$  (K) la temperatura superficial de la capa de rodamiento:

$$h_c = \begin{cases} 5,6+4.v & v < 5 \\ 7,2.v^{0,78} & v \geq 5 \end{cases} \quad (3)$$

donde  $v$  (m/s) es la velocidad del viento.

El tercer término de la Ec. 2 es la radiación IR neta (W/m<sup>2</sup>), donde  $\varepsilon$  es la emisividad superficial de la capa de rodamiento,  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann cuyo valor es de  $5,67 \times 10^{-8}$  (W/(m<sup>2</sup>.K<sup>4</sup>)), y  $T_{\text{cielo}}$  es la temperatura del cielo calculada según la Ec. 4. La emisividad superficial es un parámetro del material, con valores de 0 a 1, que indica cuanto se asemeja el comportamiento de un cuerpo caliente al comportamiento de un cuerpo negro, siendo un cuerpo negro un objeto teórico que absorbe toda la radiación electromagnética que incide sobre sí y, al mismo tiempo, un emisor perfecto de radiación térmica. La temperatura del cielo es la temperatura promedio derivada de la superficie del suelo en estudio y la temperatura en la troposfera superior, donde el contenido de vapor de agua es mínimo (Cabrera et al., 2025).

$$T_{\text{sky}} = \varepsilon_{\text{sky}}^{0,25} \cdot T_{\text{aire}} \quad (4)$$

donde la emisividad del cielo ( $\varepsilon_{\text{sky}}$ ) se calcula según la Ec. 5:

$$\varepsilon_{\text{sky}} = 0,754+0,0044.T_{\text{rocio}} \quad (5)$$

donde  $T_{\text{rocio}}$  (°C) se calcula según la Ec. 6:

$$T_{\text{rocio}} = \frac{b_0 \cdot \gamma}{(a_0 - \gamma)} \quad (6)$$

donde  $a_0 = 17,3$ ,  $b_0 = 237,7$ , y  $\gamma = a_0 \cdot T_{\text{aire}} / (b_0 + T_{\text{aire}}) + \ln(H/100)$ , siendo  $H$  la humedad ambiente, y  $T_{\text{aire}}$  está en °C.

### ***Hipótesis fundamentales utilizadas en el modelo numérico***

El modelo se basa en las siguientes hipótesis físicas y numéricas:

1. Unidimensionalidad vertical: el flujo de calor ocurre exclusivamente en dirección vertical (profundidad), despreciando efectos laterales.
2. Materiales homogéneos e isotrópicos: cada capa del pavimento tiene propiedades térmicas constantes ( $k$ ,  $\rho$ ,  $C_p$ ) sin variación espacial.
3. Balance energético superficial completo: la superficie incluye todos los mecanismos de transferencia: irradiación solar, radiación térmica, convección y conducción.
4. Subsuelo como reservorio infinito: temperatura constante en la frontera inferior (condición Dirichlet), modificable por el usuario.
5. Sin transferencia de masa: no se considera humedad ni cambios de fase en el pavimento.

### ***Ecuación de Transporte de Calor***

La ecuación gobernante es la ecuación de calor unidimensional transitoria, Ec. 7:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (7)$$

donde  $\alpha = k/(\rho \cdot C_p)$  es la difusividad térmica (m<sup>2</sup>/s).

### Condiciones de borde

Superficie ( $z = 0$ ):

$$I_{\text{sol}} \cdot (1 - a) = -k \cdot \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} + h_c \cdot (T_s - T_{\text{aire}}) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_s^4 - T_{\text{cielo}}^4) \quad (8)$$

Fondo ( $z = L$ ):

$$T(z = L) = T_{\text{subsuelo}} \quad (\text{Dirichlet}) \quad (9)$$

### Modelo numérico: esquema explícito de diferencias finitas (FTCS) para simulación térmica de pavimentos

Para resolver la Ec. 7 que es una ecuación diferencial parcial, se implementa el esquema Forward-Time-Central-Space (FTCS), un método explícito de diferencias finitas que discretiza el dominio espacial y temporal mediante una malla estructurada (Alebraheem, 2017). Para discretizar el dominio, el pavimento con espesor total  $L$ , se divide en  $N$  nodos espaciales separados por  $\Delta z = L/(N-1)$ . El tiempo se discretiza en pasos  $\Delta t$ , donde  $T_i^n$  denota la temperatura en el nodo  $i$  ( $0 \leq i \leq N-1$ ) y tiempo  $t = n \cdot \Delta t$ . El esquema FTCS aproxima las derivadas mediante diferencias finitas:

- derivada temporal:  $\frac{\partial T}{\partial t} \approx \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t}$ ,
- derivada espacial:  $\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \approx \frac{T_{i-1}^n - 2 \cdot T_i^n + T_{i+1}^n}{(\Delta z)^2}$

Al discretizar las ecuaciones, se obtiene que para los nodos internos ( $1 \leq i \leq N - 2$ ):

$$T_i^{n+1} = T_i^n + \frac{\Delta t}{(\Delta z)^2 \cdot \rho_i \cdot C_{p,i}} \left[ k_{i+\frac{1}{2}} \cdot (T_{i+1}^n - T_i^n) - k_{i-\frac{1}{2}} \cdot (T_i^n - T_{i-1}^n) \right] \quad (10)$$

Donde  $k_{i\pm 1/2}$  son conductividades interfaciales calculadas por medias armónicas que aseguran la continuidad del flujo térmico en interfaces entre materiales distintos, ya que el flujo conductivo debe conservarse cuando hay discontinuidades en propiedades térmicas (por ejemplo, transición asfalto-base granular).

$$k_{i+\frac{1}{2}} = \frac{2 \cdot k_i \cdot k_{i+1}}{k_i + k_{i+1}} \quad (11)$$

En la superficie ( $i = 0$ ):

$$T_0^{n+1} = T_0^n + \frac{\Delta t}{\rho_0 \cdot C_{p,0} \cdot \Delta z} \cdot \left[ I_{\text{sol}} \cdot (1 - a) - \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_0^{n4} - T_{\text{cielo}}^4) - h_c \cdot (T_0^n - T_{\text{aire}}) + k_1 \cdot \frac{T_1^n - T_0^n}{\Delta z} \right] \quad (12)$$

donde el término  $k_{\frac{1}{2}}$  es la conductividad térmica efectiva en la interfaz entre la capa superficial y la primera capa adyacente.

Fondo ( $i = N - 1$ ):

Correspondiente a una condición Dirichlet que considera el subsuelo como reservorio térmico infinito.

$$T_{N-1}^{N+1} = T_{\text{subsuelo}} \quad (13)$$

### Condición de Estabilidad:

La estabilidad del esquema FTCS exige satisfacer el criterio de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL):

$$\Delta t \leq \frac{(\Delta z)^2}{2 \cdot \alpha_{\max}}, \alpha_{\max} = \max_i \left( \frac{k_i}{\rho_i \cdot C_{p,i}} \right) \quad (14)$$

Garantizando que el número de Fourier local ( $Fo = \alpha \cdot \Delta t / (\Delta z)^2$ ) sea  $\leq 0,5$ . Este requisito limita  $\Delta t$  pero asegura que errores de truncamiento no comprometan la solución.

## VALIDACIÓN DEL SOFTWARE DE SIMULACIÓN

La validación del modelo de simulación térmica se realizó mediante comparación con datos experimentales recogidos in situ durante un período de cuatro días consecutivos. Las mediciones se efectuaron sobre una muestra asfáltica compactada, cuyas propiedades ópticas críticas se determinaron experimentalmente:

- Albedo superficial: 0,05 (medido con piranómetro Kipp & Zonen CMP3, según ASTM E1918A modificada por (Akbari et al., 2008))
- Emisividad superficial: 0,91 (medida con cámara termográfica Testo 865 y termocuplas tipo K, según ASTM E1933-99<sup>a</sup>)

La densidad de la mezcla se cuantificó en laboratorio, obteniendo un valor de 2322 kg/m<sup>3</sup>. Los parámetros termofísicos restantes se adoptaron de literatura técnica especializada (Correa et al., 2003):

- Conductividad térmica: 1,00 W/(m·K)
- Calor específico: 920 J/(kg·K)

La configuración experimental incluyó un sustrato aislante de poliestireno expandido (telgopor) de 0,10 m de espesor, con conductividad térmica de 0,032 W/(m·K) y densidad de 26 kg/m<sup>3</sup>. Esta estratificación se replicó fielmente en el simulador mediante un modelo de dos capas (ver Tabla 1):

*Tabla 1: configuración de sistema multicapas.*

| Capas  | Espesor (m) | K (W/(m.K)) | $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) | Cp (J/(kg.K)) |
|--------|-------------|-------------|-----------------------------|---------------|
| Capa 1 | 0,05        | 1           | 2322                        | 920           |
| Capa 2 | 0,10        | 0,032       | 26                          | 1100          |

La Figura 2 presenta la comparación temporal de las temperaturas simuladas y medidas a lo largo del ciclo diario completo. Se observa una correspondencia casi perfecta entre ambas series de datos en todos los períodos evaluados, capturando el modelo con alta fidelidad la dinámica del proceso térmico, incluyendo la magnitud de los máximos térmicos y la evolución de las transiciones. Los patrones de calentamiento y enfriamiento muestran una sincronización destacable, evidenciando la capacidad del simulador para reproducir la respuesta térmica real del sistema bajo las condiciones de contorno definidas.

Para una evaluación cuantitativa, la Figura 3 muestra el diagrama de dispersión de los valores medidos (eje X) frente a los simulados (eje Y), incluyendo la línea de igualdad 1:1 (45°) como referencia teórica. El análisis de regresión lineal forzado al origen (0,0) arrojó un coeficiente de determinación excepcional ( $R^2 = 0,9979$ ), confirmando numéricamente la robustez y precisión global del modelo.

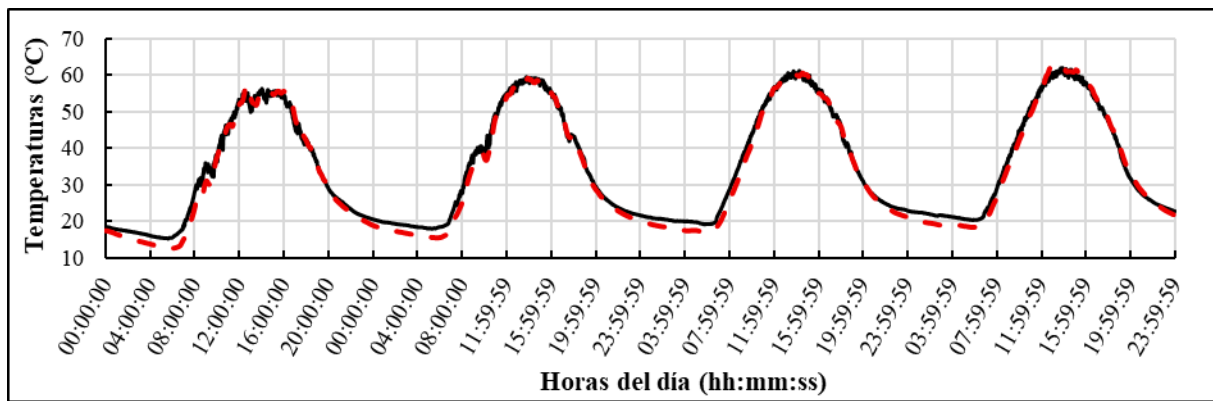


Figura 2: Comparación entre temperaturas superficiales registradas (línea continua negra) y temperaturas superficiales simuladas (línea discontinua roja) durante cuatro días del mes de enero de 2025.

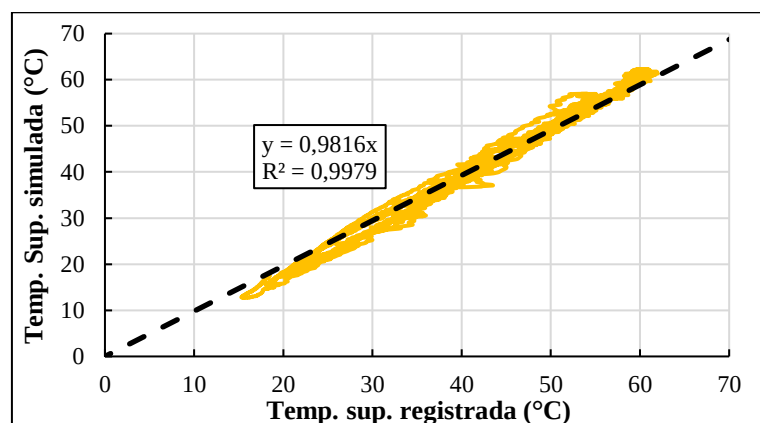


Figura 3: Correlación entre valores de temperatura superficial simulados y valores de temperatura superficial registrados en campo.

## BREVE DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE DE SIMULACIÓN PML-Term

El usuario inicia cargando un archivo CSV con datos climáticos históricos que deben incluir: fecha/hora, temperatura del aire, velocidad del viento, humedad ambiente, irradiación solar y temperatura superficial medida. Simultáneamente, configura el pavimento definiendo el número de capas (entre 1 y 10) y sus propiedades termofísicas individuales: espesor, conductividad térmica, densidad y calor específico. El sistema incluye validaciones automáticas que verifican la estabilidad numérica; si el paso temporal ( $\Delta t$ ) o el número de nodos no cumplen el criterio de estabilidad FTCS ( $\Delta t \leq \Delta z^2 / (2\alpha)$ ), se genera una alerta y se ajusta automáticamente el  $\Delta t$  máximo permitido. Para mayor precisión en el análisis térmico interno, el usuario puede activar la función de extracción de datos a profundidades personalizadas (ej: 0.05 m, 0.15 m). Cabe destacar que para tener más precisión en los resultados obtenidos internamente, se recomienda incrementar el número de nodos, lo que mejora la precisión de temperaturas internas, pero incrementa el tiempo de cálculo proporcionalmente.

Luego de realizar la simulación, los resultados se despliegan en tiempo real en la pestaña "Gráficos", organizados en seis visualizaciones integradas: 1) Temperaturas (superficial simulada, aire ambiente y rocío), 2) Flujos energéticos (radiación absorbida, convectiva, radiativa, conductiva y flujo neto), 3) Humedad relativa, 4) Irradiación solar, 5) Velocidad del viento, y 6) Conducción en capas específicas. La pestaña "Análisis Paramétrico" almacena históricos de simulaciones, permitiendo comparar cómo variaciones en conductividad térmica, albedo, emisividad, densidad, espesor y calor específico afectan a las temperaturas máximas y mínimas mediante la utilización de gráficos interactivos. Cada simulación exitosa genera una nueva pestaña numerada (ej: "Simulación 1"), donde se reportan: temperaturas extremas, energías acumuladas (radiativa, convectiva, conductiva) y desgloses horarios personalizables (por defecto 06-14h, 14-20h, 20-06h). Adicionalmente, el usuario puede exportar todos los datos a Excel.



con un clic, incluyendo series temporales completas y resultados agregados por intervalos horarios ajustables.

## CONCLUSIONES

El modelo numérico implementado en PML-Term demuestra una precisión excepcional al predecir temperaturas superficiales de pavimentos, validado mediante comparación con datos experimentales recogidos in situ durante cuatro días consecutivos. El coeficiente de determinación  $R^2 = 0.9979$  obtenido en la regresión lineal forzada al origen, junto con la coherencia visual en la dinámica térmica (Figura 2), confirma la robustez del esquema FTCS y la fidelidad en la replicación de los procesos de transferencia de calor (conducción, convección, radiación).

PML-Term supera las limitaciones de herramientas convencionales (SUPERPAVE, LTPP) al integrar datos climáticos reales en formato CSV y permitir el modelado personalizado de pavimentos multicapa (hasta 10 capas). Su interfaz gráfica intuitiva, combinada con funciones avanzadas como análisis paramétrico automático, extracción de datos a profundidades personalizadas y generación de reportes exportables, lo posiciona como una herramienta accesible para no expertos en la evaluación de estrategias de mitigación de ICU y optimización de diseños de pavimentos fríos.

La capacidad de PML-Term para simular el desempeño térmico de pavimentos modificados (altos albedo/emisividad) bajo condiciones climáticas reales lo convierte en un recurso estratégico para la toma de decisiones en urbanismo resiliente. Al cuantificar la reducción de calor sensible emitido a la atmósfera urbana, el software permite priorizar diseños que equilibren durabilidad, eficiencia energética y mitigación de ICU, contribuyendo directamente a la reducción del impacto ambiental en entornos urbanos.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el soporte financiero de UTN-FRLP. PC agradece la beca doctoral otorgada por CONICET.

## REFERENCIAS

- Abo-Hashema, M., Mousa, R., Al-Zedjali, S., Al Balushi, Q., Metwally, M., & Al-Rashdi, M. (s.f.). Development of Oman Performance Grade Paving Map for SUPERPAVE Asphalt Mix Design. doi:<https://www.ljmu.ac.uk/%7E/media/files/ljmu/about-us/faculties-and-schools/asphalt-conference/papers/asphalt/asphalt/doi-10,-d-,1515ijpeat20160033.pdf?la=en>
- Akbari, H., Levinson, R., & Stern, S. (2008). Procedure for measuring the solar reflectance of flat or curved roofing assemblies. *Solar Energy*, 82(7), 648-655. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2008.01.001>
- Alebraheem, J. (2017). Forward Time Centered Space Scheme for the Solution of Transport Equation. *International Annals of Science*, 2, págs. 1-5.
- ASTM E1918. (2006). Standard Test Method for Measuring Solar Reflectance of Horizontal and Low-Sloped Surfaces in the Field.
- ASTM E1933. (2006). Standard Test Methods for Measuring and Compensating for Emissivity Using Infrared Imaging Radiometers.
- Cabrera, P., Botasso, G., & Castro Luna, A. (2025). Contribution of an asphalt pavement modified with TiO<sub>2</sub> to the moderation of the Urban Heat Island (UHI). *DYNA*, 237(92), 80-88. doi:<https://dx.doi.org/10.15446/dyna.v92n237.119489>
- Correa, E., Flores Larsen, S., & Lesino, G. (2003). ISLA DE CALOR URBANA: EFECTO DE LOS PAVIMENTOS. INFORME DE AVANCE. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 11-25.
- Gong, X., Liu, Q., Lv, Y., Shuaichao, C., Wu, S., & Ying, H. (2023). A systematic review on the strategies of reducing asphalt pavement temperature. *Case Studies in Construction Materials*, 18. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01852>

- Martínez, A., López-Montero, T., Miró, R., & Villar, R. (2024). PAVIMENTOS REFLECTANTES PARA REDUCIR EL EFECTO DE LAS ISLAS DE CALOR URBANAS. *Memoria técnica XXII CILA de Granada*, (págs. 1489-1510).
- Pascual Muñoz, P., Castro-Fresno, D., Serrano-Bravo, P., & Alonso-Estebanez, A. (2013). Thermal and hydraulic analysis of multilayered asphalt pavements as active solar collectors. *Applied Energy*, 111, 324-332. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.05.013>
- Qin, Y., & Hiller, J. (2014). Understanding pavement-surface energy balance and its implications on cool pavement development. *Energy and Buildings*(85), 389-399. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.076>
- Qin, Y., Hiller, J., & Meng, D. (2019). Linearity between Pavement Thermophysical Properties and Surface Temperatures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 11(31). doi:[http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002890](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002890)
- Rivera, J. (2023). *Apuntes sobre pavimentos en vías de bajo volumen de tránsito - Tomo I*. Buenos Aires: edUTecNe.
- Saleh, A., & Trad, M. (2011). Generation of asphalt performance grading map for Egypt based on the SUPERPAVE program. *Construction and Building Materials*, 25, 2248-2253. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.009>
- Santamouris, M. (2013). Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island - A review of the actual developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*(26), 224-240. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.047>
- Wang, X., Li, S., Chen, P., Li, F., Hu, X., & Hua, T. (2022). Photocatalytic and antifouling properties of TiO<sub>2</sub>-based photocatalytic membranes. *materials today chemistry*, 23, 100650. doi:<https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2021.100650>

## **THERMAL SIMULATOR FOR URBAN PAVEMENTS WITH USER-FRIENDLY INTERFACE**

**ABSTRACT:** Predicting pavement surface temperatures is key to assessing how cool pavements contribute to mitigating urban heat islands, optimizing material durability, and improving energy efficiency in built environments. However, their complex interaction with climatic variables (solar radiation, wind, humidity) requires accessible numerical simulation tools capable of integrating real-world data and evaluating structural designs under multiple scenarios. This work addresses this challenge by developing an interactive program that combines an energy balance model (conductive, convective, and radiative flows) with an intuitive graphical user interface (GUI). The software, developed in Python, allows users to upload historical climate series in CSV format and simulate pavement thermal evolution, considering opto-thermal properties such as albedo, emissivity, thickness, density, thermal conductivity, and specific heat. The interface, designed for non-expert users, facilitates comparing multiple structural configurations and quantifying thermal sensitivity to changes in key variables. Validated with experimental data, the program emerges as a versatile tool for decision-making in climate-resilient urban design, reducing environmental impact and prioritizing solutions that balance technical performance and environmental sustainability.

**Keywords:** thermal modeling, urban heat island, graphical interface, sustainable pavements, Python.

## EVALUACIÓN FÍSICO-QUÍMICA Y ENERGÉTICA DE LA BIOMASA RESIDUAL DE PODA URBANA: CASO DEL MUNICIPIO DE AVELLANEDA

Sergio Cataldo<sup>1</sup>, M. Eyraz<sup>1</sup>, Melisa A. Silvestrini<sup>1</sup>, Jazmín C. Stivanello<sup>1</sup>, Vanina L. Marino<sup>1</sup>,  
Melisa D. Müller<sup>1</sup>, Vanina B. Forlini<sup>1</sup>, Melany G. Finn<sup>1</sup>, Nicole O'Keeffe<sup>1</sup>, Mayra Plaul<sup>12\*</sup>,  
Florencia E.

<sup>1</sup> Grupo de Investigación de Energías Renovables (GIDER), Departamento de Ambiente y Turismo,  
Universidad Nacional de Avellaneda

<sup>2</sup> Laboratorio de Ambiente, Departamento de Ambiente y Turismo, Universidad Nacional de  
Avellaneda \*e-mail: [fpaul@undav.edu.ar](mailto:fpaul@undav.edu.ar)

**RESUMEN:** El abastecimiento energético enfrenta un desafío constante debido al agotamiento de recursos fósiles y sus efectos ambientales nocivos. Este trabajo evalúa las características físicas y químicas de residuos de poda de la Ciudad de Avellaneda (Buenos Aires) para determinar su potencial de conversión en biocombustibles. Se realizaron muestreos entre mayo y agosto del 2019, bajo condiciones habituales de poda y chipeado. Los análisis de humedad muestran valores típicos de este tipo de residuo, aunque se observa una fracción adicional asociada a precipitaciones abundantes y a la exposición ambiental durante el almacenamiento del chip. El análisis inmediato indica que la composición de compuestos volátiles y carbono fijo es elevada, lo que resulta en valores aceptables de poder calorífico comparados con datos de biomasa residual reportados en la literatura. Sin embargo, el alto contenido de cenizas evidencia un exceso de corteza, reflejo de la ausencia de un proceso selectivo en la poda. Se estima que una selección más rigurosa en cuanto al diámetro y especie, podría mejorar las propiedades térmicas del material. Estos resultados aportan información relevante para el aprovechamiento energético de residuos de poda urbanos, favoreciendo la generación de biocombustibles y la reducción de impactos ambientales asociados a su disposición.

**Palabras clave:** Biomasa lignocelulósica, residuos de poda urbana, caracterización fisicoquímica, biocombustibles, energías renovables.

### INTRODUCCIÓN

Existe un importante desafío en lo relativo al abastecimiento de las necesidades energéticas de la sociedad moderna, ya que depende principalmente por combustibles fósiles, principalmente petróleo, carbón y gas natural (Demirbas, 2005). El consumo de combustibles no renovables, conlleva dos problemáticas principales: (i) su agotamiento, al tratarse de un recurso escaso y finito, y (ii) su significativo impacto ambiental derivado de las emisiones de gases de efecto invernadero (Sardón et al., 2003). Una alternativa es el uso de energías renovables, especialmente la biomasa (Canalis et al., 1998), cuyo aprovechamiento requiere cuantificar y caracterizar su disponibilidad a escala local, ya que ya identificación precisa potencial biomásico constituye el primer paso para evaluar la viabilidad técnica y económica de la generación de energía a partir de este recurso (Manrique et al., 2008).

El arbolado urbano cumple funciones ecológicas, estéticas y escénicas que mejoran la calidad ambiental y el bienestar poblacional. Aunque tradicionalmente se ha usado con fines ornamentales, actualmente también contribuye a la mitigación de la contaminación y la regulación microclimática. En este contexto, el árbol, según Jacinto (2001), es parte de un ecosistema forestal urbano.

El mantenimiento rutinario y los cambios en áreas verdes urbanas generan anualmente crecientes cantidades de residuos de poda, compuestos por biomasa lignocelulósica. Pocos estudios han evaluado



su potencial energético, aunque podrían contribuir a la diversificación hacia fuentes de energía renovable (García et al., 2014a, 2014b). Estos constituyen una fuente abundante pero subutilizada de biomasa, con potencial para fortalecer las bioeconomías regionales y nacionales (McKeever et al., 2003). El aprovechamiento eficiente de estos residuos podría generar combustibles biológicos para energía térmica o eléctrica (Quirno, 2003), ofreciendo beneficios como valorización de recursos locales, diversificación energética, sustitución parcial de combustibles fósiles y reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. También favorecería la creación de empleo, disminuiría los residuos enviados a rellenos sanitarios y reduciría los costos de disposición final (MacFarlane, 2009).

El volumen y las características de los residuos lignocelulósicos dependen de la especie, tipo y frecuencia de poda, entre otros factores (Saiz de Omeñaca et al., 2004). Solo un porcentaje reducido se recupera, mientras que la mayoría termina en rellenos sanitarios; el resto se destina a compostaje, reciclaje u otros usos (McKeever et al., 2003).

Los estudios existentes se centran principalmente en el aprovechamiento de residuos agrícolas y forestales. La falta de información sobre sus propiedades físico-químicas limita la evaluación de su potencial energético y los beneficios sociales derivados, por ello una caracterización completa es clave para determinar la viabilidad del uso de estos residuos en procesos de termoconversión (González-Barragán et al., 2007). Las tecnologías de termoconversión dependen de las características y calidad de la biomasa; a menor homogeneidad y calidad del combustible, mayor complejidad requiere el sistema de conversión (Basu, 2018). Por ello, el primer paso en la evaluación de un combustible sólido es su caracterización detallada, para determinar sus propiedades, aplicaciones potenciales y posibles impactos ambientales (Saidur et al., 2011).

En el Partido de Avellaneda, los residuos de poda urbana se destinan casi en su totalidad a disposición final, empleándose sólo una pequeña fracción en compostaje para el vivero municipal. Estudiar sus características y posibilidades de aprovechamiento mediante métodos de transformación podría reducir el impacto ambiental y favorecer la diversificación energética con beneficios sociales locales. Sin embargo, persisten interrogantes sobre la disponibilidad de residuos de poda urbana y su aprovechamiento energético, especialmente a escala local, donde el potencial de la biomasa lignocelulósica puede evaluarse de manera más práctica.

## **OBJETIVOS**

### ***Objetivo General***

El objetivo principal de esta investigación es evaluar las características físico-químicas de la biomasa lignocelulosa derivada de los residuos de la poda urbana de la Ciudad de Avellaneda, Provincia de Buenos Aires, con el fin de evaluar el potencial energético para su conversión en biocombustibles.

### ***Objetivos Específicos***

- a.** Determinar las propiedades físicas de la biomasa proveniente de la poda arbórea, en particular, el contenido de humedad.
- b.** Determinar las propiedades químicas de la biomasa proveniente de la poda arbórea a partir de su análisis inmediato.
- c.** Determinar las propiedades energéticas de la biomasa.

## **METODOLOGÍA**

El Partido de Avellaneda, situado en el Área Metropolitana de Buenos Aires (AMBA), presenta una amplia cobertura arbórea y una notable diversidad de especies. Según el censo de 2012, las quince especies predominantes, principalmente Fresno (*Fraxinus* spp.), Plátano (*Platanus* spp.), Ligustro (*Ligustrum* spp.) y Ficus (*Ficus* spp.), constituyen aproximadamente el 60% del total. La poda de los árboles urbanos dentro del Municipio se realiza durante los meses de mayo y agosto, y esta operación se lleva a cabo sin criterios de selección de especies ni planificación previa establecida. Los residuos de poda generados se recolectan y se envían a un punto de acopio, donde son aislados, obteniéndose partículas de distintos tamaños y mezclas. Ya que no hay un programa selectivo de poda y que la

información sobre rutas de corte se determina el mismo día, se optó por realizar el muestreo tomando el material en las condiciones de acopio, una vez astillado, preservando sus características originales sin ningún tipo de modificación adicional.

La metodología de muestreo siguió la Norma ASTM 5231-92 (2016) para residuos urbanos, con el fin de obtener muestras representativas de las especies del censo de arbolado urbano de 2012. El muestreo se realizó quincenalmente entre mayo y agosto de 2019, recolectando 18 muestras ( $n = 18$ ), de las cuales se evaluaron los siguientes parámetros:

#### ***Contenido de humedad***

El contenido de humedad es un parámetro de especial relevancia en cualquier proceso de aprovechamiento energético, ya que su presencia disminuye el poder calorífico de la biomasa, afectando el rendimiento óptimo del proceso. Por ejemplo, en la combustión, un contenido de humedad mayor al 50% afectaría el encendido de la biomasa (Mulky y Niemeyer, 2019). Por ello, resulta imprescindible una caracterización adecuada, considerando diversos factores, como la humedad intrínseca, que es propia de la biomasa y la extrínseca que dependen de las condiciones climáticas, de cosecha y transporte del material, ya que un alto contenido de agua favorece la respiración microbiana, lo cual podría alterar la calidad química y física del combustible.

Según la especificación técnica UNE-CEN/TS 14774-3 (2010) las muestras se secaron en estufa a  $105 \pm 2$  °C durante 24 h hasta alcanzar masa constante, pesándose antes y después del secado.

#### ***Determinación del contenido de materia volátil***

La materia volátil corresponde a los compuestos liberados durante la descomposición termoquímica de la biomasa, incluyendo gases combustibles ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{C}_x\text{H}_y$ ) e inertes ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ ). Constituye la fracción más representativa de la biomasa (75–90%), facilitando su encendido a temperaturas relativamente bajas ( $\sim 350$  °C) en comparación con el carbón (Grotkjær et al., 2003).

El contenido de materia volátil se determinó siguiendo el método descrito en la norma UNE-CEN/TS 15148 (2010). Una porción de la muestra se calentó en ausencia de aire a  $900 \pm 10$  °C durante 7 minutos. El porcentaje de materia volátil se calculó a partir de la pérdida de masa de la muestra, descontando previamente la pérdida atribuible a la humedad.

#### ***Determinación del contenido de ceniza***

El contenido de ceniza representa la fracción inorgánica del combustible tras la combustión completa y es fundamental para cuantificar residuos y evaluar la eficiencia térmica, ya que absorbe energía durante la combustión (Saidur et al., 2011). Además, su análisis permite estudiar posibles efectos corrosivos y formación de escoria en equipos a altas temperaturas (Núñez et al., 2016). El contenido de ceniza varía según especie, tejido y condiciones de crecimiento, afectando el potencial energético y la generación de residuos (Puri et al., 2024). En especies leñosas como álamo y sauce, oscila entre 0,9–4,7 % y 1,5–4,3 % respectivamente (Kutsokon et al., 2022), mientras que residuos agrícolas lignocelulósicos, como la cáscara de arroz, pueden alcanzar hasta 20 % (Maj et al., 2025).

La determinación se realizó incinerando la muestra seca a 550 °C durante 3 a 4 h, seguido de enfriamiento en desecador y pesaje a temperatura ambiente según UNE-CEN/TS 14475 (2010).

#### ***Determinación del carbono fijo***

El carbono sólido (carbono fijo) es el que permanece tras la liberación de los componentes volátiles durante la combustión (Seijas et al., 2014) y constituye la principal fuente de generación de calor, contribuyendo significativamente al poder calorífico del biocombustible sólido (Onochie et al., 2017). Se determina de manera indirecta como (Ec.1):

$$\%C_{fijo} = 100 - (\%Cenizas + \%Materia\ volátil) \quad (1)$$

donde  $\%C_{fijo}$  corresponde al contenido total de carbono fijo de la muestra,  $\%Ceniza$  indica el porcentaje de cenizas calculado para dicha muestra y  $\%Materia\ volátil$  representa el contenido de materia volátil.

### ***Determinación del poder calorífico***

El poder calorífico representa la energía liberada por la combustión completa de una unidad de masa o volumen del combustible (Quirino, 2005), expresándose en MJ/kg para sólidos, MJ/L para líquidos y MJ/Nm<sup>3</sup> para gases, y depende de la composición química y del contenido de humedad de la biomasa (Noqueira, 2007; Vieira, 2012). El poder calorífico superior (PCS) corresponde a la combustión a volumen constante, con condensación del agua formada, mientras que el poder calorífico inferior (PCI) se determina a presión constante, sin condensación, siendo menor que el PCS (Santos, 2012). Ambos son propiedades clave para seleccionar procesos termoquímicos (Vieira, 2012).

El PCS se determinó indirectamente mediante correlación a partir de cenizas, volátiles, carbono fijo y humedad (Parikha, 2005; Nhuchhen, 2012) (Ec.2):

$$PCS = 0,3536 FC + 0,1559 VM - 0,0078 Ash \text{ (MJ/kg)} \quad (2)$$

donde FC es carbono fijo, VM materia volátil y Ash cenizas, todos en base seca. Los valores experimentales de estas fracciones se emplearon para estimar el PCS, con un error absoluto medio de 3,74 % y sesgo de 0,12 % (Parikha, 2005).

## **RESULTADOS**

Debido a la ausencia de un proceso de poda selectivo y de una planificación previa, se considera que los análisis efectuados son representativos únicamente de las especies arbóreas predominantes en el municipio, y no reflejan la totalidad del arbolado urbano.

*Tabla 1: Resumen de los resultados obtenidos para cada uno de los análisis realizados.*

| Muestra | Fecha del Muestreo | Porcentaje de Humedad (%) | Porcentaje de Cenizas (%) | Porcentaje de Volátiles (%) | Carbono Fijo (%) | Poder calorífico (Kcal/kg) |
|---------|--------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------------|------------------|----------------------------|
| M1      | 15/6/2019          | 43,87                     | 4,90                      | 69,13                       | 25,97            | 4758,31                    |
| M2      | 15/6/2019          | 42,70                     | 4,90                      | 70,15                       | 24,95            | 4710,00                    |
| M3      | 15/6/2019          | 41,22                     | 5,83                      | 73,00                       | 21,17            | 4495,38                    |
| M4      | 29/6/2019          | 45,96                     | 13,38                     | 72,15                       | 14,48            | 3884,34                    |
| M5      | 29/6/2019          | 45,26                     | 12,74                     | 71,28                       | 15,98            | 3979,99                    |
| M6      | 29/6/2019          | 47,88                     | 13,14                     | 70,22                       | 16,64            | 3995,30                    |
| M7      | 6/7/2019           | 27,73                     | 15,08                     | 74,91                       | 10,01            | 3607,06                    |
| M8      | 6/7/2019           | 26,65                     | 15,79                     | 76,12                       | 8,09             | 3488,34                    |
| M9      | 6/7/2019           | 29,30                     | 14,08                     | 76,38                       | 9,54             | 3623,65                    |
| M10     | 13/7/2019          | 29,41                     | 12,01                     | 74,92                       | 13,07            | 3871,52                    |
| M11     | 13/7/2019          | 36,63                     | 12,98                     | 75,41                       | 11,61            | 3764,67                    |
| M12     | 13/7/2019          | 38,12                     | 16,43                     | 72,99                       | 10,58            | 3581,03                    |
| M13     | 3/8/2019           | 29,35                     | 5,84                      | 77,78                       | 16,39            | 4269,14                    |
| M14     | 3/8/2019           | 25,77                     | 7,87                      | 77,14                       | 14,98            | 4123,24                    |
| M15     | 3/8/2019           | 25,87                     | 6,64                      | 77,56                       | 15,80            | 4210,17                    |
| M16     | 13/8/2019          | 30,58                     | 8,67                      | 77,39                       | 13,94            | 4043,11                    |
| M17     | 13/8/2019          | 26,27                     | 11,80                     | 77,55                       | 10,66            | 3765,59                    |
| M18     | 13/8/2019          | 25,78                     | 11,61                     | 77,56                       | 10,83            | 3781,36                    |

En este contexto, se presentan a continuación los resultados obtenidos para cada uno de los análisis realizados (Tabla 1).

### ***Determinación del contenido de humedad***

De acuerdo con lo expuesto por Lehtikangas (2017) un elevado contenido de humedad influye directamente con el poder calorífico de la biomasa y por consiguiente en la eficiencia del proceso de combustión y la temperatura que se pueda alcanzar. Por el contrario, niveles reducidos de humedad permiten aumentar la eficiencia y el rendimiento de la combustión (Seijas et al., 2014).

En el análisis del contenido de humedad expuesto en la Figura 1 se observan variaciones significativas, con valores promedio de 34,35%, por encima de lo esperado para este tipo de residuo, cuyos valores medios oscilaron entre 11,8-12,3% antes del proceso de compactación (Smith et al., 2019) o incluso 7,1% para ramas de árboles, tales como roble, álamo y eucalipto (García et al., 2012). Estas diferencias pueden atribuirse a las condiciones ambientales a las que se encuentran expuestas los residuos de poda, donde parte de esta humedad debe considerarse extrínseca (García et al., 2012), así como a la ausencia de un proceso de poda selectiva, encontrándose una mezcla de ramas pequeñas y hojas que aumenta el contenido de humedad.

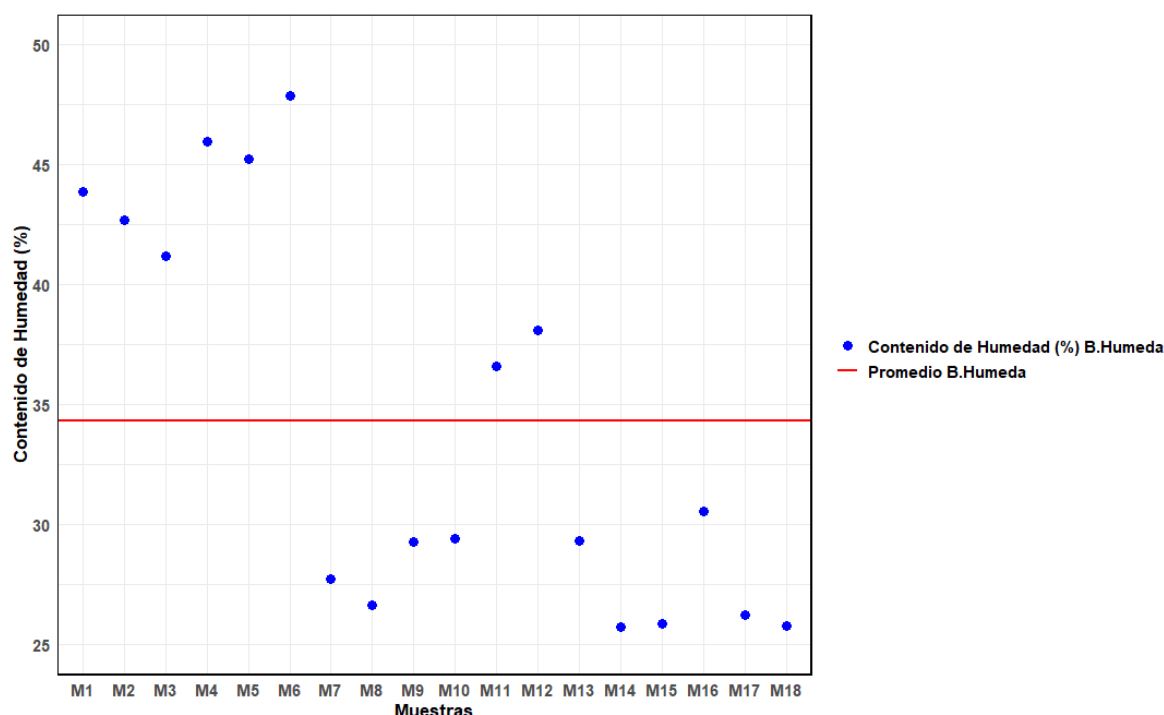


*Figura 1: Contenido de humedad*

### ***Determinación del contenido de materia volátil***

El contenido de materia volátil influye directamente en la velocidad de combustión, puesto a que un mayor contenido de material volátil en la biomasa, mayor es la inflamabilidad del biocombustible sólido (Lukmandaru et al., 2017). Los resultados obtenidos en el análisis presentado en la Figura 2 para el contenido de materia volátil se encuentran dentro del límite inferior del rango de valores presentados por Brito y Barrichelo (1978) para residuos de madera con potencial de densificación, que se encuentran entre 74,10% y 89,90%. Por otro lado, los valores promedio observados por Smith et al. (2019) al evaluar los residuos de poda urbana para la fabricación de briquetas (74,73%) coinciden con los obtenidos en este trabajo y presentan características similares. Algo similar reporta García et al. (2012) quien encuentra valores del 77,7% para residuos de poda de árboles.



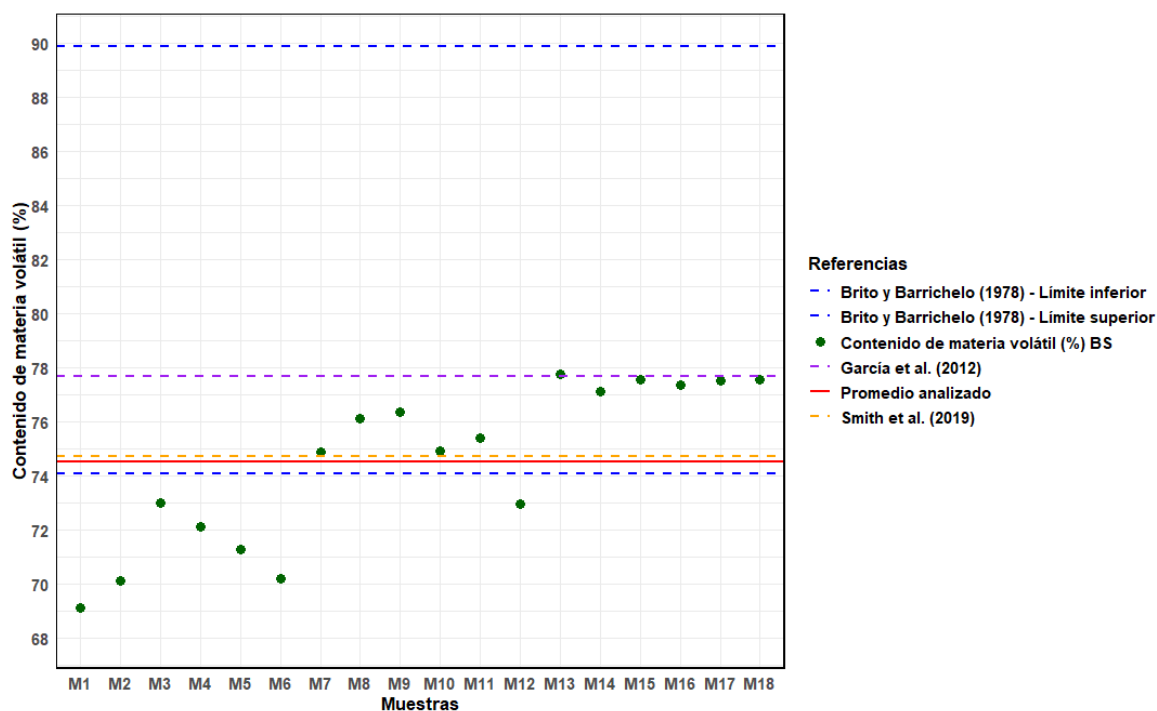


Figura 2: Contenido de materia volátil

En comparación con los datos mencionados, el valor reportado en este estudio indica un alto porcentaje de volatilidad (>70%), permitiendo que la biomasa arda con gran facilidad, consiguiendo temperaturas elevadas durante el proceso de combustión y finalmente generando una llama de mayor longitud.

Si consideramos que los materiales volátiles presentes en el combustible son responsables de gran parte del suministro de energía durante la combustión, su análisis también permite estimar las formas de energía que pueden liberarse a partir del material. Sin embargo, se debe considerar que estos compuestos promueven una combustión muy rápida del combustible, por ello se debe evaluar un proceso de densificación que reduzca la superficie expuesta, ralentizando la velocidad de las reacciones y optimizando el tiempo de aporte energético durante la combustión.

#### **Determinación del contenido de cenizas**

El material de poda urbana analizado presentó un alto valor de contenido de cenizas con un promedio de 10,76%, lo que puede explicarse por la presencia de contaminantes, tales como suciedad, polvo y arena, que probablemente se mezclan con el material durante la recolección. Según Fernández-Puratich (2014) el porcentaje de cenizas en la biomasa leñosa de fuste presenta porcentajes de cenizas de aproximadamente 1,8%, algo menor respecto al valor que presentan las ramas con hojas (3,2%). En el estudio de Smith et al. (2019) el valor de cenizas alcanza un promedio del 9,57%, mientras que García et al. (2012) reporta valores semejantes a los obtenidos en este análisis, con promedios de 12,1%.

Es importante considerar el contenido de cenizas en los residuos de poda urbana como un parámetro relevante. Zajac et al. (2018), al analizar las cortezas, observan que el contenido de cenizas aumenta significativamente, lo que sugiere que dicho incremento podría estar asociado al mayor contenido de corteza en el árbol. Según esto se puede inferir que los valores analizados tan elevados corresponden a una falta de selectividad en el proceso de poda, que probablemente incluye una elevada proporción de hojas y ramas pequeñas, donde la corteza predomina. Además, la mezcla con otros inorgánicos en su traslado y las condiciones de estacionamiento, los niveles de contaminación del suelo, la forma de recolección y el transporte de las ramas constituyen una serie de factores determinantes en el incremento del contenido de cenizas (Cerdeira, 2015).

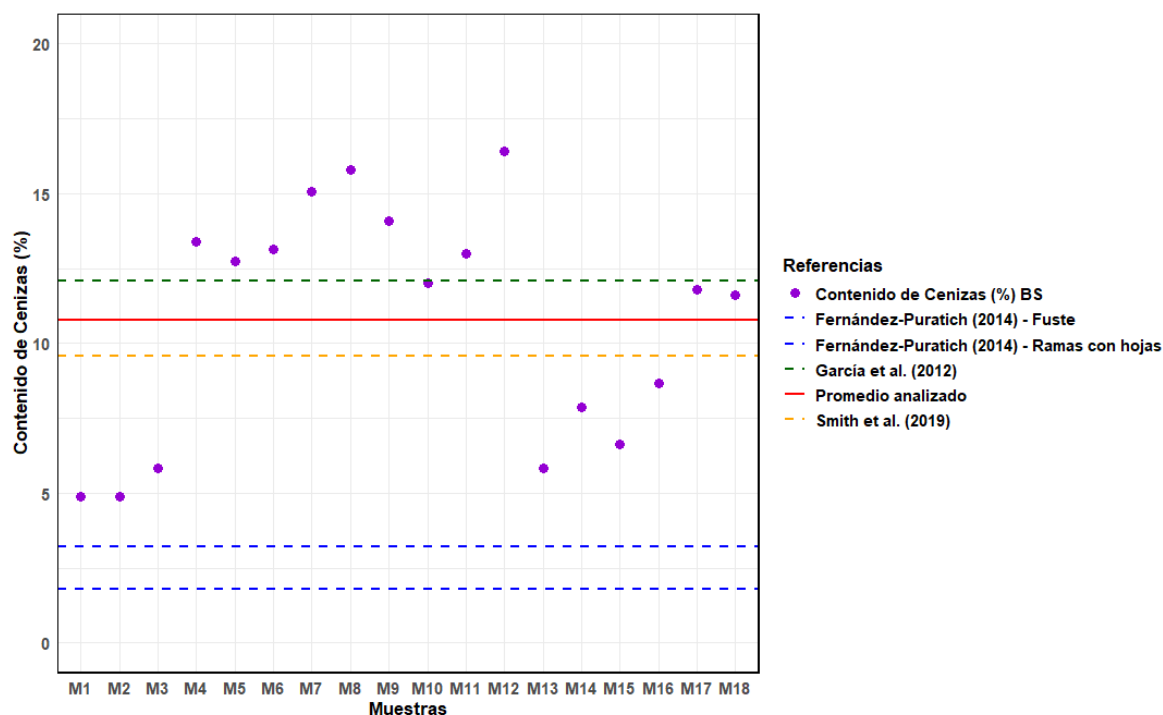


Figura 3: Contenido de cenizas

### Carbono Fijo

Los combustibles con mayores niveles de carbono fijo son deseables debido a las características de las reacciones que ocurren bajo su influencia, tales como una mayor liberación de energía durante la combustión y, en general, una mayor resistencia térmica de los combustibles, lo que favorece una combustión más lenta.

Tabla 1: Valores de Carbono fijo (%) reportados por la bibliografía

| Tipo de biomasa                    | Valores reportado (%) | Referencia           |
|------------------------------------|-----------------------|----------------------|
| Residuos lignocelulósicos          | 15-25                 | García et al. (2012) |
| Aulaga ( <i>Genista scorpius</i> ) | 55                    | García et al. (2012) |
| Carbón vegetal                     | 70                    | García et al. (2012) |
| Residuo de poda                    | 16,69                 | Smith et al. (2019)  |
| Ramas                              | 8,4                   | Tauro et al. (2022)  |
| Ramas con hojas                    | 12,4                  | Tauro et al. (2022)  |

En este estudio, los valores obtenidos, presentados en la Figura 4, varían entre 8,09% y 25,97% dependiendo de la variabilidad del contenido de cenizas y materia volátil. De acuerdo con el estudio de Smith et al. (2019), el valor de carbono fijo para poda urbana alcanza un promedio del 16,69%. En contraste, García et al. (2012) reportan valores para distintos residuos lignocelulósicos que en su mayoría se sitúan entre 15-25%, con casos excepcionales de hasta 55% en aulaga y 70% en carbón vegetal. De forma complementaria, Tauro et al. (2022) informaron valores de carbono fijo del 8,4% en ramas y del 12,4% en ramas con hojas de aguacate, lo que evidencia la variabilidad de este parámetro según la fracción de biomasa analizada. En conjunto, estos resultados (Tabla 1) muestran que los valores obtenidos en el presente análisis se encuentran dentro del rango esperado para este tipo de biomásas.

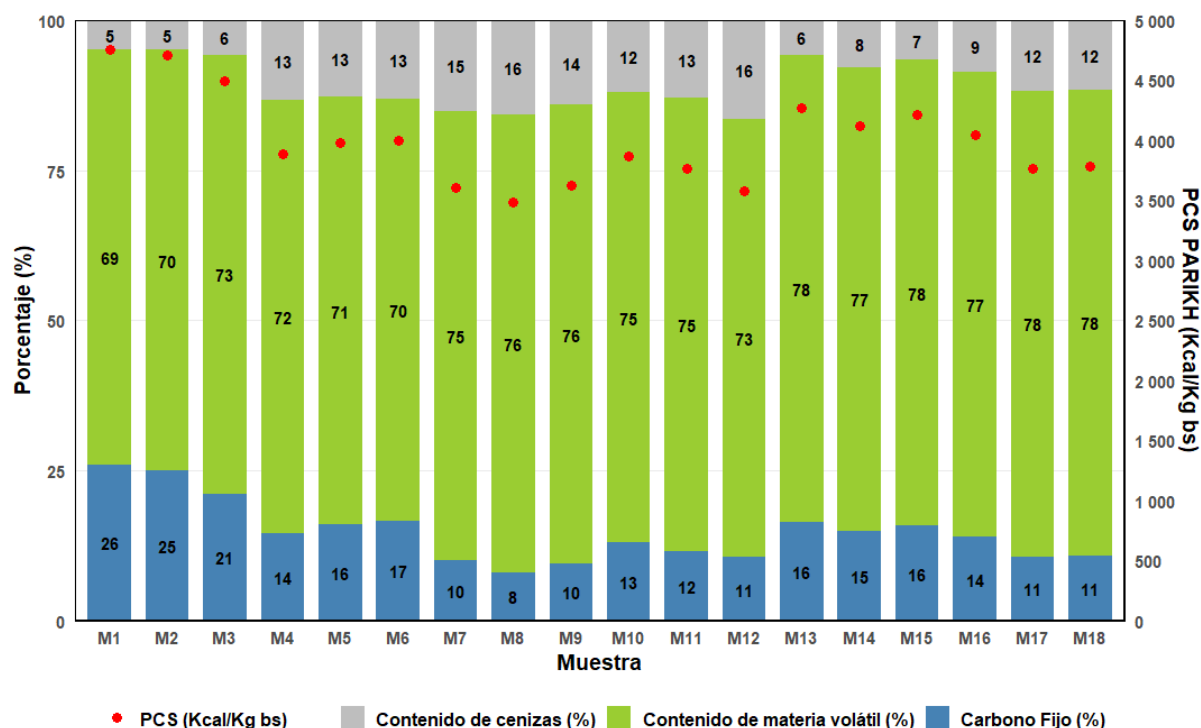


Figura 4: Variación del poder calorífico con contenido de cenizas y carbono fijo

#### Determinación del Poder calorífico

El poder calorífico contenido en los biocombustibles, como se observa en la Figura 4, está condicionado principalmente por parámetros como el contenido de ceniza, la humedad y el carbono fijo. En general, a mayor generación de cenizas, menor es la capacidad energética alcanzada. Esto se evidencia en la muestra M8, que, con un valor de 3488,34 Kcal/kg, presenta una elevada proporción de cenizas que limita su rendimiento energético. Por el contrario, un poder calorífico mayor (M1: 4758,31 Kcal/kg) se relaciona con la generación mínima de ceniza (Seijas S, y otros, 2014). De manera similar, la capacidad energética se ve influenciada por el contenido de carbono fijo, reflejándose en el mayor valor para la muestra M1, que presenta el máximo contenido de carbono fijo (25,97%), mientras que la muestra M8, con el contenido más bajo de carbono fijo (8,09%), exhibe una capacidad energética significativamente inferior.

En la Figura 5 se observa la variación del poder calorífico superior (PCS), calculado a partir de los resultados obtenidos en este trabajo mediante la correlación propuesta por Parikh (2005). Se han alcanzado valores promedio de 3997,34 Kcal/kg, que superan a los reportados por Ibarra et al. (2017) para el mismo residuo, donde alcanzan valores de 3771,38 Kcal/kg. El estudio de Smith et al. (2019) que evaluó el PCS de residuos de poda, registró valores de 4.702,63 Kcal/kg, los cuales son superiores a los reportados por García et al. (2012), con un promedio de 4.100,98 Kcal/kg.

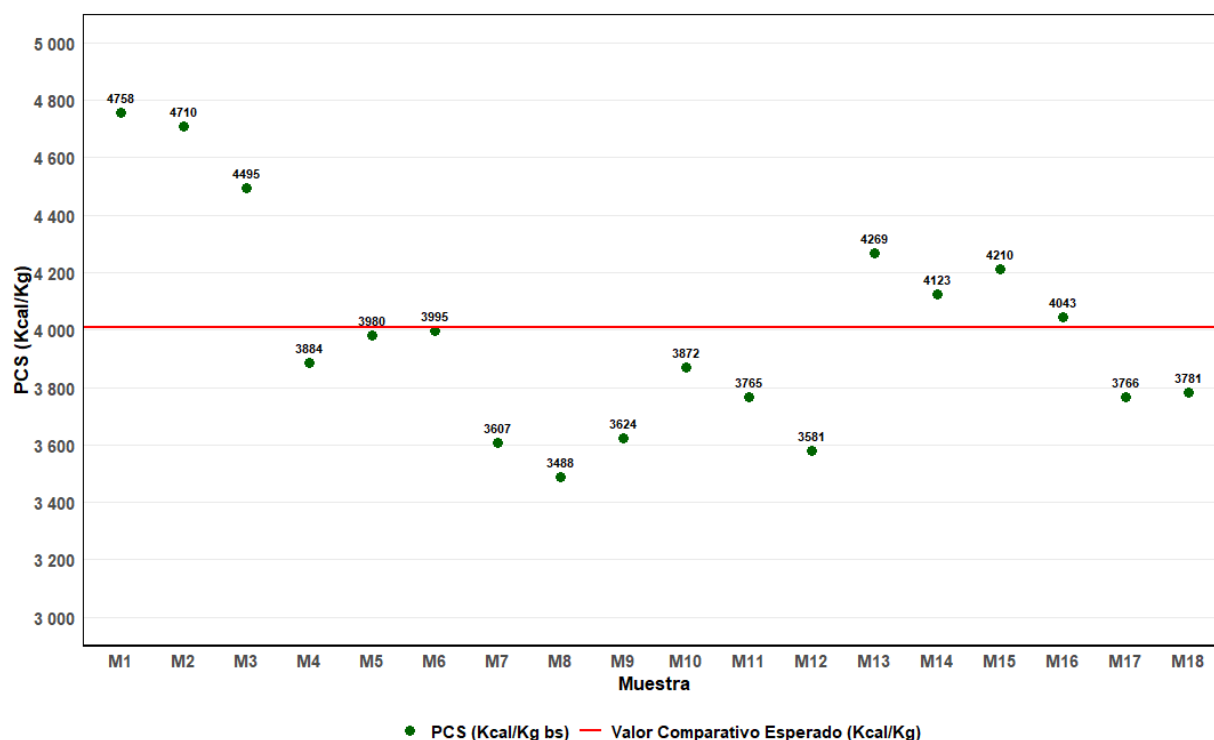


Figura 5: Determinación del poder calorífico superior

En este sentido, los resultados de esta investigación muestran un grado de eficiencia aceptable y se alinean con lo señalado por Rodríguez-Rivas (2009), quien indica que el poder calorífico de la biomasa depende de su composición, tanto anatómica como química. Así, las fracciones más leñosas tienden a presentar un mayor poder calorífico debido a su mayor contenido de lignina y una mayor densidad. Mientras que las hojas, aunque en algunos casos muestran valores elevados por la presencia de aceites esenciales y compuestos volátiles como taninos y terpenos, suelen contribuir a una disminución del poder calorífico global cuando se incorporan en proporción significativa a la biomasa combustible (Rodríguez-Rivas, 2009), lo que explica la tendencia a la disminución del PC cuando se incorporaron muestras con este tipo de residuos.

## CONCLUSIONES

Los residuos de poda urbana analizados presentan valores elevados de contenido de cenizas y humedad, lo cual limita su aptitud para la producción directa de astillas o pellets con calidad óptima. Por ello, sería conveniente implementar una gestión de la poda que contemple no solo la selectividad de especies sino también una mejora del proceso de recolección. En este sentido, resulta necesario discriminar el material según el tamaño de las ramas, eliminar las hojas y asegurar un manejo cuidadoso durante el traslado y almacenamiento. Además, se debe evitar la incorporación de materiales inertes y garantizarse un adecuado proceso de secado natural, con el fin de minimizar la humedad extrínseca. Respecto a los valores del poder calorífico obtenidos, se podría considerar que el margen en el que se encuentran es aceptable en comparación con datos reportados en la literatura para biomasa residual. Sin embargo, estos valores lograrían verse mejorados si se tiene en cuenta las condiciones anteriormente planteadas.

Finalmente, consideramos imprescindible realizar otros estudios experimentales que permitan determinar con mayor precisión el poder calorífico de la biomasa bajo condiciones óptimas, considerando solamente las especies predominantes de la zona, tomando muestras de ramas sin hojas y aquellas en cuyo diámetro predomine el material leñoso sobre la corteza. Esto aportará un panorama más claro para la toma de decisiones respecto al proceso de termoconversión y de gestión de la poda urbana, contribuyendo a una valorización energética más eficiente y sostenible.

## FUENTES DE FINANCIAMIENTO

El proyecto se desarrolló dentro del Programa de Reconocimiento y Estímulo Institucional de Investigaciones Científicas y Artísticas (PRIICA) que corresponden a proyectos sin financiamiento.

## AGRADECIMIENTOS

Los agradecimientos se destinan a las autoridades del Departamento de Ambiente y Turismo quienes facilitaron los equipos y material del laboratorio para realizar los ensayos correspondientes.

## REFERENCIAS

- Adegoke O. A., Fuwape J. A., Fabiyi J. S., Combustion Properties of Some Tropical Wood Species and Their Pyrolytic Products Characterization, Energy and Power, Vol. 4 No. 3, 2014, pp. 54-57. doi: 10.5923/j.ep.20140403.02.
- ASTM International. (2016). Standard test method for determination of the composition of unprocessed municipal solid waste (ASTM D5231-92). <https://doi.org/10.1520/D5231-92R16>
- Basu, P. (2018). Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction: practical design and theory. Academic press.
- Brite, J. O., & Barrichello, L. E. G. (1978). Características do eucalipto como combustível: Análise química imediata da madeira e da casca. IPEF, 16, 63-70.
- Canalis, P., Royo, J., & Tapia, R. (1998). La combustión: Una alternativa para la utilización de la biomasa residual. Fundación Circe, Universidad de Zaragoza, 1-8.
- Carmona Cerda, R. J. (2015). Caracterización física, química y energética de biomasa leñosa como materia prima biocombustible (Tesis doctoral). Universidad de Córdoba.
- Demirbas, A. (2005). Potential applications of renewable energy sources: Biomass combustion problems in boiler power systems and combustion related environmental issues. Progress in Energy and Combustion Science, 31(2), 171-192. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2005.02.002>
- García, R., Pizarro, C., Lavín, A. G., & Bueno, J. L. (2012). Characterization of Spanish biomass wastes for energy use. Bioresource Technology, 103, 249-258. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.10.004>
- García, R., Pizarro, C., Lavín, A. G., & Bueno, J. L. (2014). Spanish biofuels heating value estimation. Part I: Ultimate analysis data. Fuel, 117, 1130-1138. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.08.048>
- González-Barragán, I., López Torres, D., Alonso, M. A., & Arias, M. (2007). Aprovechamiento energético de sarmientos en calderas de biomasa mediante peletizado. Agricultura, 7, 806-811.
- Grotkjær, T., Dam-Johansen, K., Jensen, A. D., & Glarborg, P. (2003). An experimental study of biomass ignition. Fuel, 82(7), 825-833. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(02\)00369-1](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(02)00369-1)
- Fernández-Puratich, Harald, Oliver-Villanueva, José Vicente, Valiente, Mireya, Verdú, Salvador, & Albert, Nuria. (2014). Desarrollo de pellets a partir de tres especies leñosas bajo condiciones mediterráneas. Madera y bosques, 20(3), 97-111.
- Ibarra, J., & Rueda Ordoñez, Y. J. (2017). Biomass densification: A review of the current state-of-the-art of the pellet market and analysis of new research trends. TECCIENCIA, 12(23), 81-92. <https://doi.org/10.18180/tecciencia.2017.23.10>
- Jacinto, J. M. M. (2001). Análise silvicultural urbana de seis espécies florestais utilizadas na arborização de Brasília. (Dissertação de mestrado). Universidade de Brasília, Brasília.
- Khan, A., De Jong, W., Jansens, P. J., & Spliethoff, H. (2009). Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies. Fuel Processing Technology, 90(1), 21-50. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2008.07.012>
- Kutsokon, N., Rakhmetov, D., Rakhmetova, S., Khudolieieva, L., & Rashydov, N. (2022). Nursery screening of poplar and willow clones for biofuel application in Ukraine. iForest, 15, 401-410. <https://doi.org/10.3832/for3732-015>
- Lukmandaru, G., & Hidayah, R. N. (2017). Studi mutu kayu jati di hutan rakyat Gunungkidul VI: Kadar zat anorganik dan keasaman. Jurnal Ilmu Kehutanan, 11(1), 63-75. <http://dx.doi.org/10.22146/jik.24901>

- MacFarlane, D. W. (2009). Potential availability of urban wood biomass in Michigan: Implications for energy production, carbon sequestration, and sustainable forest management in the U.S.A. *Biomass and Bioenergy*, 33(5), 628–634. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.10.004>
- Maj, I., Niesporek, K., Płaza, P., Maier, J., & Łój, P. (2025). Biomass ash: A review of chemical compositions and management trends. *Sustainability*, 17(11), 4925. <https://doi.org/10.3390/su17114925>
- Manrique, S., Franco, J., Núñez, V., & Seghezzo, L. (2008). Potencial energético de biomasa residual de tabaco y ají en el municipio de Coronel Moldes (Salta, Argentina). *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 12. Salta, Argentina.
- McKeever, D. B., & Skog, K. E. (2003). Urban tree and wood yard residues: Another wood resource. Research Note FPL-RN-0290. USDA Forest Service, Forest Products Laboratory. <https://doi.org/10.2737/FPL-RN-290>
- Mulky, T. C., & Niemeyer, K. E. (2019). Computational study of the effects of density, fuel content, and moisture content on smoldering propagation of cellulose and hemicellulose mixtures. *Proceedings of the Combustion Institute*, 37(3), 4091–4098. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.06.164>
- Nunes, L. J. R., Matias, J. C. O., & Catalão, J. P. S. (2016). Biomass combustion systems: A review on the physical and chemical properties of the ashes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 235–242. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.08.053>
- Nhuchhen, D. R., & Abdul Salam, P. (2012). Estimation of higher heating value of biomass from proximate analysis: A new approach. *Energy*, 47(1), 520–528. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.04.015>
- Nogueira, M. F. M. (2007). Biomassa energética: Caracterização da biomassa. Palestra proferida na I Escola de Combustão, Florianópolis – SC.
- Onochie, U. P., Obanor, A. I., Aliu, S. A., & Ighodaro, O. O. (2017). Proximate and ultimate analysis of fuel pellets from oil palm residues. *Nigerian Journal of Technology (NIJOTECH)*, 36(3), 987–990. <http://dx.doi.org/10.4314/njt.v36i3.44>
- Paula, L. E. R., Trugilho, P. F., Renzende, R. N., Assis, C. O., & Baliza, A. E. R. (2010). Produção e avaliação de briquetes de resíduos lignocelulósicos. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 31(66), 103–110.
- Parikh, J., Channiwala, S. A., & Ghosal, G. K. (2005). A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. *Fuel*, 84(5), 487–494. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.10.010>
- Puri, L., Hu, Y., & Naterer, G. (2024). Critical review of the role of ash content and composition in biomass pyrolysis. *Frontiers in Fuels*, 2, 1378361. <http://dx.doi.org/10.3389/ffuel.2024.1378361>
- Quirino, W. F. (2003). Utilização energética de resíduos vegetais. Brasília: LPF/IBAMA.
- Rodríguez-Rivas, A. (2009). Estudios de valoración energética de combustibles forestales para la prevención de incendios forestales en la Sierra de la Primavera (Jalisco, México) mediante calorimetría de combustión y ensayos de inflamabilidad. Santiago de Compostela: Universidade. Servizo de Publicacions e Intercambio Científico.
- Saidur, R., Abdelaziz, E. A., Demirbas, A., Hossain, M. S., & Mekhilef, S. (2011). A review on biomass as a fuel for boilers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(5), 2262–2289. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.015>
- Saiz de Omeñaca, J. A., & Prieto Rodríguez, A. (2004). *Arboricultura urbana*. Madrid: CEDEX, D.L.
- Santos, J. R. S. (2012). Estudo da biomassa torrada de resíduos florestais de eucalipto e bagaço de cana-de-açúcar para fins energéticos [Tesis de maestría, USP]. Piracicaba.
- Sardón, J., García, F., & Fernández, J. (2003). Energías renovables para el desarrollo. Cooperación Internacional. Editorial Thomson y Paraninfo, 186–260.
- Seijas, S., Seijas, P., Seijas, N., Chávez, A., Salgado, L., & Alva, M. (2014). Optimización del proceso de densificación de desechos lignocelulósicos para la conformación de pellets energéticos. *Ciencia para el desarrollo*, 17(1), 73–80.
- Smith, A. K. de G., Alesi, L. S., Varanda, L. D., Silva, D. A. da, & Santos, L. R. O. (2019). Production and evaluation of briquettes from urban pruning residue and sugarcane bagasse. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 23(2), 138–143. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v23n2p138-143>
- Tauro, R., Velázquez-Martí, B., Manrique, S., Ricker, M., Martínez-Bravo, R., Ruiz-García, V. M., Ramos-Vargas, S., Masera, O., Soria-González, J. A., & Armendáriz-Arnez, C. (2022). Potential use

- of pruning residues from avocado trees as energy input in rural communities. *Energies*, 15(5), 1715. <https://doi.org/10.3390/en15051715>
- UNE-CEN/TS 14774-3. (2010). Biocombustibles sólidos. Métodos para la determinación del contenido de humedad.
- UNE-CEN/TS 14475. (2010). Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido de cenizas.
- UNE-CEN/TS 15148. (2010). Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido de materias volátiles.
- Vale, A. T., Mendes, R. M., Amorim, M. R. S., & Dantas, V. F. S. (2011). Potencial energético da biomassa e carvão vegetal do epicarpo e da torta de pinhão manso (*Jatropha curcas*). *Cerne*, 17(2), 267–273.
- Vieira, C. A. (2012). Caracterização da biomassa proveniente de resíduos agrícolas. UNIOESTE - Programa de Pós-Graduação em Energia na Agricultura. Paraná.
- Zajac, G., Szyszlak-Bargłowicz, J., Gołbiowski, W., & Szczepanik, M. (2018). Chemical characteristics of biomass ashes.

### **PHYSICOCHEMICAL AND ENERGY CHARACTERIZATION OF RESIDUAL BIOMASS FROM URBAN TREE PRUNING: A CASE STUDY IN THE MUNICIPALITY OF AVELLANEDA**

**ABSTRACT:** The global energy sector faces persistent challenges stemming from the depletion of fossil fuel reserves and the adverse environmental impacts associated with their exploitation. This study characterizes the physicochemical properties of lignocellulosic pruning residues generated in the City of Avellaneda (Buenos Aires, Argentina) to assess their suitability for conversion into biofuels. Sampling was conducted between May and August 2019 under standard pruning and chipping practices. Moisture content exhibited values consistent with those typically reported for this type of biomass; however, an additional fraction was attributed to high precipitation levels and prolonged environmental exposure during storage. Proximate analysis revealed elevated levels of volatile matter and fixed carbon, resulting in calorific values comparable to those documented for other residual biomass sources. Conversely, the ash content was markedly high, indicative of an excessive bark fraction, likely due to the absence of selective pruning criteria in terms of branch diameter and species. Implementing such selection measures could enhance the thermal performance of the feedstock. Overall, the results underscore the potential of urban pruning residues as a viable feedstock for bioenergy production, while highlighting operational adjustments that could optimize their energy yield and mitigate environmental impacts associated with waste management.

**Keywords:** Lignocellulosic biomass, urban pruning residues, physicochemical characterization, biofuels, renewable energy.



## DESARROLLO Y ENSAYO DE UN PROTOTIPO DE PANEL SOLAR DE AIRE CALIENTE. INDUSTRIALIZACIÓN PARA LA EFICIENCIA ENERGÉTICA

**Soledad E. Andreoni Trentacoste<sup>1,2</sup>, Fabiana Mansilla<sup>1</sup>, Jorge Oliva<sup>1,3</sup>, Claudia Elizabeth Dido<sup>1</sup>, Gerardo Wadel<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Grupo GESTADIS, Facultad Regional Trenque Lauquen, Universidad Tecnológica Nacional

<sup>2</sup> Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE – CONICET)

<sup>3</sup> Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Arquitectura y Diseño Urbano (UNLP - FADU)

**RESUMEN:** En el marco del proyecto de investigación y desarrollo “INDEEV, Industrialización para la eficiencia energética de la vivienda” de la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Trenque Lauquen, se presenta el desarrollo y ensayo de un prototipo de panel solar de aire caliente destinado a calefacción pasiva. El sistema, basado en un diseño previo adaptado a las condiciones locales, fue construido con materiales de bajo costo y fácil acceso, con el objetivo de evaluar su potencial para mejorar el confort térmico y reducir el uso de calefacción convencional. El panel se instaló en el laboratorio de eficiencia energética de la UTN FRTL y se monitoreó su desempeño mediante un protocolo de toma de datos que incluye variables térmicas, climáticas y de flujo de aire. Los ensayos, realizados bajo condiciones invernales, registraron incrementos de temperatura del aire superiores a 30 °C y eficiencias instantáneas entre 40 % y 45 %. Los resultados demuestran la viabilidad técnica del sistema y sientan las bases para optimizar su diseño mediante simulación dinámica, con vistas a su futura industrialización y aplicación en viviendas nuevas y existentes.

**Palabras clave:** energía solar, calefacción pasiva, eficiencia energética.

### INTRODUCCIÓN

En el contexto actual de emergencia climática y la necesidad imperante de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, la transición hacia fuentes de energía renovable se ha convertido en una prioridad global.

En el sector edilicio, uno de los principales consumidores de energía a nivel global, la climatización (tanto para calefacción como para refrigeración) representa un porcentaje significativo del consumo final. En Argentina, la matriz energética continúa dominada por fuentes fósiles, que en 2022 representaron alrededor del 85% de la oferta primaria de energía, mientras que las energías renovables (incluyendo hidráulica, eólica, solar y biomasa) aportaron cerca del 15% (Balance Energético Nacional, 2022). Este escenario evidencia un amplio margen de mejora considerando el elevado potencial renovable del país, especialmente en energía solar, dada la disponibilidad de altos niveles de irradiancia en gran parte del territorio.

Entre las distintas tecnologías solares, la energía solar fotovoltaica ha experimentado un crecimiento sostenido en los últimos años, impulsada por políticas de fomento y reducción de costos de equipamiento. Sin embargo, la energía solar térmica, particularmente en su aplicación para climatización de espacios y agua sanitaria, presenta aún un desarrollo incipiente pese a su gran potencial para reducir la demanda energética convencional (Canafoglia, 2020). Dentro de estas soluciones, los colectores solares de aire (incluyendo los muros Trombe y variantes de calefactores solares pasivos) ofrecen ventajas como simplicidad constructiva, bajo costo de operación y fácil integración en edificaciones existentes. No obstante, gran parte de los sistemas desarrollados en el país han sido prototipos no industrializados, limitando su masificación y la posibilidad de garantizar estándares de calidad y



durabilidad. La industrialización de estos dispositivos permitiría optimizar su desempeño, reducir costos mediante economías de escala y facilitar su adopción en el mercado de la construcción.

El desafío para nuestro país es múltiple: se requiere afrontar el crecimiento de la demanda energética y a la vez reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. En el caso del sector edilicio, esto se puede lograr, como ya es ampliamente reconocido a nivel global, a través de la aplicación de estrategias bioclimáticas de diseño (orientación del edificio, aislación térmica, materiales utilizados, ganancia directa, etc.), rehabilitación energética edilicia y uso de sistemas pasivos o híbridos de acondicionamiento que involucren energías renovables (Filippín & Larsen, 2023).

La literatura internacional menciona ampliamente el uso y análisis de calentadores de aire mediante el aprovechamiento de energía solar térmica para calefacción (Singh et al., 2022). Estudios realizados por (Gainza-Barrencua et al., 2021, 2022) presentan conclusiones significativas respecto a la reducción en el consumo energético asociado a calefacción en edificios que implica la incorporación de calentadores solares de aire. Se puede reducir desde un 25% en climas cálidos hasta un 58% en climas fríos, concluyendo a su vez que los climas fríos con alta radiación solar directa son ideales para este tipo de tecnologías.

A fines de los '70, ante un escenario de crisis del petróleo, se emprendieron en nuestra región numerosos desarrollos tecnológicos que aprovechaban la energía solar aplicada a diferentes problemáticas. Teniendo en cuenta que nuestro territorio cuenta con una gran diversidad climática y solar, se llevaron a cabo múltiples estudios y emprendimientos relacionados con la aplicación de sistemas solares térmicos pasivos (Discoli et al., 2023). Actualmente, Argentina se encuentra en una etapa de expansión de la energía solar térmica, lo que representa no solo una alternativa ecológica en el consumo y producción de energía sino también un ahorro económico a partir de la reducción en el consumo de combustibles fósiles. Respecto a la aplicación de las instalaciones solares térmicas en el país, para el año 2019 el 61% de las instalaciones se realizaron para agua caliente sanitaria domiciliaria, seguidas por un 16% para climatización de piscinas, un 10% para calefacción, un 9% para procesos industriales y un 4% para instalaciones comerciales (INTI, 2020).

En el trabajo realizado por (Hernández et al., 2007) se presentan los resultados del primer ensayo del comportamiento térmico de un colector solar calentador de aire de *loop* convectivo vertical para calefacción. Los mismos muestran que con sólo 326 W/m<sup>2</sup> sobre plano vertical al norte el aire de salida superaba al de entrada en 20 °C. La máxima temperatura alcanzada por el aire a la salida fue de 74 °C al mediodía solar (13:27 hs), cuando la temperatura ambiente era de 19 °C, logrando elevar 55 °C la temperatura del aire dentro del colector. Así mismo, se concluye en el estudio que con un caudal promedio diario de 0,005 m<sup>3</sup>/s la eficiencia media del prototipo ensayado fue del 20 %, con valores instantáneos comprendidos entre 7 y 28 %.

Estudios previos (Viegas et al., 2023) analizan el aporte de calor en invierno de calefactores solares de aire para acondicionar el ambiente interior en viviendas. Los resultados muestran que, al evaluar 10 días corridos con buena heliofanía, el calefactor registra temperaturas máximas entre 40 y 50 °C. En un día con buena heliofanía (700 W/m<sup>2</sup> de radiación solar máxima), el calefactor alcanza 47,5 °C en la salida del aire caliente, mientras que en el interior de la vivienda las máximas son de 24,8 °C, es decir, casi 5°C por sobre la temperatura máxima. Lo que demuestra un buen funcionamiento del sistema como aporte de calor.

El presente trabajo se enmarca en el proyecto de investigación y desarrollo -PID-, de la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Trenque Lauquen, titulado “INDEEV, Industrialización para la eficiencia energética de la vivienda. Diseño de productos y de producción industrial de componentes para la mejora térmica de la envolvente y la gestión de la energía natural en edificios residenciales.” El objetivo principal del proyecto se centra en contribuir a la reducción de la demanda de energía y de las emisiones de GEI en edificios residenciales, así como al aumento del confort en los espacios interiores de las viviendas. Mediante el desarrollo de un sistema de calefacción pasiva a partir de un panel solar de aire que, al utilizar un recurso gratuito y renovable como es el calor del sol, permite limitar el uso de sistemas de calefacción convencionales mejorando el confort térmico.

En un proyecto previo realizado en 2019-2022 (Wadel et al., 2022), se investigó sobre acciones de eficiencia energética en la edificación para obra nueva y existente en las condiciones del área oeste de la Provincia de Buenos Aires, sentando las bases del proyecto en desarrollo.

Este trabajo presenta el desarrollo y ensayo de funcionamiento de un panel solar de aire caliente, instalado en la ciudad de Trenque Lauquen, Provincia de Buenos Aires. Se presenta una herramienta metodológica que establece un protocolo de toma de datos mediante el cual se lleva a cabo el estudio realizado. Se presentan resultados parciales del proyecto ya que el mismo se encuentra en desarrollo. Se pretende realizar a futuro estudios mediante simulación dinámica para establecer mejoras en el diseño que permitan el ajuste en el desarrollo del equipo para su posterior industrialización y comercialización.

## **METODOLOGIA**

### ***Diseño y construcción del panel***

El diseño del panel solar de aire caliente parte de la adaptación de un modelo de “Calentador solar de aire” (Instituto de Investigaciones y Políticas del Ambiente Construido (IIPAC), 2011), conformado principalmente por:

- a) una caja aislada que contiene a la superficie absorbedora, protegida de las pérdidas de temperatura y las inclemencias del tiempo. La misma posee una cubierta con una superficie transparente, permitiendo el paso de la radiación solar.
- b) una superficie absorbedora, encargada de la captación y transferencia de calor al aire producida por la radiación solar,
- c) conexiones entre el calentador y la habitación por medio de cuatro conductos, dos superiores y dos inferiores, que atraviesan la pared de la habitación.

Partiendo del diseño relevado en los antecedentes mencionados, se procede a la adaptación del diseño a la situación local (Wadel et al., 2024), para confeccionar la lista de materiales y herramientas necesarios para la construcción del prototipo. Estos son:

- Materiales: panel SIP o placa OSB, 2 tirantes de madera de 0.04 m x 0.05 m, 2 tirantes de madera de 0.04 m x 0.03 m, 2 m<sup>2</sup> de chapa acanalada, panel de policarbonato alveolar translúcido (esp.: 4mm - 1,02 m x 2,02 m), 2 tapas PVC (diámetro: 0,11 m), 2 tapas PVC (diámetro: 0,63 m), 2 tapones tipo Awaduct (diámetro: 0,63 m), 2 m de caño PVC (diámetro: 0,11 m - espesor: 0,005 m), 10 tornillos c/tuerca de 0,02 m largo, 1,5 m cadena fina galvanizada, 0,5 Kg clavos espiralados 1 1/2", 0,5 Kg cola vinílica resistente al agua, 1 cartucho de sellador de silicona, 10 tarugos Ø 8 mm, 10 tirafondos Ø 8 mm, 0,5 l de convertidor de óxido negro mate, 0,5 l de aguarrás.
- Herramientas: sierra circular, taladro atornillador, sierra de mano, martillo, amoladora eléctrica, martillo roto percutor, llaves varias de tubos.

Partiendo de la lista confeccionada, en mayo de 2024 se realizó un primer presupuesto para la compra de materiales e insumos necesarios, que varió al momento de realizar la compra debido a la situación inflacionaria nacional. Los costos finales se presentan en la tabla 1. Los mismos se expresan tanto en pesos como en dólares, utilizando para ello la cotización informada por el Banco de la Nación Argentina el 8 de agosto de 2024, de 915,5 pesos por dólar.

Tabla 1: Costos de los materiales para la construcción del panel.

|                    | Material                 | Medidas                   | Cantidad | Precio \$     | Precio U\$S |
|--------------------|--------------------------|---------------------------|----------|---------------|-------------|
| Fm Maderas         | Placa OSB                | Plancha 9mm               | 1        | \$ 26.000,00  | 28,4        |
|                    | Tirantes                 | 1,5" x 2m                 | 2        | \$ 23.000,00  | 25,1        |
|                    | Tirantes                 | 1,5" x 1,15               | 2        |               |             |
|                    | Cola Vinilica            |                           | 1        | \$ 4.900,00   | 5,4         |
| Sub Total          |                          |                           |          | \$ 53.900,00  | 58,9        |
| Metalúrgica Centro | Chapa Acanalada          | (por m)                   | 2        | \$ 25.200,00  | 27,5        |
|                    | Sub Total                |                           |          | \$ 25.200,00  | 27,5        |
| Oscar Trionfetti   | Polycarbonato            | Esp.:4mm - 1,02 x 2,02m   | 1        | \$ 43.000,00  | 47,0        |
| Sub Total          |                          |                           |          | \$ 43.000,00  | 47,0        |
| CP Materiales      | Tapas PVC                | Diam.:110                 | 4        | \$ 1.981,08   | 2,2         |
|                    | Tapon awaduct            | Diam.:63                  |          | \$ 2.928,96   | 3,2         |
|                    | Caño PVC                 | Diam.:110 - 2m Esp: 0.5mm | 1        | \$ 7.983,00   | 8,7         |
|                    | Sellador Acrílico Grieta |                           | 1        | \$ 7.067,00   | 7,7         |
| Sub Total          |                          |                           |          | \$ 19.960,04  | 21,8        |
| Argen Fer          | Bulón Galv. 1/4          |                           |          | \$ 442,14     | 0,5         |
|                    | Tuerca Galvanizada       |                           |          | \$ 177,85     | 0,2         |
|                    | Arandela Galvanizada     |                           |          | \$ 584,87     | 0,6         |
|                    | Clavos Espiralados       | 1"                        | 0.5Kg    | \$ 1.373,46   | 1,5         |
|                    | Sellador Silicona        | -                         | 1        | \$ 3.998,00   | 4,4         |
|                    | Tarugos del 8            | -                         | 10       | \$ 942,23     | 1,0         |
|                    | Tirafondos del 8         | -                         | 10       | \$ 1.027,48   | 1,1         |
| Sub Total          |                          |                           |          | \$ 8.546,03   | 9,3         |
| Pint.Urquiza       | Uxell Conv. Óxido Color  |                           | 1,5Lt.   | \$ 7.800,00   | 8,5         |
|                    | Aguarras                 |                           | 1Lt.     | \$ 2.600,00   | 2,8         |
|                    | Pincel                   | Nº 20                     | 1        | \$ 1.800,00   | 2,0         |
| Sub Total          |                          |                           |          | \$ 12.200,00  | 13,3        |
| TOTAL              |                          |                           |          | \$ 162.806,07 | 177,8       |

El panel se construyó a partir de una caja de madera cuyas dimensiones son: 1,02 m x 2,02 m. Como se puede observar en las imágenes de la figura 1, en el fondo de la caja se realizaron las aberturas para permitir la circulación de aire en el panel, colocando por el lado de atrás 4 tubos de 0,11 m de diámetro (2 abajo y 2 arriba). Luego se colocaron la aislación, la chapa acanalada la cual fue pintada con convertidor de óxido color negro mate y el polycarbonato alveolar de 4mm. Cabe aclarar que en la foto de la figura 1 la chapa se encontraba recientemente pintada por lo que da la impresión de tener brillo, sin embargo, una vez seca la pintura, la superficie tiene acabado mate reduciendo la reflectancia y mejorando la absorción térmica.



Figura 1: Fotografías durante el proceso de construcción del panel.

### ***Instalación en un espacio edilicio***

El estudio se llevó a cabo en la ciudad de Trenque Lauquen, Provincia de Buenos Aires. La misma se ubica al noroeste de la provincia (latitud:  $-35,970^{\circ}$ , longitud:  $-62,734^{\circ}$  y 91 m s. n. m.) y se sitúa en la zona bioclimática III a, templada cálida y seca. De acuerdo con datos de la estación meteorológica Pegasus ubicada en el Club de Planeadores de Trenque Lauquen, a una distancia de 5.6 km del edificio de la UTN FRTL, las temperaturas diarias medias mínimas y máximas oscilan entre  $18^{\circ}\text{C}$  y  $30^{\circ}\text{C}$  en verano y entre  $3^{\circ}\text{C}$  y  $18^{\circ}\text{C}$  en invierno. La humedad relativa del ambiente varía entre el 37% y el 72% en verano y el 55% y el 95% en invierno. La estación estival tiene cielos mayormente despejados y la invernal parcialmente nublados. Las precipitaciones mensuales están por encima de los 150 mm, con un descenso entre los meses de mayo y agosto.

El panel se instaló en un muro del laboratorio de eficiencia energética, en el edificio de la Secretaría de Ciencia y Tecnología (SCyT), UTN FRTL. Se determinó la mejor orientación para la colocación del panel utilizando la herramienta de acceso libre y en línea 3D Sun Path que requiere la ubicación geográfica precisa del edificio y un modelo 3D del mismo, este último se realizó con el software Sketchup. El análisis se centró en la cantidad de horas de sol que inciden tanto en la fachada del edificio como en el muro interno de la misma. El análisis reveló que para un día de invierno la fachada principal recibe aproximadamente 3 horas de sol, mientras que el muro interno recibe unas 6 horas, antes de que las sombras obstruyan la captación de luz. Con base en la orientación del edificio de la SCyT ( $-35.9775682$ ,  $-62.732479$ , 17) y el análisis de la luz solar, se concluyó que la mejor opción de instalación para el panel es el muro interno. Sin embargo, tras evaluar las actividades de obra necesarias para la instalación, se decidió finalmente ubicar el panel en el espacio del laboratorio de eficiencia energética. Este laboratorio cuenta con un muro que da a un patio trasero, el cual tiene la misma orientación que el muro interno analizado.

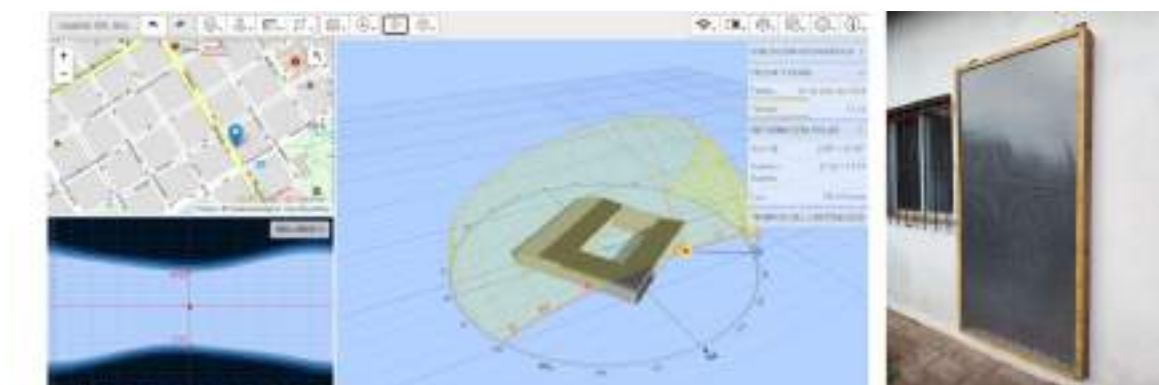


*Figura 2: Análisis de la orientación para la colocación del panel y fotografía del panel instalado.*

### ***Protocolo de toma de datos***

Para poder evaluar, estudiar y cuantificar el comportamiento del panel solar de aire caliente en condiciones reales de funcionamiento, se estableció un protocolo de toma de datos cuyas etapas se exponen a continuación:

- **1er etapa:** Esta etapa comprende la descripción del edificio (materialidad, dimensiones, etc), complementando con documentación técnica de ser posible. Así mismo se detalla el ambiente donde se instala el sistema (panel). En caso de contar con equipamiento de climatización convencional instalado, deben mencionarse junto con su ubicación.

Para llevar a cabo la etapa inicial del protocolo en este estudio, se realizó un relevamiento del edificio y las características de este.

- **2da etapa:** En esta etapa se define la metodología de medición de parámetros objetivos. Se establecen las variables de monitoreo y el equipamiento a utilizar para la toma de datos. Así mismo se determina la ubicación de los equipos de medición según antecedentes y características de la medición. Se define a su vez el formato de registro de fechas y horas de la toma de datos y de condiciones climáticas.

Para el análisis realizado en este estudio, se instaló dentro del laboratorio una pc que forma parte del sistema de medición para el registro de los datos. Los sensores que miden la temperatura y humedad en la entrada y salida del panel están conectados a una placa Arduino, utilizando el IDE de Arduino para programarla. Los datos obtenidos por Arduino a través del puerto serial se configuraron para ser procesados por un programa desarrollado en Python. Una vez procesados, estos datos se guardan en un archivo .csv, lo que permite una manipulación eficiente de la información.

Los datos registrados no solo se almacenan para su posterior análisis, sino que también pueden ser consultados en tiempo real a través de un bot de Telegram al cual se puede acceder por medio de un enlace lo que permite monitorear la información de los sensores en tiempo real y descargar todas las mediciones registradas desde cualquier ubicación.

A su vez se utilizaron los siguientes instrumentos de medición para los registros no automáticos (tabla 2):

*Tabla 2: Instrumentos utilizados para la toma de datos.*

| Instrumento                              | Modelo         | Parametros Medidos                         | Rango de Medición                                                             | Exactitud                                                                         | Características Destacadas                                                                                                               |
|------------------------------------------|----------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Termómetro de Ambiente</b>            |                | Temperatura del aire                       | No especificado                                                               | No especificado                                                                   | Instalado en el laboratorio, cerca de los sensores para comparación.                                                                     |
| <b>Termómetro de Contacto</b>            | Testo 915 i    | Temperaturas en superficies                | -50 a +350 °C                                                                 | ±1,0 °C                                                                           | Sonda tipo K clase 1, banda termopar flexible: app Testo Smart para visualización y registro.                                            |
| <b>Anemómetro</b>                        | LM-8000        | Velocidad del aire y presión barométrica   | Aire: 0,4 a 30,0 m/s (res. 0,1 m/s)<br>Presión: 10 a 1100 hPa. (res. 0,1 hPa) | Aire: ±3 % F.S. (< 20 m/s)<br>±4 % F.S. (> 20 m/s).<br>Presión: ±1,5 hPa / ±2 hPa | Conversión a km/h; caracterización del flujo: alta precisión. Certificado de calibración.                                                |
| <b>Cámara Termográfica</b>               | Testo 875      | Temperatura superficial; imágenes térmicas | -20 a +100 °C y 0 a +280 °C                                                   | ±2 °C o ±2 % del valor medido                                                     | Equipo Clase 2. Sensibilidad <80 mK; resolución 160 x 120 px. Software profesional de análisis térmico.                                  |
| <b>Medidor Portátil de Energía Solar</b> | Tenmars TM-206 | Radiación solar                            | hasta 1999 W/m² BTU/(ft²*h) Res. 0,1W/m²                                      | ±10 W/m² o ±5 % (el mayor)                                                        | Lectura rápida (0,25 s); valores máx./min.: retención de datos. Certificado de calibración.                                              |
| <b>Datalogger Temp.y Humedad</b>         | GM 1365        | Temperatura y humedad relativa             | Temperatura: -30 a 80 °C. Humedad: 0 a 100 % RH.                              | Temp.: ±0,3 °C (típico)<br>Humedad: ±2 % RH (típico)                              | Almacena 32,256 registros; software de análisis; uno instalado en el centro del laboratorio, y otro en el exterior justo sobre el panel. |

- **3ra etapa:** Esta etapa comprende el ensayo de eficiencia del panel solar de aire caliente.

Los ensayos de eficiencia del panel se realizaron siguiendo las prescripciones establecidas en la norma ASHRAE 93-77, cuyo cálculo ha sido ampliamente utilizado en estudio previos (Hernández et al., 2008; Velasco Roldan, 2016). Las eficiencias instantáneas se calculan a partir de:

$$\eta_i = \frac{\dot{m} C_p (T_s - T_e)}{A_c G} \quad (1)$$

donde:

$\eta_i$  = la eficiencia energética instantánea basada en el área bruta del captador %  
 $\dot{m}$  = el flujo de masa circulante Kg/s  
 $C_p$  = Calor específico del aire a presión constante  
 $T_s$  = Temperatura del aire a la salida del captador  
 $T_e$  = Temperatura del aire en la entrada del captador  
 $G$  = Irradiancia solar sobre el plano del colector W/m²  
 $A_c$  = Área de apertura del colector

La estimación del flujo másico de aire se obtuvo a partir de las mediciones de velocidad realizadas en el conducto de salida del colector. En primera instancia, se determinó el caudal volumétrico como el producto entre la velocidad promedio registrada y el área de la sección transversal del conducto según:

$$Q_v = v \cdot A \quad (2)$$



- **4ta etapa:** En esta etapa se define la metodología para la toma de datos de parámetros subjetivos de confort térmico. Se realizan cuestionarios y encuestas a usuarios del edificio.
- **5ta etapa:** La última etapa del protocolo comprende el análisis de todos los resultados obtenidos.

En este apartado se presentan los resultados de la aplicación del protocolo de toma de datos detallado en el punto anterior, a partir de las etapas propuestas en el mismo.

El edificio de la SCyT, data de una antigüedad de aproximadamente 50 años, el laboratorio se encuentra en el ala interna del pabellón general, su cara exterior se ubica hacia la orientación noreste. La construcción es de mampostería de ladrillo hueco de 0,18 m y revoques en ambas caras del muro. En su interior el cerramiento en contacto con el terreno natural está formado por contrapiso de hormigón pobre de 0,15 m de espesor, capa de mortero de asiento de 3/4 cm de espesor y suelo de mosaicos graníticos de 0.03 m de espesor, todo ello sin aislación térmica. Posee cielloraso de madera machimbre de ½ pulgada de espesor, en forma suspendida (no posee aislación). La cubierta se resuelve en forma inclinada con tirantes de madera de 0,05 m x 0,15 m cada 0.60 m, con entretecho de madera de 0.013 m y chapa galvanizada. Solamente uno de los muros de los lados del laboratorio, se encuentra próximo con el exterior, el resto de los muros son compartidos con espacios cerrados. Los muros no poseen aislación. Por otro lado, las carpinterías hacia el exterior son del tipo corredizas de dos hojas de chapa plegada (1.20 m x1.20 m) no posee cerramiento exterior.



La toma de datos se realizó con el panel funcionando bajo régimen de convección natural garantizando que los datos reflejan el rendimiento base del sistema. El aire ingresa por la parte inferior a temperatura cercana al ambiente y entra en contacto con la superficie absorbente, la cual transfiere calor por



convección y radiación, disminuyendo su densidad y ascendiendo impulsado por la diferencia de presión. Este movimiento se mantiene hasta la salida superior, donde el aire alcanza su mayor temperatura, compensando las pérdidas de carga internas del sistema.

Los datos se registraron durante un periodo de invierno entre los días 06 de junio y 10 de agosto de 2025 mediante un formulario de Google, facilitando la organización y posterior análisis de la información recolectada. Se recolectaron los datos de temperatura ambiente, temperatura en el PLC, temperatura del aire en las bocas de entrada y salida, velocidad de flujo de aire en ambas bocas, presión y energía en términos de irradiancia solar ( $\text{W/m}^2$ ). También se capturaron imágenes termográficas para observar la distribución de temperatura en el panel, así como también en el interior y exterior del laboratorio.

A continuación, se pueden observar los datos registrados para una selección de días representativos del periodo de medición, entre el 17/07 y el 21/07. En el gráfico de la figura 4 se observan las temperaturas medidas del ambiente interior y exterior, en el espacio del laboratorio donde se instaló el panel solar de aire caliente. Si bien las temperaturas interiores no superan niveles de confort deseados para un espacio interior habitable, se presenta un buen comportamiento en cuanto a la conservación de la temperatura durante horas de la noche, registrando temperaturas de  $14^\circ\text{C}$  en promedio cuando en el exterior la misma desciende a  $5^\circ\text{C}$ . La temperatura interior se eleva en  $5^\circ\text{C}$  solo con el uso del panel solar instalado. Esto demuestra la potencialidad de este espacio para el aprovechamiento de estrategias pasivas, pudiendo mejorar la temperatura interior aumentando la superficie de paneles instalados.

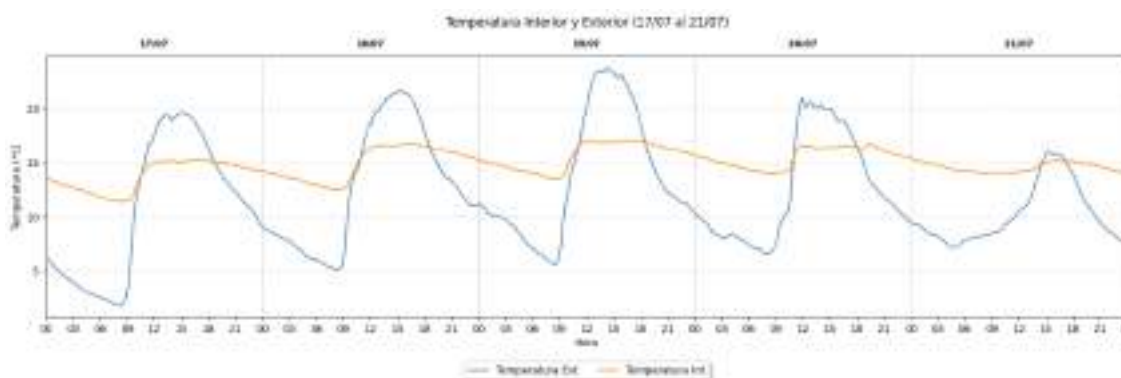


Figura 4: Temperatura ambiente interior y exterior registradas en el ambiente donde se instaló el panel.

En el gráfico de la figura 5, se observan las temperaturas en la boca de entrada y de salida del panel en funcionamiento. Se registran a la salida temperaturas cercanas a los  $50^\circ\text{C}$  todos los días, bajo las condiciones climáticas del periodo de toma de datos, que como se observó en la figura 4, presentó temperaturas exteriores entre  $3^\circ\text{C}$  y  $25^\circ\text{C}$  y cielo despejado. Se observa que la temperatura a la salida del panel asciende rápidamente a partir de las 9 hs, y desciende entre las 16 hs y las 18 hs. Los registros de temperatura a la entrada del panel muestran valores entre  $4^\circ\text{C}$  a las 8 hs y  $17^\circ\text{C}$  alrededor de las 12 hs del mediodía. Esto indica un aumento de temperatura del aire al circular dentro del panel de más de  $30^\circ\text{C}$  en condiciones climáticas de invierno.

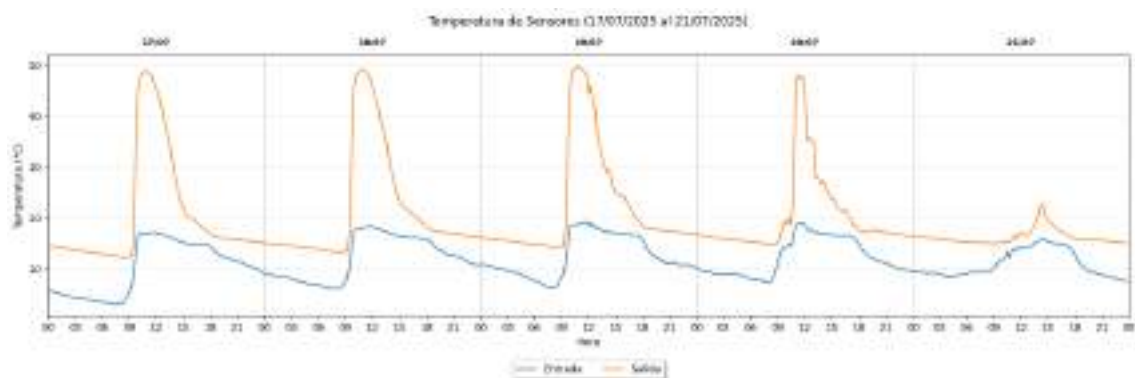


Figura 5: Temperaturas registradas en las bocas de entrada y salida del panel.

### 3ra etapa:

Conocer la eficiencia del sistema es fundamental para poder estimar el calor útil que puede generar el panel de acuerdo con las características climáticas que presenta el lugar donde está instalado. Como se expresó en el apartado anterior, se realizó el ensayo de la eficiencia del panel solar de aire caliente de acuerdo con lo establecido en la norma ASHRAE 93-77, aplicando las fórmulas descriptas en las Ec. (1) y Ec. (2). Para esto se tomaron registros de temperatura y velocidad del aire a la salida y entrada del panel y de irradiancia solar en intervalos de una hora durante todo un día (08/08/2025). Los resultados del ensayo realizado se observan en los gráficos de las figuras 6, 7 y 8.

La figura 6 muestra los datos registrados de temperatura de entrada y salida del panel, junto con los datos de irradiancia incidente sobre el mismo. Se observa que a las 10 hs la temperatura de salida alcanza su valor máximo de 47,5°C, demostrando que el panel logra calentar el aire en 31,3 °C con relación a la temperatura de entrada, en el momento de mayor incidencia de la irradiancia solar con un registro de 796 W/m<sup>2</sup>. Es notable observar que a pesar de descender el valor de irradiancia a partir de esa hora, la temperatura de salida del panel se mantiene por encima de los 20°C hasta pasadas las 17 hs, cuando finalmente el sol no se proyecta sobre el panel.

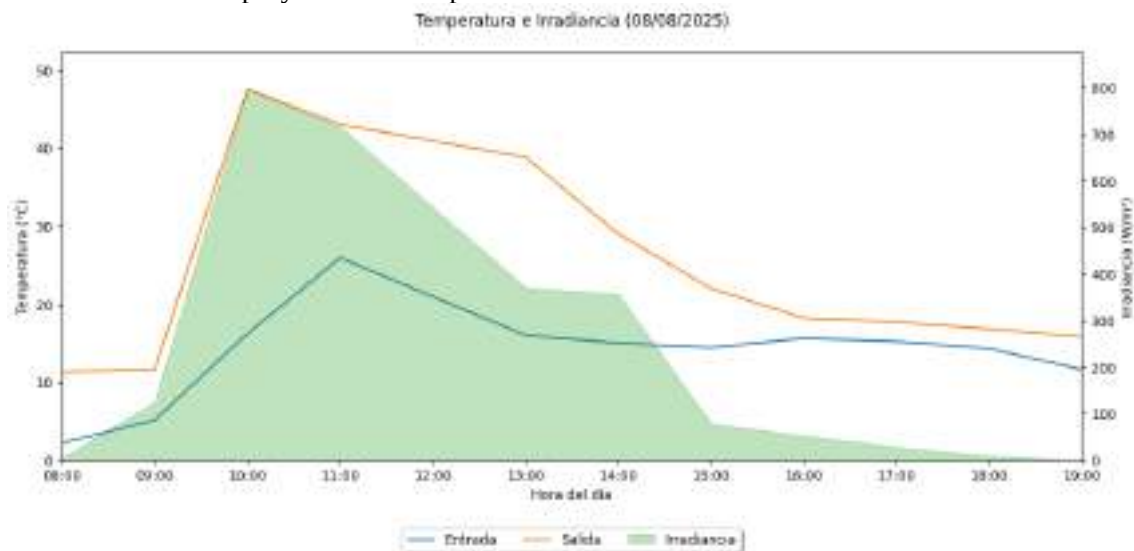


Figura 6: Temperaturas registradas a la salida y entrada del panel, e irradiancia solar el día 8 de agosto de 2025.

En coincidencia con el mismo día de medición y mismos registros horarios, el gráfico de la figura 7 muestra la velocidad de entrada y salida registradas en las bocas del panel, en conjunto con los datos de irradiancia. Se observa que, en los registros de las 10 hs, cuando la irradiancia alcanzó su valor máximo de 796 W/m<sup>2</sup>, el aire a la salida del panel registró una velocidad de 1.9 m/s, lo que demuestra un buen funcionamiento del sistema.

En los registros de las 9 hs y las 17 hs se adoptó una velocidad de aire igual a 0 m/s, dado que los valores medidos se encontraban por debajo del rango mínimo de detección del anemómetro (rango entre 0,4 m/s a 30,0 m/s). Esta decisión se adoptó para mantener la consistencia metodológica en el cálculo del flujo másico y la eficiencia térmica, evitando introducir lecturas no confiables o extrapoladas fuera de las especificaciones del instrumento.

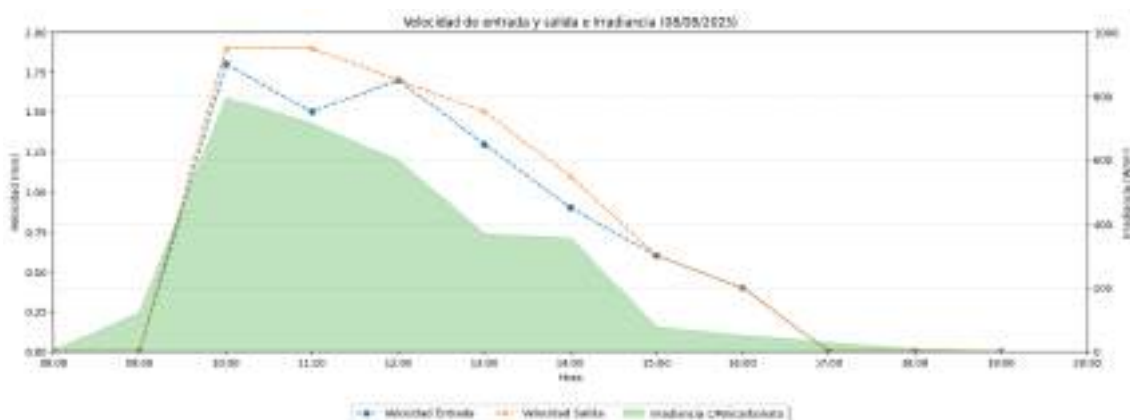


Figura 7: Velocidad de aire registrado a la salida y entrada del panel, e irradiancia solar el día 8 de agosto de 2025.

Los resultados de la evaluación de eficiencia del panel se grafican en la figura 8. Los datos de eficiencia instantáneas calculadas muestran valores entre 40% y 45% durante las horas de mayor irradiancia del día del ensayo.

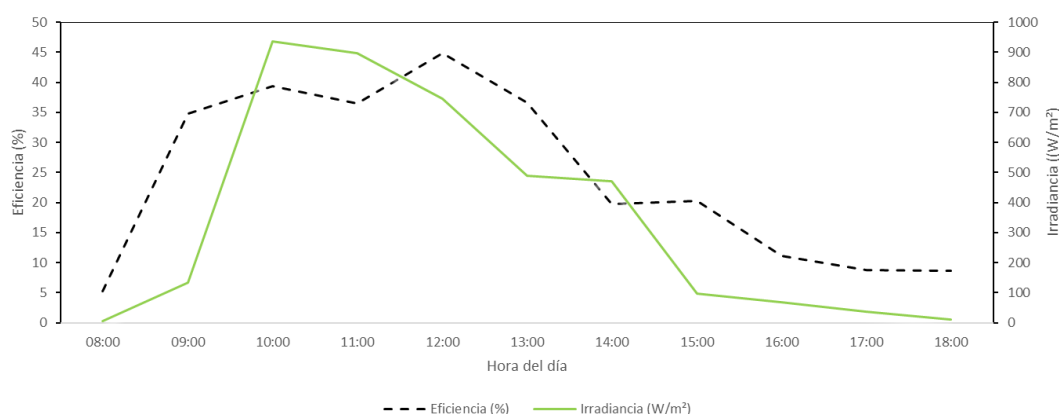


Figura 8: Eficiencia del sistema e irradiancia solar el día 8 de agosto.

El cálculo de eficiencia realizado en este estudio se basa en un procedimiento simplificado, el mismo permite obtener una estimación experimental directa de la eficiencia instantánea en condiciones reales de operación.

Tanto la **4ta etapa** como la **5ta etapa** del protocolo descrito se encuentran en proceso de realización, los resultados presentados en este trabajo forman parte de la etapa 5, aunque los mismos son parciales ya que el proyecto está aún en desarrollo al momento de redactar este artículo.

## CONCLUSIONES

El presente trabajo presentó el desarrollo, construcción e instalación de un prototipo de panel solar de aire caliente orientado a calefacción pasiva en el marco del proyecto “INDEEV, Industrialización para la eficiencia energética de la vivienda” de la UTN FRTL. El objetivo principal fue evaluar el desempeño térmico del sistema en condiciones reales de uso, como paso previo a su optimización y potencial industrialización para su aplicación en viviendas nuevas y existentes.

Los resultados obtenidos confirman la viabilidad técnica del panel solar de aire caliente desarrollado, evidenciando un desempeño térmico consistente con los valores reportados en estudios previos sobre colectores solares de aire en Argentina (Hernández et al., 2007; Viegas et al., 2023). Bajo condiciones invernales, el prototipo registró incrementos de temperatura del aire superiores a 30 °C y eficiencias instantáneas entre el 40 % y el 45 % durante las horas de mayor irradiancia, valores comparables a los antecedentes relevados.

Estos resultados demuestran que, con la utilización de materiales de bajo costo y construcción sencilla, es posible alcanzar un aporte térmico significativo que contribuya a la reducción del uso de calefacción convencional. La instalación experimental permitió además validar un protocolo de monitoreo que combina mediciones térmicas, climáticas y de flujo de aire, constituyendo una herramienta replicable para futuros ensayos.

En línea con lo señalado en la introducción respecto a la necesidad de industrializar este tipo de sistemas, el presente desarrollo sienta las bases para optimizar el diseño mediante simulación dinámica y evaluar su fabricación a escala, con el fin de garantizar calidad, reducir costos y facilitar su incorporación tanto en obra nueva como en rehabilitación energética de viviendas. Así mismo se establece como línea de avance la contrastación de la valoración de la eficiencia del sistema bajo condiciones reales de operación con los protocolos de ensayo estandarizados establecidos por la norma ISO 9806.

## FUENTES DE FINANCIAMIENTO

El proyecto código MSECTL0009857, **“INDEEV – Industrialización para la eficiencia energética de la vivienda: diseño de productos y de producción industrial de componentes para la mejora térmica de la envolvente y la gestión de la energía natural en edificios residenciales”**, fue homologado por Disposición SCyT UTN N° 51/2022 y financiado por la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la UTN mediante los fondos asignados por las Resoluciones N° 229/2023, N° 256/2024 y N° 277/2025, de acuerdo con la duración establecida para el proyecto.

## AGRADECIMIENTOS

Esta investigación se desarrolló en colaboración con la Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Arquitectura y Diseño Urbano (UNLP FADU), el Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE – CONICET) y el Laboratorio de Eficiencia Energética de la Facultad Regional Trenque Lauquen (UTN).

Se agradece la participación del Ing. Franco Mieres de la FRTL, así como el apoyo de la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la UTN mediante becas BINID a las ingenieras industriales Lucía Balbi y Fabiana Mansilla, y becas CyT UTN a los estudiantes Cristian Rodríguez y Emiliano Arce (Ing. Industrial), y Eduardo Álvarez y Tomás Salinas (Ing. en Sistemas de Información). Asimismo, se reconoce a la Secretaría de Asuntos Universitarios de la FRTL por la beca otorgada al estudiante Carlos Traverso (Ing. Industrial) y a la empresa Solar Control por la provisión de equipamiento y su apoyo constante.

## REFERENCIAS

*Balance Energético Nacional*. (2022).

Canafoglia, E. (2020). Transición energética y configuraciones socioproductivas regionales. En Grupo de Trabajo Energía y desarrollo sustentable - (Ed.), *Transiciones energéticas en América Latina*. CLACSO. [www.clacso.org](http://www.clacso.org)

Discoli, C. A., Viegas, G. M., & Jodra, J. I. (2023). *Sistemas solares pasivos en la Argentina. Muros acumuladores de calor (MAC) como estrategia de climatización en los sectores residenciales y agro-productivos*. (MT Ediciones Memoria y Trascendencia, Ed.; 1era ed.).

Filippín, C., & Larsen, S. F. (2023). Ejemplos de arquitectura bioclimática que contribuyen a la salud del habitante y del planeta. *Ciencia e investigación*, 72(5).

Gainza-Barrencua, J., Odriozola-Maritorea, M., Barrutieta, X., Gomez-Arriaran, I., & Hernández Minguillón, R. (2022). Use of sunspaces to obtain energy savings by preheating the intake air of

- the ventilation system: Analysis of its main characteristics in the different Spanish climate zones. *Journal of Building Engineering*, 62. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.105331>
- Gainza-Barrencua, J., Odriozola-Maritorea, M., Hernandez\_Minguillon, R., & Gomez-Arriaran, I. (2021). Energy savings using sunspaces to preheat ventilation intake air: Experimental and simulation study. *Journal of Building Engineering*, 40, 102343. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102343>
- Hernández, A., Fernández, C., Salvo, N., & Suligoy, H. (2007). Diseño, construcción y primeros ensayos de un colector solar calentador de aire de tipo loop convectivo para el calentamiento de edificios. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 11.
- Hernández, A., Salvo, N., Fernández, C., & Suligoy, H. (2008). Diseño y evaluación térmica de un colector solar calentador de aire de placa perforada para calefacción de edificios. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 12.
- Instituto de Investigaciones y Políticas del Ambiente Construido (IIPAC). (2011). *Calentador solar de aire - Manual del usuario*. <https://iipac.unlp.edu.ar/manuales>
- INTI. (2020). *Censo Nacional Solar Térmico 2020*. <https://www.inti.gob.ar/assets/uploads/files/generacion-de-la-enegria/censo-2020/censo-solar-termico-2020.pdf>
- Singh, V. P., Jain, S., Karn, A., Kumar, A., Dwivedi, G., Meena, C. S., Dutt, N., & Ghosh, A. (2022). Recent Developments and Advancements in Solar Air Heaters: A Detailed Review. *Sustainability*, 14(19), 12149. <https://doi.org/10.3390/su141912149>
- Velasco Roldan, L. (2016). Estrategias de captación solar mediante colectores solares de aire en climas fríos. *Estudios del hábitat*, 14(1), 15–27. [revistas.unlp.edu.ar/habitat](https://revistas.unlp.edu.ar/habitat)
- Viegas, G. M., Esparza, J. B., & San Juan, G. A. (2023). Evaluación térmica, lumínica y termográfica de una solución habitacional de madera en clima templado cálido para el hábitat popular. *Revista Hábitat Sustentable*, 13(1), 84–95. <https://doi.org/10.22320/07190700.2023.13.01.07>
- Wadel, G., Dido, C., & Mieres, F. (2022). Sistema de ayuda de eficiencia energética en vivienda municipal. *XII Congreso Regional de Tecnología en Arquitectura*.
- Wadel, G., Dido, C., Mieres, F., Oliva Jorge, & Balbi, L. (2024). Industrialización para la eficiencia energética de la vivienda. Diseño y producción de paneles solares de aire caliente. *XVII COINI 2024 - Congreso Internacional de Ingeniería Industrial*.

## **DEVELOPMENT AND TESTING OF A HOT AIR SOLAR PANEL PROTOTYPE: INDUSTRIALIZATION FOR ENERGY EFFICIENCY.**

**ABSTRACT:** Within the framework of the research and development project “INDEEV, Industrialization for Energy Efficiency in Housing” at the Universidad Tecnológica Nacional, Trenque Lauquen Regional Faculty, this paper presents the development and testing of a hot air solar panel prototype for passive heating. The system, based on a previous design adapted to local conditions, was built using low-cost, readily available materials to assess its potential for improving thermal comfort and reducing the use of conventional heating. The panel was installed in the Energy Efficiency Laboratory at UTN FRTL, and its performance was monitored through a data collection protocol including thermal, climatic, and airflow variables. Tests carried out under winter conditions recorded air temperature increases above 30 °C and instantaneous efficiencies between 40% and 45%. The results demonstrate the technical feasibility of the system and provide a basis for optimizing its design through dynamic simulation, with a view to its future industrialization and application in both new and existing housing.

**Keywords:** solar energy, passive heating, energy efficiency.

## RECONSTRUCCIÓN DE SERIES DE IRRADIANCIA GLOBAL HORIZONTAL CON HUECOS SINTÉTICOS MEDIANTE MODELOS DE MACHINE LEARNING Y DATOS SATELITALES. CASO DE ESTUDIO: EL ROSAL, SALTA

**Constanza B. López Ruiz<sup>1,2</sup>, Rubén D. Ledesma<sup>1,2</sup>, Germán A. Salazar<sup>1,2</sup>, Janis Galdíño<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Instituto de Investigaciones en Energía no Convencional (INENCO). Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

<sup>2</sup> Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de Salta

<sup>3</sup> Centro de Energías Renováveis, Universidade Federal de Pernambuco (Av. da Arquitetura, 857 -Cidade Universitária, Recife - PE, 50740-550

E-mail: [constanza.lopezruiz@conicet.gov.ar](mailto:constanza.lopezruiz@conicet.gov.ar)

**RESUMEN:** La radiación solar global sobre plano horizontal (GHI) es clave para el diseño y optimización de sistemas de energía solar, pero sus registros suelen presentar datos faltantes originados en fallas de instrumentación o mantenimiento. Este trabajo compara tres estrategias basadas en Machine Learning —regresión lineal simple (SLR), regresión lineal múltiple (MLR) y perceptrón multicapa (MLP)— para la imputación de datos faltantes. También se emplean productos satelitales (CAMS), de reanálisis (ERA5) y estimaciones del modelo ARGP2 para mejorar la precisión de las predicciones. Para evaluar el desempeño de los modelos, se generaron huecos sintéticos de manera semi-aleatoria, en una serie de GHI de la localidad El Rosal, Salta, Argentina. En todos los casos el MLP logró los menores errores (rRMSD entre 18 % y 21 %), seguido por MLR (rRMSD entre 20 % y 24 %) y SLR (rRMSD entre 21 % y 26 %).

**Palabras clave:** Irradiancia solar, machine learning, CAMS, ERA5, series temporales, gap filling.

### INTRODUCCIÓN

La Irradiancia global horizontal sobre plano horizontal (GHI) es un parámetro fundamental para la evaluación y optimización de sistemas de energía solar de mediana o gran envergadura (Alonso-Suárez, 2017). Su medición precisa es esencial para estimar el potencial energético de una ubicación geográfica y para maximizar el rendimiento, por ejemplo, de los sistemas solares fotovoltaicos (PV) (Cabrera et al., 2024). Sin embargo, uno de los principales desafíos en el análisis de datos solares es la presencia de huecos (datos faltantes) en las series temporales de GHI, que pueden surgir por fallas en los equipos de medición, interrupciones por mantenimiento o condiciones meteorológicas extremas (Muneer y Fairouz, 2002). Estos huecos no solo afectan la calidad de los análisis realizados, sino que también limitan la capacidad de modelar o predecir con precisión el recurso solar, lo que impacta negativamente en la toma de decisiones para proyectos solares (Cabrera et al., 2024). Como ejemplo de la magnitud del problema, Schwandt et al. (2014) reportaron que la red SRRA de India (51 estaciones) presenta aproximadamente 7 % de datos faltantes, con duraciones que van desde minutos hasta varios días, evidenciando que los huecos reales requieren métodos confiables de imputación incluso sin disponibilidad de datos auxiliares externos.

En el reporte técnico de Sengupta et al. (2021) se destaca que la calidad y continuidad de los datos solares son esenciales para todas las etapas de un proyecto solar, desde la selección inicial del sitio hasta la operación del sistema. Este reporte subraya la importancia de implementar controles de calidad



rigurosos y métodos confiables para el manejo de datos faltantes, especialmente en regiones con alta variabilidad climática. En este contexto, se han propuesto numerosos métodos para llenar estos huecos (o gap-filling) en los datos meteorológicos. En el caso de la GHI, las técnicas más comunes incluyen métodos estadísticos (como la interpolación lineal o polinómica), el uso de datos satelitales o de reanálisis, y enfoques más recientes basados en Machine Learning (ML) (Cabrera et al., 2024; Iturbide et al., 2023). Los modelos de ML han demostrado ser particularmente efectivos, ya que pueden aprender relaciones complejas entre variables y adaptarse a patrones locales específicos. Entre estos modelos, la Regresión Lineal Simple (SLR), la Regresión Lineal Múltiple (MLR) y las redes neuronales artificiales, como el Perceptrón Multicapa (MLP), han sido ampliamente utilizados en aplicaciones similares (He et al., 2025). Sin embargo, todavía existe una necesidad de estudios que comparen su rendimiento específicamente en el contexto de los datos de GHI.

En este trabajo se propone y evalúa un enfoque basado en ML para la reconstrucción (gap-filling) de datos de GHI registrados con una resolución temporal de 15 minutos en la localidad El Rosal, Salta, Argentina. Para ello, se entrenaron modelos de SLR, MLR y MLP utilizando estimaciones para radiación solar satelitales del Servicio de Monitoreo de la Atmósfera de Copernicus (CAMS, por sus siglas en inglés) (Inness et al., 2019), obtenidos del sitio <https://www.tsv.soda-pro.com/web-services/radiation/cams-radiation-service>, datos de reanálisis ERA5 del Centro Europeo de Predicción Meteorológica a Plazo Medio (ECMWF, por sus siglas en inglés) (Hersbach et al., 2020), obtenidos del sitio <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview> y datos de GHI de cielo claro obtenidos con el modelo ARGP\_V2, el cual está basado en el modelo McClear ajustado empíricamente para el noroeste argentino (Ledesma et al., 2023). Tanto las estimaciones satelitales como los datos de reanálisis proporcionan información a través de variables adicionales que afectan directamente los patrones de Irradiancia solar.

Tomando como referencia la metodología semi-Monte Carlo propuesta por Demirhan y Renwick (2018), se diseñaron escenarios de huecos sintéticos controlados seleccionando primero el 10 %, 30 % y 50 % de los días del registro; sobre cada día elegido se generaron huecos de 1 y 4 pasos de 15 min con distribución temporal aleatoria uniforme, lo que permite evaluar el desempeño de los modelos de ML bajo patrones realistas de datos faltantes sin depender de los huecos reales de la serie.

Este trabajo busca contribuir en mejorar la calidad de los conjuntos de datos solares en la región, y también ofrecer una metodología replicable para otras ubicaciones con características climáticas similares. Además, resalta el valor de combinar datos de múltiples fuentes, como así también técnicas de aprendizaje automático para abordar los desafíos del manejo de datos faltantes en aplicaciones solares.

## **METODOLOGÍA**

La metodología incluye la generación de huecos sintéticos en series de datos medidos para evaluar el rendimiento de los modelos en diferentes escenarios, con tasas de datos faltantes en hasta un 50 % de los días de la serie de datos y huecos de tamaños variados (aleatorios de mayor frecuencia y continuos de menor frecuencia). Asimismo, las métricas utilizadas para cuantificar la precisión de los modelos son el error de desvío estándar (MBE), el error cuadrático medio (RMSD) y el error medio absoluto (MAE) en términos relativos.

### ***Descripción del set de datos***

Los datos utilizados en este trabajo corresponden a la localidad El Rosal (latitud = -24.393°, longitud = -65.768°, a una altitud aproximada de 3355 m.s.n.m), en la Provincia de Salta, al noreste de Argentina, con un clima semiárido frío, correspondiente al clima Bsk en la clasificación climática de Köppen-Geiger (Peel et al., 2007). Se caracteriza por inviernos fríos y veranos templados o cálidos, con precipitaciones escasas. Las mediciones se realizaron utilizando un piranómetro de la marca Kipp & Zonen, modelo CMP3 cuya constante de calibración se obtuvo mediante intercomparación “outdoor”



frente a un piranómetro Kipp & Zonen, modelo CM21 (N° de serie 051481), con trazabilidad al patrón mundial, y se registraron minutalmente en un datalogger de la marca Campbell Scientific, modelo CR1000.

El set incluye GHI medida (variable de referencia) y estimaciones de CAMS, ERA5 y del modelo de cielo claro ARGP\_V2. (Ledesma et al., 2023).

Los datos de ERA5 son horarios por defecto; CAMS tiene resolución nativa de 15 min y las mediciones tiene una frecuencia de registro de 1 min. Para igualar la resolución temporal, ERA5 se interpola 15 min y los registros minutales se integraron al mismo paso. El período analizado va del 3 de enero de 2016 al 30 de mayo de 2017, totalizando 20 886 registros de 15 min que superaron los filtros de calidad de Nollas et al. (2023).

Con el objetivo de reducir la dimensionalidad y evitar el ingreso de variables irrelevantes, se construyó una matriz de correlación entre todas las variables disponibles. Esta matriz permitió identificar aquellas variables con mayor correlación con la variable objetivo, las cuales fueron seleccionadas como variables de entrada para los modelos. En la Fig. 1 se presentan los resultados de manera gráfica, siendo las variables consideradas como posibles entradas para los modelos las que figuran en la Tabla 1.

*Tabla 1: Variables propuestas y sus definiciones.*

| <b>Símbolo / variable</b> | <b>Definición</b>                                                    |
|---------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| sza                       | Ángulo cenital solar (°)                                             |
| GHIargp2                  | GHI del modelo ARGP2 para cielo claro (W/m <sup>2</sup> )            |
| delta                     | Declinación solar (°)                                                |
| mak                       | Masa de aire (Kasten) (Ledesma et al., 2023)                         |
| TOA                       | Radiación solar incidente a tope de la atmósfera (W/m <sup>2</sup> ) |
| GHIcams                   | GHI CAMS para toda condición de cielo                                |
| GHIcamsc                  | GHI CAMS para cielo claro                                            |
| tco3                      | Ozono total (Dobson)                                                 |
| tcwv                      | Vapor de agua (kg/m <sup>2</sup> )                                   |
| AOD BC                    | AOD de carbono negro a 550 nm                                        |
| AOD DU                    | AOD de polvo a 550 nm                                                |
| AOD SS                    | AOD de sal marina a 550 nm                                           |
| AOD OR                    | AOD de materia orgánica a 550 nm                                     |
| AOD SU                    | AOD de sulfato a 550 nm                                              |
| Cloud coverage            | Cobertura nubosa ( %)                                                |
| GHIera                    | GHI ERA5 para toda condición de cielo (W/m <sup>2</sup> )            |
| GHIeracc                  | GHI ERA5 para cielo claro (W/m <sup>2</sup> )                        |

|     |                                         |
|-----|-----------------------------------------|
| msl | Presión al nivel del mar                |
| ie  | Flujo instantáneo de humedad            |
| hcc | Cobertura de nubes altas                |
| d2m | Punto de rocío a 2 m                    |
| ghi | GHI medida en tierra ( $\text{W/m}^2$ ) |

Se puede observar que la serie de referencia (GHI) tiene una mayor correlación, en magnitud, con las variables: *sza*, *GHIargp2*, *mak*, *TOA*, *GHIcams*, *GHIcamsc*, *GHIera*, *GHIeracc* y, por lo tanto, son estas variables las que se utilizaron como datos de entrada.

Si bien algunas variables presentan una correlación negativa, esto refleja una relación inversa entre ellas: cuando una aumenta, la otra disminuye de manera proporcional (por ejemplo, a mayor ángulo cenital menor valor de irradiancia).

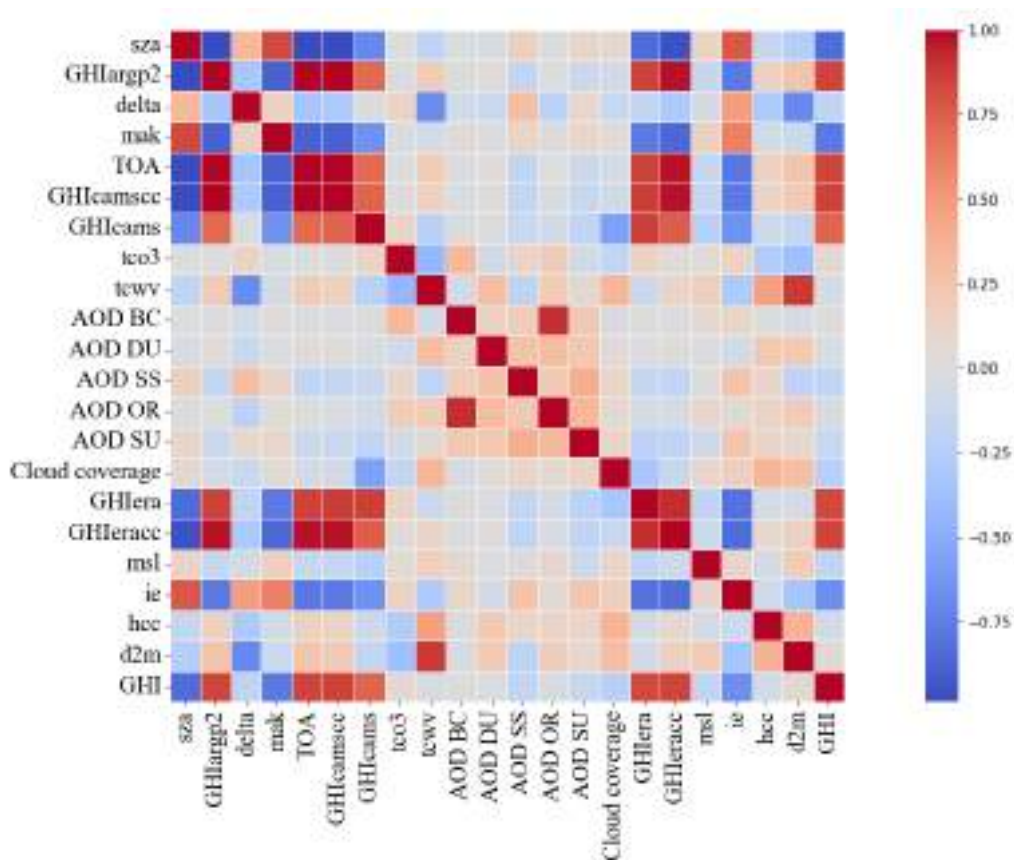


Figura 1: Matriz de correlación entre las variables correspondientes al archivo de datos de trabajo.

### Generación de huecos sintéticos

Para evaluar el desempeño de los modelos, se generaron huecos sintéticos en la serie de datos. Este enfoque permite comparar los valores predichos por los modelos con los valores reales, lo que facilita la evaluación de la precisión. Con el objetivo de poder simular datos faltantes reales, se consideraron tres parámetros fundamentales: **porcentaje de días** a los cuales se le generarán los huecos, **cantidad de huecos** en los días seleccionados y **tamaño de los huecos**. Cabe destacar que, tanto la ubicación de

los huecos en el día, como la elección de los días se realizan de manera aleatoria, con la consideración de que no se repita la misma posición y evitar solapamientos.

Se plantean tres escenarios en los que se introducen datos faltantes en el 10 %, 30 % y 50 % del total de días analizados. Para cada uno de estos escenarios, se consideran dos configuraciones: una de corta duración y mayor frecuencia (12 huecos por día, cada uno con 1 dato faltante) y otra de larga duración pero menor frecuencia (3 huecos por día, cada uno con 4 datos faltantes).

En cada escenario los modelos se entrenan con la totalidad de la serie excepto los puntos que fueron simulados como faltantes; de esta forma se busca reproducir una situación operativa en la que solo se dispone de fragmentos medidos.

### ***Modelos de machine learning***

#### ***Regresión Lineal Simple (SLR).***

El modelo SLR se utilizó para estimar los valores en función de una única variable dependiente, en este caso se consideraron cinco opciones: GHlcams, GHiera GHlcamscc, GHieracc y GHlargp2. La ecuación del modelo es:

$$y_{adaptado} = ax_{estimado} + b \quad (1)$$

donde  $a$  y  $b$  son los coeficientes del modelo, los cuales se obtienen del entrenamiento considerando todos los datos disponibles, excepto aquellos correspondientes a los huecos generados en cada escenario planteado. Este modelo es simple y rápido de implementar, pero puede no capturar relaciones complejas entre las variables.

#### ***Regresión Lineal Múltiple (MLR).***

El modelo MLR incluyó múltiples variables independientes: GHlcamscc, TOA, GHlargp2, GHieracc, GHiera, GHlcams, mak y ie. El procedimiento es análogo al caso anterior, solo que en este caso se utiliza una regresión lineal múltiple. La forma de la función que realiza la adaptación tiene la forma de la Ec. 2.

$$y_{adaptado} = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n + b \quad (2)$$

Se deben encontrar ahora los coeficientes  $a_i$  (con  $1 \leq i \leq n$ , con  $n$  la cantidad de variables consideradas) y  $b$ . Para ello se consideran todos los datos disponibles, excepto aquellos correspondientes a los huecos generados en cada escenario planteado.

#### ***Perceptrón Multicapa (MLP).***

El modelo MLP es una arquitectura de red neuronal artificial que sigue un esquema feed-forward, compuesta por capas densamente conectadas, donde cada neurona aplica una transformación no lineal (función de activación) a una combinación lineal de sus entradas. Para optimizar su rendimiento, se realizó una búsqueda de cuadrícula (grid search) evaluando diferentes configuraciones de arquitectura de hiperparámetros como se presenta en la Tabla 2.

Durante el entrenamiento del MLP se aplicó validación cruzada de 3 folds. En este procedimiento, la serie se dividió en tres subconjuntos de igual tamaño: en cada iteración, dos tercios de los datos se utilizaron para el entrenamiento y el tercio restante para validación, rotando los subconjuntos de modo

que cada partición fue usada una vez como conjunto de validación. Este esquema no constituye una partición fija en conjuntos de entrenamiento y prueba como en problemas de predicción generalizable, sino que permitió evaluar de manera robusta el desempeño de los modelos dentro de la misma serie y aplicar early stopping para reducir el riesgo de sobreajuste. Tanto la validación cruzada como el early stopping fueron implementadas mediante un GridSearchCV (Pedregosa et al., 2012). La validación cruzada permite estimar de manera robusta el desempeño del modelo mediante la partición repetida del conjunto de datos, mientras que el early stopping interrumpe el entrenamiento cuando no se observa mejora en el rendimiento sobre un subconjunto de validación, evitando así un ajuste excesivo a los datos de entrenamiento.

Tabla 2: Configuración del MLP para GridSearchCV

| Aspecto                     | Configuración                                                                                                                                                                           |
|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Arquitecturas               | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 1capa: <math>(n), (2n)</math></li> <li>• 2capas: <math>(n, n), (n, 2n)</math></li> <li>• 3capas: <math>(n, n, n), (n, n, 2n)</math></li> </ul> |
| Función de activación       | ReLU                                                                                                                                                                                    |
| Regularización ( $\alpha$ ) | $10^{-4}, 10^{-3}, 10^{-2}$                                                                                                                                                             |
| Validación cruzada          | 3-fold                                                                                                                                                                                  |

Cabe destacar que no se realiza una separación tradicional de los datos entre conjunto de entrenamiento y testeo como se hace habitualmente en problemas de predicción generalizables. Esto se debe a que el objetivo principal no es desarrollar modelos que sean capaces de generalizar a nuevos datos, sino estimar de manera precisa los valores faltantes dentro de un conjunto de datos específico.

### Métricas de desempeño

Para evaluar los modelos se utilizaron las siguientes métricas: la desviación media del sesgo (MBD), que indica si el modelo tiende a sobreestimar o subestimar sistemáticamente los valores; el error absoluto medio (MAE), que mide el tamaño promedio del error sin considerar su dirección; y el desvío cuadrático medio (RMSD), que penaliza más los errores grandes y refleja la dispersión general del error.

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i - x_i \quad (3)$$

$$RMSD = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - x_i|} \quad (4)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - x_i| \quad (5)$$

donde:

$x$  = Valor medido

$y$  = Valor estimado

$n$  = Tamaño de la muestra

Estas métricas pueden expresarse en términos relativos como porcentaje de la media de los valores medidos ( $\bar{x}$ ), denominados aquí rMBE, rRMSD y rMAE respectivamente.

## RESULTADOS

### Comparación entre la serie de referencia y las series estimadas

Antes de comparar estadísticamente las series, se analiza la distribución de condiciones de cielo mediante el índice de claridad  $k_t = GHI/TOA$ . La Fig. 2 muestra que el valor más frecuente es  $k_t \approx 0,75$ , indicando que la mayor parte de los registros corresponden a cielo despejado y que los períodos fuertemente nublados son minoritarios en el sitio.

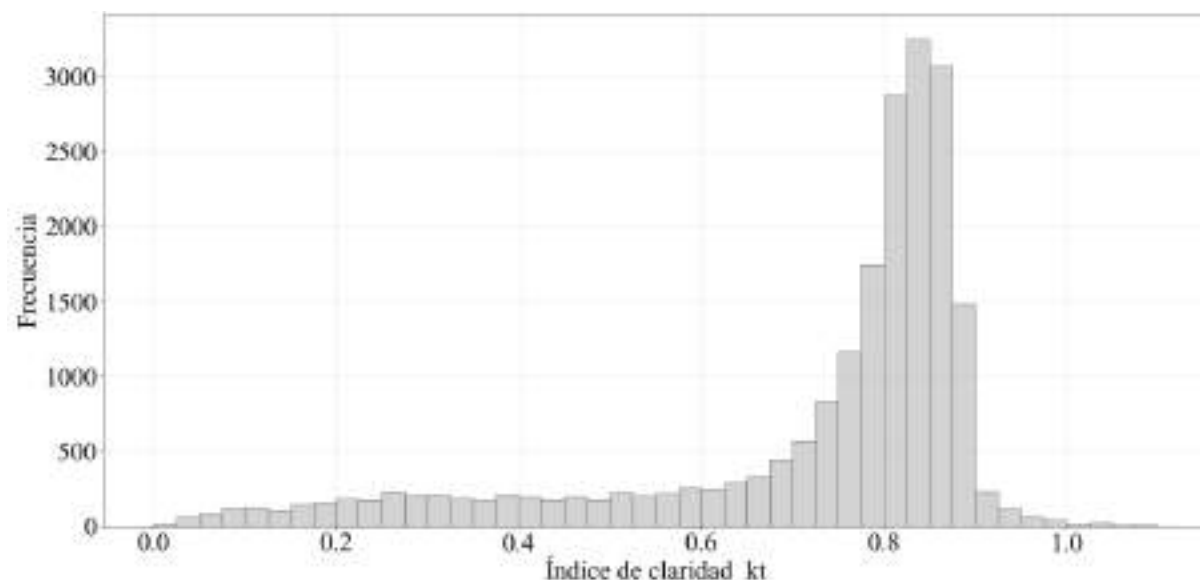


Figura 2: Distribución del índice de claridad ( $k_t$ ) para la serie de referencia (15 min).

En la Fig. 3 se presentan los diagramas de caja (boxplot) que resumen la distribución de los valores de las distintas series de GHI, incluyendo sus cuartiles, medianas y valores extremos. Esto nos permite caracterizar y comparar las distintas series de irradiancia consideradas.

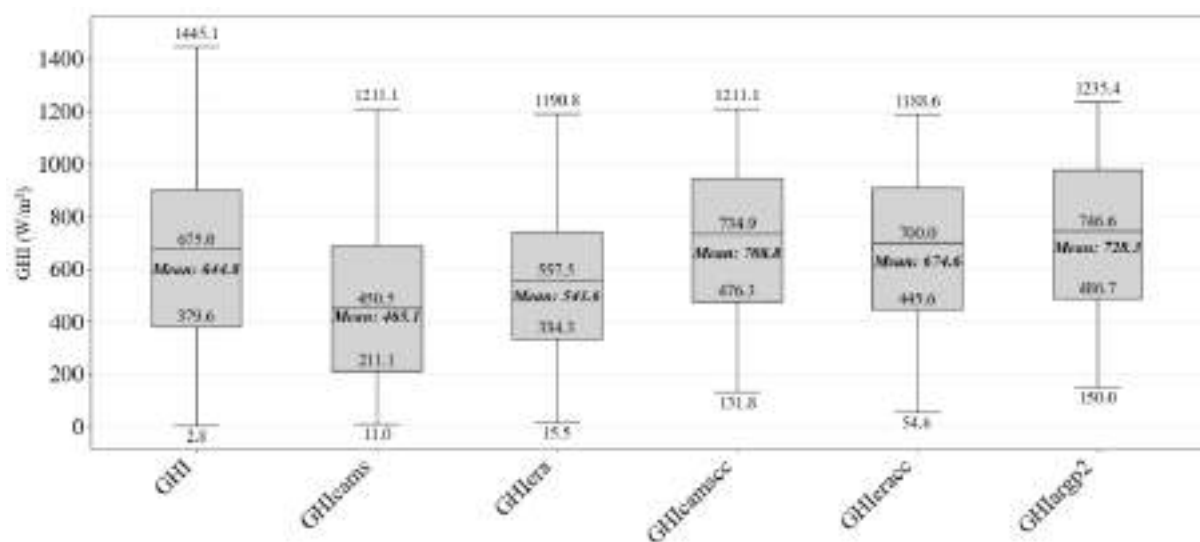


Figura 3: Diagrama de caja (boxplot) de las cinco series de irradiancia global horizontal (GHI) consideradas en el estudio, correspondientes a diferentes fuentes de datos (CAMS, ERA5 y ARG2). Las series presentan una frecuencia temporal de 15 minutos.

El comportamiento relativo de los productos de GHI modelado frente a las mediciones se resume en la Fig. 4. A simple vista, tanto CAMS como ERA5 subestiman la GHI ( $\sim 27\%$  y  $\sim 15\%$  respectivamente)

bajo toda condición de cielo, mientras que los modelos de cielo claro, aunque sobreestiman, exhiben desviaciones menores. Esta diferencia confirma la limitación de CAMS para representar la GHI en sitios como el estudiado, señalada por los autores Qu et al. (2017) y Ledesma et al. (2025). Llama la atención que GHlcamscc muestre un mejor desempeño que GHlarp2, aunque este último fue calibrado incluyendo El Rosal entre sus estaciones de ajuste; sin embargo, ese resultado es coherente con lo reportado por los propios autores de ARGP2 (Ledesma et al., 2023).

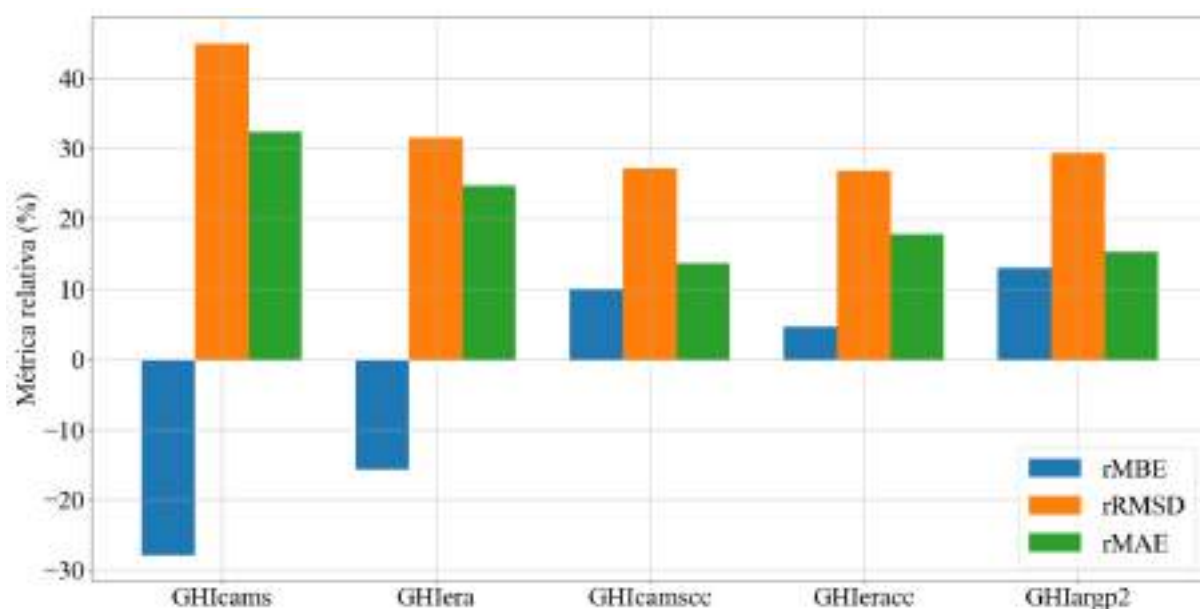


Figura 4: Métricas de desempeño entre los valores observados (GHI) y los valores estimados por CAMS, ERA5 y ARGP2, considerando los valores medios presentados en al Fig.2

En cuanto a las métricas con residuos cuadráticos, GHlraacc presentó un mejor desempeño, seguido por GHlcamscc, GHlarp2, GHlra, y finalmente GHlcams, que registró los mayores errores. Sin embargo, al considerar el error absoluto medio relativo, el orden cambia: el valor más bajo corresponde a GHlcamscc, seguido por GHlarp2, GHlraacc, GHlra y, nuevamente, GHlcams. La predominancia de cielo claro detectada en la distribución de  $k_t$  (ver Fig. 2) explica por qué los modelos de cielo claro registran los errores más bajos.

Estas diferencias sugieren que mientras GHlraacc minimiza mejor los errores grandes, GHlcamscc podría estar más cerca de los datos de la serie de referencia, lo que indica un comportamiento más consistente y robusto frente a valores extremos.

### Evaluación de los modelos

En las Tablas 3 y 4 se presentan los valores de rMBE, rRMSD y rMAE obtenidos para cada modelo y conjunto de datos en los distintos escenarios de huecos sintéticos, para los casos de mayor frecuencia y corta duración, y para los casos de menor frecuencia y larga duración respectivamente. Los valores relativos están referidos a la media de los valores medidos correspondientes a los huecos generados en cada escenario. Los resultados muestran que el modelo MLP —arquitectura de dos capas ocultas con 9 y 18 neuronas, y regularización L2 con  $\alpha = 0,01$  (factor de penalización de los pesos grandes para reducir el sobre-ajuste)— obtuvo el mejor desempeño en términos generales, logrando los valores más bajos de error relativo en comparación con los demás enfoques.

En particular, los modelos basados en ML (SLR, MLR y MLP) superan en precisión a las estimaciones de los conjuntos de datos satelitales CAMS y ERA5. Estos resultados resaltan la eficacia de los enfoques de ML en la imputación de datos faltantes en series temporales de GHI, especialmente en escenarios con grandes pérdidas de información.

Tabla 3: Resultados de  $rMBE$ ,  $rRMSD$  y  $rMAE$  para diferentes modelos y porcentajes de días con datos faltantes en el caso de mayor frecuencia y corta duración.

| Modelo         | 10%    |         |        | 30%    |         |        | 50%    |         |        |
|----------------|--------|---------|--------|--------|---------|--------|--------|---------|--------|
|                | $rMBE$ | $rRMSD$ | $rMAE$ | $rMBE$ | $rRMSD$ | $rMAE$ | $rMBE$ | $rRMSD$ | $rMAE$ |
| CAMS           | -25.5  | 43.4    | 30.1   | -26.2  | 43.1    | 30.3   | -25.9  | 42.1    | 29.6   |
| ERA5           | -14.7  | 31.3    | 25     | -15.8  | 31      | 24.7   | -16.1  | 30.4    | 24.2   |
| SLR (GHlcamsc) | -0.4   | 25.8    | 17.2   | -0.7   | 24.4    | 16.7   | -1.7   | 23.4    | 16     |
| SLR (GHlcam)   | 0.6    | 33.2    | 26.3   | 1.5    | 32.5    | 25.7   | 1.2    | 31.5    | 25     |
| SLR (GHlacc)   | 0.7    | 26.4    | 19.1   | 0.7    | 25.7    | 18.6   | -1.6   | 24.9    | 17.9   |
| SLR (GHlra)    | 0.7    | 27.6    | 21.8   | 0.6    | 26.7    | 20.7   | -0.5   | 25.7    | 19.8   |
| SLR (GHlarp2)  | -0.7   | 26.6    | 17.9   | -1     | 25.3    | 17.4   | -2.4   | 24.2    | 16.8   |
| MLR            | 0.6    | 24.1    | 15.5   | 0.2    | 24.4    | 15.7   | -0.5   | 21.4    | 13.9   |
| MLP            | 0.9    | 21      | 12.6   | 0.1    | 20.2    | 12.3   | -0.3   | 19      | 11.4   |

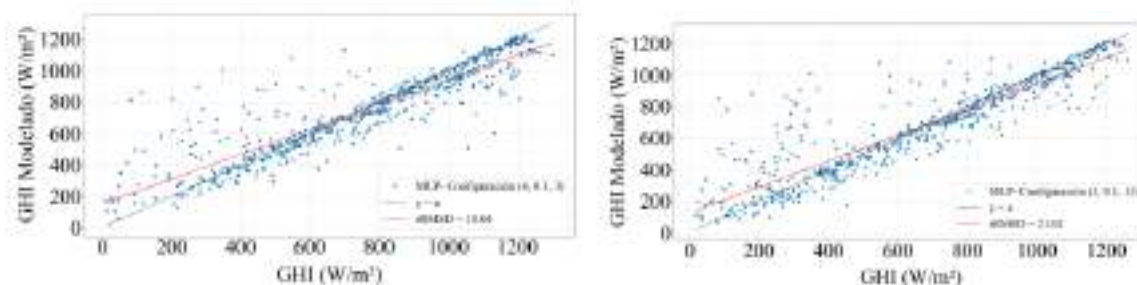
Tabla 4: Resultados3 de  $rMBE$ ,  $rRMSD$  y  $rMAE$  para diferentes modelos y porcentajes de días con faltantes en el caso de menor frecuencia y larga duración.

| Modelo         | 10%    |         |        | 30%    |         |        | 50%    |         |        |
|----------------|--------|---------|--------|--------|---------|--------|--------|---------|--------|
|                | $rMBE$ | $rRMSD$ | $rMAE$ | $rMBE$ | $rRMSD$ | $rMAE$ | $rMBE$ | $rRMSD$ | $rMAE$ |
| CAMS           | -25.7  | 41.6    | 29.4   | -26.9  | 42.4    | 30.4   | -26.5  | 41.7    | 29.8   |
| ERA5           | -15.8  | 28.1    | 22.3   | -16.5  | 29.3    | 23.5   | -16.8  | 29.2    | 23.4   |
| SLR (GHlcamsc) | -2.4   | 21.2    | 14.5   | -1.5   | 22.3    | 15.7   | -2     | 22.4    | 15.6   |
| SLR (GHlcam)   | -4.4   | 31      | 24.4   | -1.7   | 30.9    | 24.4   | -1.4   | 30.1    | 23.7   |
| SLR (GHlacc)   | -2.7   | 21.3    | 15.3   | -2     | 23.3    | 17.2   | -2.5   | 23.4    | 17     |
| SLR (GHlra)    | -2     | 23.4    | 18.2   | -1.6   | 24.2    | 18.8   | -1.8   | 24      | 18.4   |
| SLR (GHlarp2)  | -2.9   | 21.9    | 15.3   | -1.9   | 23.1    | 16.6   | -2.5   | 23.2    | 16.4   |
| MLR            | -1     | 19.9    | 13.1   | -0.6   | 20.4    | 13.8   | -0.7   | 20.4    | 13.5   |
| MLP            | -0.9   | 18      | 10.8   | -0.4   | 18.4    | 11.3   | -0.4   | 18.1    | 11.1   |

En las Figs. 5, 6 y 7 se presentan los gráficos de dispersión entre la medición terrestre y la estimación

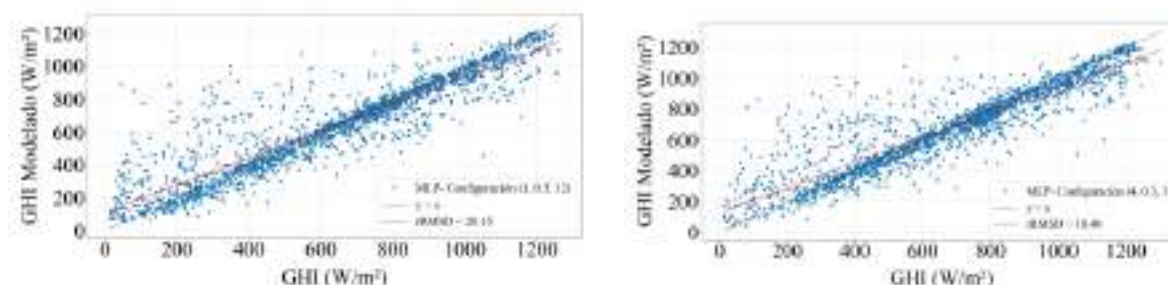


obtenida con el MLP, para las configuraciones correspondientes al 10 %, 30 % y 50 % de días con datos faltantes en la serie respectivamente. A simple vista se observa que, en todos los casos considerados, el modelo presenta una sobreestimación en condiciones de baja irradiancia (ej: cielos nublado, amanecer/atardecer), mientras que en condiciones de alta irradiancia (ej: cielos despejados, mediodía solar) el modelo subestima.



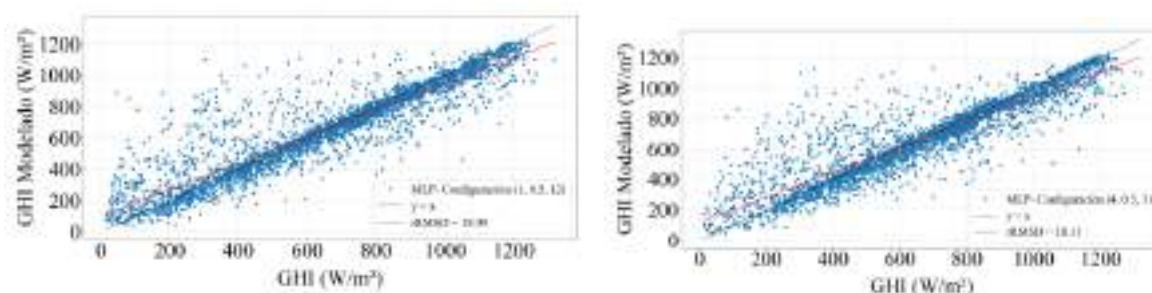
(a) Configuración: 12 huecos de tamaño 1. (b) Configuración: 3 huecos de tamaño 4.

Figura 5: Gráfico de dispersión entre la medida y la estimación de GHI para el caso de un 10 % de días con datos faltantes.



(a) Configuración: 12 huecos de tamaño 1. (b) Configuración: 3 huecos de tamaño 4.

Figura 6: Gráfico de dispersión entre la medida y la estimación de GHI para el caso de un 30 % de días con datos faltantes.



(a) Configuración: 12 huecos de tamaño 1. (b) Configuración: 3 huecos de tamaño 4.

Figura 7: Gráfico de dispersión entre la medida y la estimación de GHI para el caso de un 50 % de días con datos faltantes.

### **Desempeño de los modelos ante distintos patrones de huecos**

Aunque se evaluaron dos patrones extremos de huecos -corta duración y alta frecuencia frente a larga duración y baja frecuencia-, no se observan diferencias significativas en el error atribuibles al tamaño o frecuencia de los huecos. Como muestran las Tablas 3 y 4, las variaciones en rRMSD entre ambos escenarios son menores al 3 % en todos los casos.

En cambio, las diferencias relevantes provienen del modelo utilizado. El MLP logra los menores errores en ambos escenarios, con rRMD entre 18.0 % y 21.0 %, seguido por la MLR, con valores entre 19.9 % y 24.1 %. Los modelos SLR presentan mayor dispersión, dependiendo de la variable regresora empleada. La GHlcamscc es la que mejores resultados aporta dentro de este grupo, con rRMSD entre 21.2 % y 25.8 %, muy por debajo de otras opciones como GHlcams o GHlera.

Para ilustrar la capacidad de reconstrucción dentro de los huecos, la Fig. 8 (cielo claro) y la Fig. 9 (cielo nublado) presentan un día de ejemplo para las configuraciones extremas:

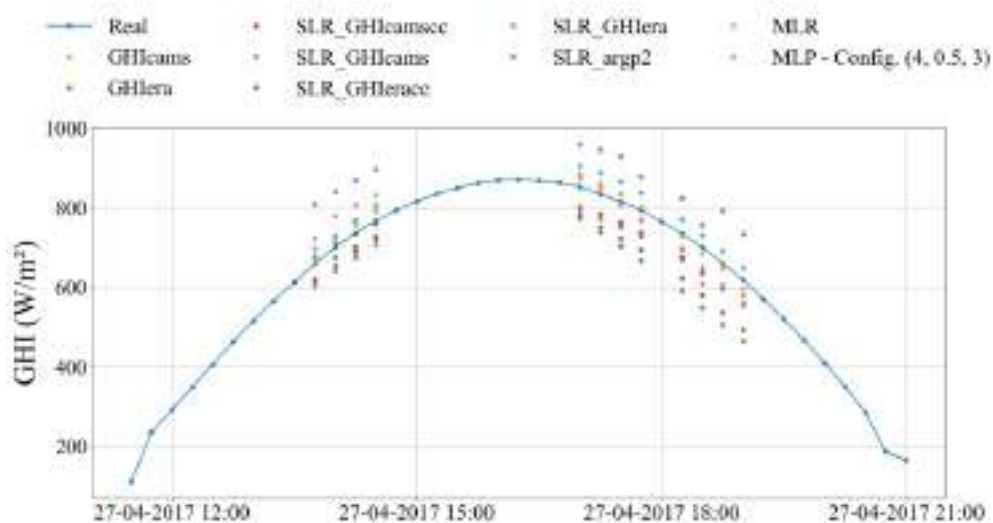
- 12 huecos de tamaño 1 (frecuente y breve)
- 3 huecos de tamaño 4 (poco frecuente y prolongado)

ambas evaluadas con 10 % y 50 % de días con datos faltantes. En cada gráfico se indica la serie medida (en azul) junto con las estimaciones de todos los modelos, permitiendo observar directamente cómo cada método recupera los datos de irradiancia dentro de los intervalos perdidos.

Cabe destacar que para el entrenamiento de los modelos se consideraron todos los datos disponibles en la serie, teniendo en cuenta el escenario de datos faltantes generados en cada caso.



(a) Configuración: 12 huecos de tamaño 1. – 50 % de días con datos faltantes

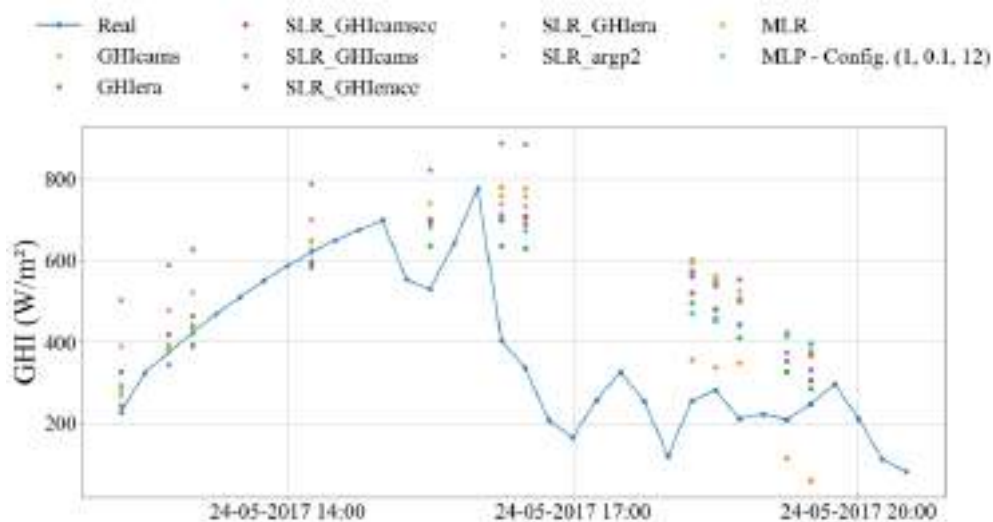


(b) Configuración: 3 huecos de tamaño 4. – 50 % de días con datos faltantes

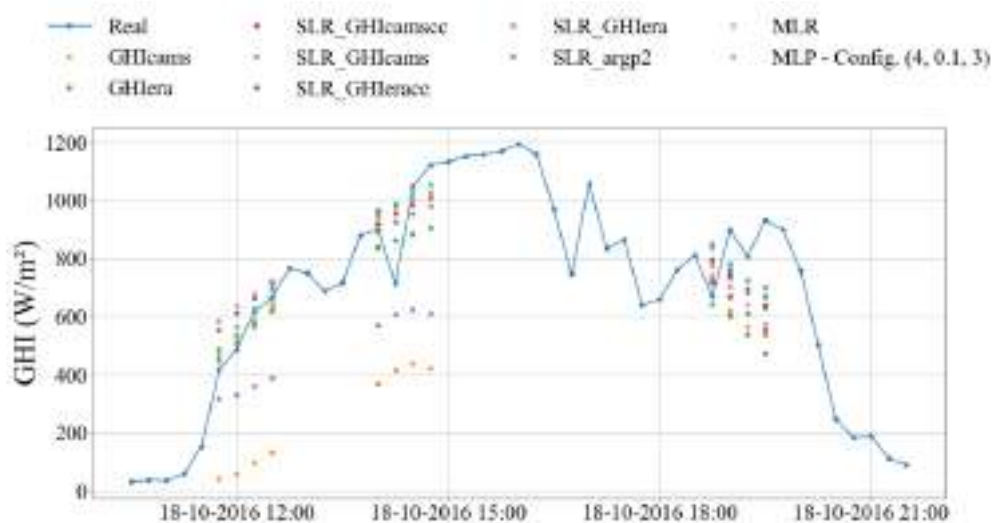
Figura 8: Día de cielo claro ejemplo para 2 configuraciones.

## DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos demuestran que el modelo MLP es superior en la reconstrucción de series de GHI con huecos sintéticos, superando tanto a los modelos más sencillos que solo consideran un ajuste lineal de los datos (SLR y MLR) como a los conjuntos de datos satelitales y de reanálisis considerados en este trabajo (CAM5 y ERA5). Esto se ve evidenciado en las métricas de desempeño (rRMSD, rMBE y rMAE).



(a) Configuración: 12 huecos de tamaño 1. – 10 % de días con datos faltantes



(b) Configuración: 3 huecos de tamaño 4. – 10 % de días con datos faltantes

Figura 9: Día de cielo nublado ejemplo para 2 configuraciones.

El mejor desempeño del modelo MLP puede atribuirse a su capacidad para capturar relaciones no lineales en los datos, lo que es especialmente útil dada la variabilidad inherente de la radiación solar. Sin embargo, es importante destacar que los modelos lineales (SLR y MLR) también mostraron un desempeño aceptable, particularmente en configuraciones con huecos de mayor tamaño y menor frecuencia. El modelo MLR, en particular, demostró ser una alternativa viable al mantener el segundo mejor desempeño en términos de rRMSD (entre 19.9 % y 20.4 %), mientras que el modelo SLR utilizando la GHI de cielo claro de CAMS (GHIcamscc) como variable regresora también mostró resultados prometedores (rRMSD entre 21.2 % y 22.3 %).

Al comparar los resultados de los modelos de ML con las estimaciones proporcionadas por CAMS y ERA5, se observó que ambos conjuntos de datos presentaron un desempeño inferior en términos de rRMSD, rMBE y rMAE. Esto sugiere que, aunque CAMS y ERA5 son herramientas útiles para la estimación de GHI a gran escala, su precisión puede verse comprometida cuando se considera un sitio de superficie reducida.

Es importante señalar que la irradiancia global horizontal (GHI) presenta un marcado ciclo intradiario asociado a la geometría solar, lo cual impacta directamente en la matriz de correlación. Variables como el ángulo cenital solar, la masa de aire o la irradiancia en el tope de la atmósfera aparecen fuertemente correlacionadas con la GHI. Una estrategia habitual para reducir este sesgo es el empleo de índices de claridad ( $k_t$  o  $k$ ), que normalizan la irradiancia respecto a su valor teórico máximo y aíslan en mayor medida la variabilidad atmosférica. En este trabajo, sin embargo, se optó por trabajar directamente con GHI, dado que la magnitud absoluta de irradiancia es la variable de mayor interés en aplicaciones energéticas y de dimensionamiento de sistemas solares.

Además, se reconoce que algunas de las variables seleccionadas presentan redundancia, en particular las asociadas a la geometría solar (sza, TOA, mak, ie) y las distintas estimaciones de irradiancia (GHIcams, GHIcamscc, GHIera, GHIeracc). No se aplicó un filtrado adicional para eliminar estas redundancias, ya que el objetivo del estudio fue evaluar el desempeño relativo de cada fuente de datos y su utilidad en la reconstrucción de huecos. Aunque la redundancia puede influir en la interpretación de las correlaciones y en la importancia relativa de los predictores, no altera las conclusiones principales, dado que los modelos se entrenaron y evaluaron bajo condiciones consistentes.

A pesar de los resultados prometedores, es importante reconocer algunas limitaciones del estudio. Por

ejemplo, el desempeño de los modelos podría variar en regiones con condiciones climáticas diferentes a la considerada en este trabajo. Asimismo, este trabajo no tiene como objetivo la obtención de un modelo generalizable a nuevas series temporales, sino la reconstrucción de patrones dentro de la misma serie. En este contexto, cierto grado de sobreajuste controlado puede ser aceptable o incluso útil, siempre que se gestionen adecuadamente los riesgos asociados, como se hace mediante el uso de técnicas como early stopping y validación cruzada KFold.

Cabe destacar que los modelos se aplicaron a una serie real previamente filtrada mediante el control de calidad; únicamente la posición y el tamaño de los huecos fueron controlados para simular condiciones operativas. Por tanto, las métricas reportadas deben tomarse como referencia: en la práctica la cantidad y extensión de los huecos son estocásticos y podrían incrementar tanto el sesgo como la dispersión.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se evaluaron métodos de imputación atemporal de irradiancia solar global (GHI) mediante tres enfoques de machine learning (SLR, MLR y MLP) y bases de datos satelitales y de reanálisis (CAMS, ERA5). El objetivo fue identificar la estrategia más precisa para estimar datos faltantes bajo distintos porcentajes de días (10 %, 30 % y 50 %) con datos faltantes, y dos patrones de huecos sintéticos (corta y larga duración).

Los resultados muestran que el tamaño o la frecuencia de los huecos no influyen significativamente en el error; las diferencias de rRMSD entre ambos patrones fueron siempre menores al 3 %. La jerarquía de desempeño está determinada por el modelo: MLP alcanza los menores errores (rRMSD entre 18 % y 21 %), seguido por MLR (rRMSD entre 20 % y 24 %) y SLR con GHICamscc (rRMSD entre 21 % y 26 %). Todas las métricas se calcularon respecto a la media local de cada escenario, lo que refuerza el carácter atemporal del análisis.

La capacidad del MLP para reconstruir series, incluso con altos porcentajes de ausencia, resulta clave para la gestión de sistemas fotovoltaicos y la estimación de generación solar. Los modelos lineales (MLR y SLR) siguen siendo útiles cuando se prioriza simplicidad o bajo costo computacional.

Cabe señalar que las series de cielo claro de CAMS y ERA5 reproducen mejor la variabilidad diaria de la GHI medida que sus homólogas para toda condición de cielo, lo cual se justifica por el predominio local de días despejados. En consecuencia, es esperable que la imputación de huecos correspondientes a días no claros presente una precisión menor.

Como trabajo futuro se propone explorar las diferentes configuraciones de los modelos que pueden ser aplicados para la imputación de datos faltantes, como así también su aplicabilidad en otras ubicaciones geográficas y bajo diferentes condiciones atmosféricas.

## REFERENCIAS

- Alonso-Suárez, R. (2017). *Estimación del recurso solar en Uruguay mediante imágenes satelitales*. Tesis doctoral, Universidad de la República.
- Cabrera, S. R., Teixeira-Branco, V., Medeiros, J. V. F. F., y Alonso-Suárez, R. (2024). Accurate estimation of solar pv power plant capacity factors in Uruguay through detailed quality control and satellite gap filling. En *2024 IEEE URUCON*, pp. 1–5.
- Demirhan, H. y Renwick, Z. (2018). Missing value imputation for short to mid-term horizontal solar irradiance data. *Applied Energy*, 225:998–1012.
- He, M., Luo, Z., Xie, X., Wang, P., Wang, H., y Zapata-Lancaster, G. (2025). Gap filling crowdsourced air temperature data in cities using data-driven approaches. *Building and Environment*, 271:112593.

- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., De Chiara, G., Dahlgren, P., Dee, D., Diamantakis, M., Dragani, R., Flemming, J., Forbes, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hogan, R. J., Hólm, E., Janisková, M., Keeley, S., Laloyaux, P., Lopez, P., Lupu, C., Radnoti, G., de Rosnay, P., Rozum, I., Vamborg, F., Villaume, S., y Thépaut, J.-N. (2020). The era5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730):1999–2049.
- Inness, A., Ades, M., Agustí-Panareda, A., Barré, J., Benedictow, A., Blechschmidt, A.-M., Dominguez, J. J., Engelen, R., Eskes, H., Flemming, J., Huijnen, V., Jones, L., Kipling, Z., Massart, S., Parrington, M., Peuch, V.-H., Razinger, M., Remy, S., Schulz, M., y Suttie, M. (2019). The cams reanalysis of atmospheric composition. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(6):3515–3556.
- Iturbide, P., Alonso-Suarez, R., y Ronchetti, F. (2023). An analysis of satellite-based machine learning models to estimate global solar irradiance at a horizontal plane. En Naiouf, M., Rucci, E., Chichizola, F., y De Giusti, L., editores, *Cloud Computing, Big Data & Emerging Topics*, pp. 118–128, Cham. Springer Nature Switzerland.
- Ledesma, R., Alonso-Suárez, R., Salazar, G., Nollas, F., y Vilela, O. (2025). Evaluation of satellite and reanalysis models for solar irradiance estimation in northwest argentina. *IEEE Latin America Transactions*, 23(8):706–717.
- Ledesma, R. D., Salazar, G. A., y de Castro Vilela, O. (2023). Argp-v2 un modelo práctico para la estimación de irradiancia global horizontal en condiciones de cielo claro para sitios de altura. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente - AVERMA*, 26:283–289.
- Muneer, T. y Fairouz, F. (2002). Quality control of solar radiation and sunshine measurements – lessons learnt from processing worldwide databases. *Building Services Engineering Research and Technology*, 23(3):151–166.
- Nollas, F. M., Salazar, G. A., y Gueymard, C. A. (2023). Quality control procedure for 1-minute pyranometric measurements of global and shadowband-based diffuse solar irradiance. *Renewable Energy*, 202:40–55.
- Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., Blondel, M., Prettenhofer, P., Weiss, R., Dubourg, V., Vanderplas, J., Passos, A., Cournapeau, D., Brucher, M., Perrot, M., Duchesnay, E., y Louppe, G. (2012). Scikit-learn: Machine learning in python. *Journal of Machine Learning Research*, 12.
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., y McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the köppen-geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(5):1633–1644.
- Qu, Z., Oumbe, A., Blanc, P., Espinar, B., Gesell, G., Gschwind, B., Klüser, L., Lefèvre, M., Saboret, L., Schroedter-Homscheidt, M., y Wald, L. (2017). Fast radiative transfer parameterisation for assessing the surface solar irradiance: The Heliosat-4 method. *Meteorologische Zeitschrift*, 26(1):33–57.
- Schwandt, M., Chhatbar, K., Meyer, R., Fross, K., Mitra, I., Vashistha, R., Giridhar, G., Gomathinayagam, S., y Kumar, A. (2014). Development and test of gap filling procedures for solar radiation data of the indian srna measurement network. *Energy Procedia*, 57:1100–1109. 2013 ISES Solar World Congress.
- Sengupta, M., Habte, A., Wilbert, S., Gueymard, C., y Remund, J. (2021). Best practices handbook for the collection and use of solar resource data for solar energy applications: Third edition. Technical report, National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States).

**RECONSTRUCTION OF GLOBAL HORIZONTAL IRRADIANCE SERIES WITH  
SYNTHETIC GAPS USING MACHINE LEARNING MODELS AND SATELLITE DATA.  
CASE STUDY: EL ROSAL, SALTA**

**ABSTRACT:** Global Horizontal Irradiance (GHI) is a key variable for the design and optimization of solar energy systems, but its records often contain missing data due to instrument failures or maintenance. This work compares three machine-learning-based imputation strategies —simple linear regression (SLR), multiple linear regression (MLR) and multilayer perceptron (MLP)— for filling missing data. Satellite products (CAMS), reanalysis data (ERA5) and estimates from the ARGP2 model are also used to improve prediction accuracy. To evaluate model performance, synthetic gaps were generated semi-randomly in a GHI time series from El Rosal, Salta, Argentina. In all cases MLP achieved the lowest errors (rRMSD entre 18 % y 21 %), followed by MLR (rRMSD entre 20 % y 24 %) and SLR (rRMSD entre 21 % y 26 %).

**Keywords:** Solar irradiance, machine learning, CAMS, ERA5, time series, gap-filling.



## ESTIMADOR FÍSICO DE IRRADIANCIA SOLAR DE CIELO CLARO ADAPTADO PARA ALTITUDES VARIABLES EN AMÉRICA DEL SUR

Juan C. Ceballos<sup>1,2</sup>, Simone M.S. da Costa<sup>1,2</sup>, Hallan S. Jesus<sup>2</sup>, Jorge Forciniti<sup>3</sup>,  
María L. Molina<sup>4</sup>, Martín Leal<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Divisão de Satélites e Sensores Meteorológicos - DISSM/Coordenação Geral de Ciências da Terra – CGCT, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, Cachoeira Paulista, Brasil

<sup>2</sup> Grupo de Pesquisa G-STAR - DISSM/CGCT/INPE, Brasil  
Teléfono 55 12 3208 8750 - email [j.cebal33@gmail.com](mailto:j.cebal33@gmail.com)

<sup>3</sup> Sección Agrometeorología, Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres.  
CC N° 9 (4101) Las Talitas –Tucumán – Argentina

<sup>4</sup> Laboratorio de Ionosfera, Atmósfera Neutra y Magnetosfera – LIANM, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán - Tucumán – Argentina

**RESUMEN:** Se describe la estructura y parametrizaciones de un modelo físico de estimación de irradiancia solar global (GHI) para cielo claro, denominado GL0.2, que integra el efecto de ozono y columna de vapor de agua, así como la influencia de la altitud de la localidad considerada. Las variables fundamentales son la presión en superficie, el agua precipitable y la presión atmosférica ponderada con el perfil vertical de humedad. Estas variables pueden ser extraídas del reanálisis de campos meteorológicos accesible en internet. Usando datos (irradiancias G) de estaciones del Noroeste argentino y Norte chileno con altitudes de hasta 4000 m, comparaciones iniciales con los ciclos diarios de irradiancia son promisoras. Los resultados sugieren desviaciones  $\delta G = GL0.2 - G$  de  $10-50 \text{ W m}^{-2}$  durante el ciclo diario, con desviación media diaria y desvío estándar de  $-1 \pm 11 \text{ W m}^{-2}$  para piranómetros de precisión y  $+22 \pm 8 \text{ W m}^{-2}$  para solarímetros usuales.

**Palabras clave:** irradiancia solar, Noroeste Argentino, Norte Chile, modelado

### INTRODUCCIÓN

Estimadores de radiación solar con cielo claro son de gran importancia como referencia para modelos complejos que incluyan elementos atmosféricos adicionales como aerosoles, nubes y otros gases; por ellos mismos, son de gran valor en el diagnóstico de potencial energético local. Existe un gran número de algoritmos para estimar radiación solar en cielo claro, desde los clásicos simplificados como ASHRAE (Barbaro et al. 1988) hasta parametrizaciones de métodos complejos de evaluación (Gueymard 1989). Compilaciones de numerosos algoritmos se encuentran en Iqbal (1984) y Antonanzas-Torres et al. (2019). Sin embargo, deben ser anotadas dos limitaciones usuales: por un lado, los modelos en si suelen ser desarrollados y testeados para locales de baja altitud, con parametrizaciones que dependen de condiciones atmosféricas locales; por otro lado, mediciones necesarias para validarlos en locales elevados son escasas. Regiones orográficamente complejas como los Andes, con evidente potencial en energía solar, exhiben esa limitación. Para el Noroeste Argentino y Norte de Chile, pueden ser mencionados modelos semiempíricos como el ARG-P (Salazar et al., 2010) o el presentado por Ortiz et al. (2010), así como comparaciones con modelos internacionales (Checura Díaz et al., 2012). Modelos físicos son (con limitaciones) directamente aplicables a cualquier región, desde siempre que algunos parámetros atmosféricos estén disponibles: el de Lacis y Hansen (1974) es un ejemplo. El modelo GL0 (Ceballos, 2000) se deriva parcialmente de este último para estimar radiación dispersada/absorbida por atmósfera limpia, pero su comportamiento es adecuado para bajas altitudes. En este trabajo describimos una versión GL0.2 diseñada de forma independiente de modelos previos, capaz de describir la



irradiancia solar en condiciones de cielo claro y en altitudes variables, y presentamos algunas comparaciones preliminares con medidas regionales.

## EL MODELO DE CIELO CLARO GL0.2

La Figura 1 ilustra el espectro solar con la atenuación de irradiancia GHI provocada por dispersión Rayleigh y absorción por vapor de agua (H<sub>2</sub>Ov). La absorción por ozono (O<sub>3</sub>) se concentra especialmente en el espectro UV en  $\lambda < 0,3 \mu\text{m}$ . La Figura 1 sugiere partir el análisis en dos intervalos espectrales: ultravioleta (UV) más visible (VIS) e infrarrojo cercano (NIR), o sea UVNIR:(0,3-0,8  $\mu\text{m}$ ), e infrarrojo solar IRS:(0,8-3  $\mu\text{m}$ ). Una atmosfera limpia absorbe en el UVNIR a través de la presencia de O<sub>3</sub>, intensamente en el UV (en  $\lambda < 0,3 \mu\text{m}$ ) y débilmente en el VIS. Despreciamos la existencia de líneas de absorción de O<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub> en el VIS. Adicionalmente, el flujo direccional  $S_0$  incidente en el tope de la atmósfera (“constante solar”) es atenuado por dispersión Rayleigh (no absorbente) generada por la mezcla O<sub>2</sub> + N<sub>2</sub>. El intervalo IRS tiene dispersión despreciable pero presenta absorción por vapor (H<sub>2</sub>Ov) y anhídrido carbónico (CO<sub>2</sub>).

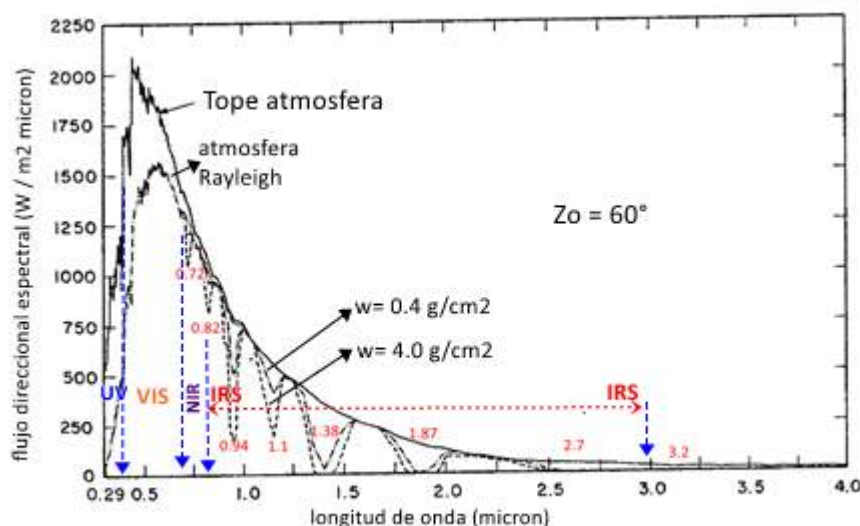


Figura 1. Espectro del flujo direccional solar, ángulo cenital  $Z_0 = 60^\circ$  (“air mass” = 2), ilustrando los efectos de atenuación debidos a dispersión Rayleigh por el aire y a absorción por agua precipitable  $w = 0,4$  y  $4,0 \text{ g cm}^{-2}$  (adaptado de Iqbal 1983)

### Espectro 0,3-0,8 $\mu\text{m}$ (UVNIR)

La propagación de radiación en el UVNIR es descrita por una ecuación general que, para una atmosfera estratificada y radiación monocromática, se reduce a un par de ecuaciones relacionando los perfiles verticales de dos flujos: una irradiancia difusa ascendente  $E^\uparrow$  y otra descendente  $E^\downarrow$  (Liou, 2002; Zdunkowski et al., 2007). La propagación admite una descripción como proceso estocástico, donde fotones “directos” incidentes en el tope de una atmósfera estratificada en  $N$  capas se propagan hasta interactuar en una de ellas y devenir absorbidos o transferidos (dispersados) a una dirección ascendente o descendente, como fotones “difusos”. Así, se inicia un paseo aleatorio con los fotones transitando entre capas hasta ser absorbidos en una de ellas, en el cielo o en la tierra. Numéricamente, el proceso es descrito como cadena de Markov y las probabilidades de estado final equivalen a la fracción de flujo inicial que es absorbido “en el cielo” (reflectancia planetaria  $R_p$ ), en el suelo ( $A_{\text{ground}}$ ) y en un perfil atmosférico  $A_n$  de absorción en las  $N$  camadas. El código STOCH2F (Stochastic 2-Flux) fue diseñado para evaluar  $R_p$ ,  $A_n$ ,  $A_{\text{surf}}$  (Ceballos, 2021) para radiación monocromática en el intervalo  $\lambda$ :(0,2-0,8  $\mu\text{m}$ ) y su versión para el modelo GL 0.2 en el intervalo UVNIR está detallada en Ceballos (2024). Describimos a continuación sus principales resultados y generación de parametrizaciones. El código

- El ozono estratosférico virtualmente elimina el flujo solar superficial en  $\lambda$ : (0,2-0,3  $\mu\text{m}$ ), y la absorción en la tropósfera es despreciable. El contenido de 225-250 Dobson Units es representativo de los valores del oeste de América del Sur y noroeste-centro de Argentina ([https://ozoneaq.gsfc.nasa.gov/products/ozone/#global\\_maps](https://ozoneaq.gsfc.nasa.gov/products/ozone/#global_maps)), poco variable anualmente y compatible con los valores de las atmosferas de referencia adoptadas en el STOCH2F.
- Referida a la irradiancia integrada en UVNIR en el tope de la atmósfera, la fracción absorbida por O3 (Aso) se concentra en la estratosfera (altitud  $z > 16 \text{ km}$ ) y puede despreciarse en la troposfera.
- En esas condiciones, y siendo  $E_{po\uparrow}$  la irradiancia emergente en el tope de la atmósfera (calculada por el STOCH2F), la irradiancia  $G_{oUVNIR}$  que llega a la superficie puede evaluarse por el simple balance de energía ( $R_s=0$ )

$$Kto = G_{\text{UVNIR}}/\mu_0 S_{\text{UVNIR}} = 1 - R_{\text{po}} - A_{\text{so}}. \quad (1b)$$

La fracción  $K_{to}$  es un índice de claridad (“clearness index”) en el UVNIR. La figura 2 (izquierda) ilustra los diversos componentes de la ecuación (1b). Dado que  $R_s=0$ , es  $G_{UVNIR} = \text{Ground} = \text{Global}$ . En la figura, a columna atmosférica tiene presión  $P_o = 1013$  hPa; sin embargo, el código STOCH2F permite considerar atmósferas con base en un nivel de presión  $P < P_o$  (condición apropiada para locales a altitud variable).

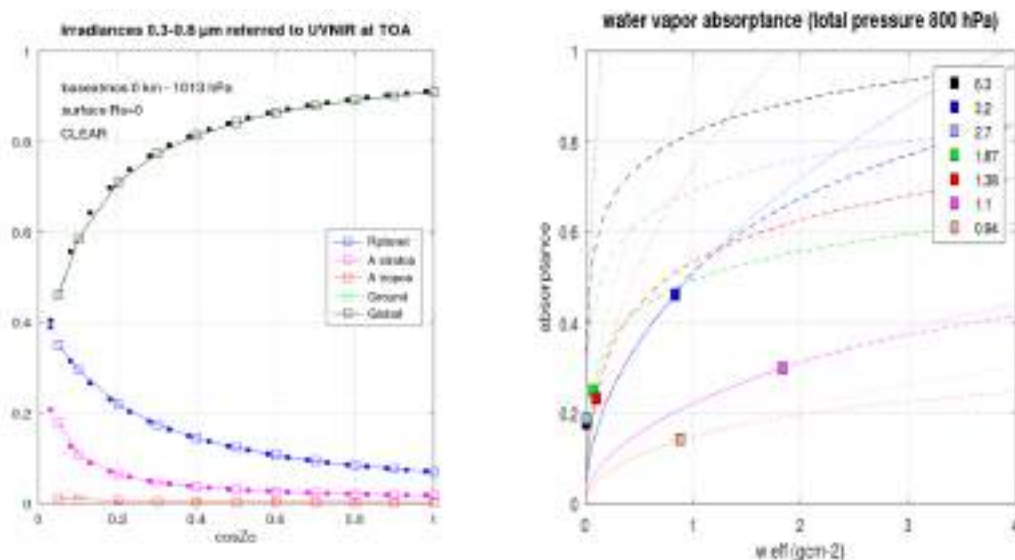


Figura 2. Izquierda: Intervalo UVNIR. Fracciones de irradiancia solar reflejada por la atmósfera, absorbida en la estratósfera y tropósfera, y absorbida en el suelo ( $R_s=0$ ). Fuente: Ceballos (2024). Derecha: Intervalo IRS. Absortancia en las diversas bandas de  $H_2O$  en función del camino óptico de vapor. Cuadrados coloridos señalan transición entre comportamiento “débil” e “intenso”. Fuente: Ceballos, Costa y Jesus (comunicación privada).

Para suelo con reflectancia  $R_s > 0$ , la radiación que llega a la superficie sufre múltiples reflexiones entre el suelo y la atmósfera, de modo que el índice  $K_{to}$  es corregido como

$$Kt_{\text{UVNIR}} = Kt_o / (1 - R_s R^*). \quad (2)$$

$R^*$  es el coeficiente de reflexión difusa de la atmósfera. A partir de los resultados del STOCH2F para varios ángulos cenitales  $Z_o$  ( $\mu_o = \cos Z_o$ ), las variables  $R_{po}$ ,  $A_{so}$  y  $R^*$  fueron interpoladas con funciones  $X(\mu_o)$  del tipo

$$X(\mu_0) = A_x / (1 + B_x \mu_0 + C_x \mu_0^2). \quad (3)$$

La Figura 2 (izquierda) refleja la calidad de ese ajuste (cuadrados: resultados del modelo; puntos: valores interpolados). Los coeficientes  $A_x$ ,  $B_x$ ,  $C_x$  son eventualmente variables con la profundidad óptica de la atmósfera (proporcional a la presión  $P$  de superficie).

### ***Espectro 0,8-3,0 $\mu\text{m}$ (IRS)***

En este intervalo espectral la atmósfera tiene dispersión Rayleigh despreciable y la absorción es realizada por el H<sub>2</sub>Ov en las bandas de 6.4, 3.2, 2.7, 1.87, 1.38, 1.1, 0.94  $\mu\text{m}$  (enumeradas 1 a 7, en lo que sigue). En 1956, Howard, Burch y Williams realizaron mediciones en laboratorio para radiación propagada en un medio vapor+gas neutro, variando las presiones de vapor  $p$  y total  $P$ . Los resultados y parametrizaciones fueron corregidos y ampliados por Roach (1961). La absorción  $Abs$  en cada banda es función del camino óptico de vapor  $w$  (en  $\text{g cm}^{-2}$ ;  $1 \text{ g cm}^{-2} = 10 \text{ kg m}^{-2}$ ) con la presión total  $P$  como parámetro e ancho espectral  $\Delta\nu$  de la banda, según dos comportamientos: “débil” para camino óptico menor que  $w_{\text{LIM}}$  o “intensa” para caminos mayores.

$$Abs(w, P) = c w^{0.5} P^k / \Delta\nu \quad (\text{“débil”}, w < w_{\text{LIM}}) \quad (4a)$$

$$Abs(w, P) = [C + D \log_{10}(w) + K \log_{10}(P)] / \Delta\nu \quad (\text{“intensa”}, w > w_{\text{LIM}}) \quad (4b)$$

La Figura 2 (derecha) ilustra el comportamiento de las bandas 1 a 7; el cuadrado coloreado indica el camino límite  $w_{\text{LIM}}$  entre los dos comportamientos. Las expresiones (4) consideran un medio homogéneo ( $P$  y  $p$  constantes). Para considerar la absorción en rayos solares descendientes en la atmósfera (con presión variable en el trayecto) se considera la aproximación de Curtis-Godson (Stephens 1984), según la cual la absorción se realiza en el camino óptico  $w$  a una presión media equivalente  $P_{\text{med}}$  (perfil vertical de  $P$  ponderado con la densidad  $\rho_v$  del vapor de agua):

$$P_{\text{med}} = \int P dw / \int dw, \quad (5)$$

$$w = \int \rho_v g dz. \quad (6)$$

Para ángulo cenital  $Z_0$  ( $\mu_0 = \cos Z_0$ ) de los rayos solares, el camino óptico efectivo de vapor es

$$w_{\text{ef}} = w / \mu_0. \quad (7)$$

La presión  $P_{\text{med}}$  varía de 850 a 550 hPa entre la llanura argentina o litoral chileno y la Cordillera de los Andes. La acción conjunta de las bandas de H<sub>2</sub>Ov sobre los rayos solares directos corresponde a la suma de las contribuciones de las eqs. (4a) y (4b):

$$\Delta S_0 = \sum_n A_n(w_{\text{ef}}, P_{\text{med}}) \cdot \delta S_{0n}, \quad n=1-7. \quad (8)$$

Aquí,  $\delta S_{0n}$  es el flujo direccional en el tope de la atmósfera asociado a la  $n$ -ésima banda (esto es, en el ancho de banda  $\Delta\nu_n$ ). La consideración de los valores  $w$  y de los límites  $w_{\text{LIM}}$  lleva a las expresiones

$$\Delta S_0 = \kappa P^{0.265} w_{\text{ef}}^{0.5} + \alpha + \beta \log_{10}(w_{\text{ef}}) + \gamma \log_{10}(P_{\text{med}}) + F_{\text{owle}}, \quad (9)$$

$$\kappa = \sum_{n=6-7} C_n dS_n, \quad \alpha = \sum_{n=3-5} C_n dS_n, \quad \beta = \sum_{n=3-5} D_n dS_n, \quad \gamma = \sum_{n=3-5} K_n dS_n \quad (w_{\text{ef}} < 1 \text{ g cm}^{-2}) \quad (10a)$$

$$\kappa = 0, \quad \alpha = \sum_{n=3-7} C_n dS_n, \quad \beta = \sum_{n=3-7} D_n dS_n, \quad \gamma = \sum_{n=3-7} K_n dS_n \quad (w_{\text{ef}} > 1 \text{ g cm}^{-2}) \quad (10b)$$

En las ecs. (9-10) fueron ignoradas las bandas 1 y 2 por presentar alta absorción (100% de eliminación) del flujo direccional en una faja espectral con muy baja irradiancia. Por lo tanto, el límite superior efectivo de la “constante solar” es 3,0  $\mu\text{m}$ . Para  $w_{\text{ef}} \geq 1$  el comportamiento de las bandas 3-7 es intenso en todos los casos, y para  $w_{\text{ef}} < 1$  las bandas 6 y 7 tienen perfil débil. En locales a 3500-4000 m de altitud,  $w$  es del orden de 0,5 g  $\text{cm}^{-2}$  o menos. La ecuación 9 incluye un término  $Fowle = 2,5 w_{\text{ef}}$  asociado a la absorción en las bandas estrechas de 0,72 y 0,82  $\mu\text{m}$  localizadas en el intervalo NIR (ver Figura 1).

### Parametrizaciones del modelo

A partir de las ecuaciones (2) y (9), la irradiancia global  $G$  para cielo claro resulta

$$G(w, P_{\text{med}}, z, \mu_0) = \mu_0 S_{0\text{UVNIR}} \cdot Kt(\mu_0, P(z)) + \mu_0 [S_{0\text{IRS}} - \Delta S_0(w_{\text{ef}}, P_{\text{med}})]. \quad (11)$$

Las variables atmosféricas fundamentales para el cálculo de  $G$  son la presión  $P$  (o altitud  $z$ ), el agua precipitable  $w$  y la presión atmosférica  $P_{\text{med}}$  ponderada con el perfil de vapor. La posición del Sol influencia a través del ángulo cenital  $Z_0$ . La partición adecuada del espectro solar es  $S_{0\text{UVNIR}} = 758 \text{ W m}^{-2}$  con UVNIR:(0,3-0,8  $\mu\text{m}$ ) y  $S_{0\text{IRS}} = 568 \text{ W m}^{-2}$  con IRS:(0,8-3  $\mu\text{m}$ ), según espectro solar de Gueymard (2004), a la distancia media Sol-Tierra. Los valores  $S_{0\text{NIR}}$ ,  $S_{0\text{IRS}}$ ,  $\Delta S_0$  en la ecuación 11 están corregidos por distancia Tierra-Sol. La Tabla 1 especifica los valores numéricos de coeficientes del modelo.

Tabla 1. Parametrizaciones de las variables del modelo GL0.2, correspondientes a las atmósferas de referencia TROP e MLW de MacClatchey et al. (1972).

|                                        |                                                                 |              |                                                               |      |
|----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|--------------|---------------------------------------------------------------|------|
| <b>Intervalo UVNIR</b>                 |                                                                 |              |                                                               |      |
| Reflexión Rpo                          | Ar                                                              | Br           | Cr                                                            |      |
| p= P/1000                              | 0,353 + 0,099 p                                                 | 5,369 p-0,86 | 1,309 p <sup>3</sup> – 3,530 p <sup>2</sup> + 3,216 p – 0,015 |      |
| Absorción Aso                          | Aa                                                              | Ba           | Ca                                                            |      |
|                                        | 0,342 ± 0,003                                                   | 21,7 ± 0,4   | -3,28 ± 0,20                                                  |      |
| Reflexión R*                           | A*                                                              | B*           | C*                                                            |      |
|                                        | 0,102 – 0,008 z(km)                                             | -0,334±0,020 | 0,171±0,015                                                   |      |
| <b>Intervalo IRS</b>                   |                                                                 |              |                                                               |      |
| w <sub>ef</sub> < 1 g cm <sup>-2</sup> | κ                                                               | α            | β                                                             | γ    |
|                                        | 5,32                                                            | 30,6         | 50,5                                                          | 25,3 |
| w <sub>ef</sub> ≥ 1 g cm <sup>-2</sup> | 0                                                               | -2,48        | 91,6                                                          | 46,9 |
| <b>Relaciones</b>                      |                                                                 |              |                                                               |      |
| presión - altitud<br>(z< 8 km)         | z(km)= 15,57 – 23,06 p + 7,63 p <sup>2</sup> (TROP)             |              |                                                               |      |
|                                        | z(km)= 14,76 – 22,33 p + 7,74 p <sup>2</sup> (MLW)              |              |                                                               |      |
|                                        | p(z=0)/p(z) = 1,0112 + 0,0885 z + 0,0149 z <sup>2</sup> (TROP), |              |                                                               |      |
|                                        | p(z=0)/p(z) = 1,0158 + 0,0927 z + 0,0182 z <sup>2</sup> (MLW)   |              |                                                               |      |

## COMPARACIÓN CON “VERDAD TERRESTRE”: DATOS Y MÉTODOS

Fueron considerados ciclos diarios de radiación solar durante un año en cuatro estaciones situadas en el centro y noroeste de Argentina, y para cuatro situadas en el norte chileno. La Tabla 2 y Figura 3 permiten apreciar su distribución geográfica y variedad de altitudes (entre 330 y 4122 m s.n.m.). Para cada estación se definió un conjunto de días con probable ciclo diario de cielo claro o con poca nubosidad. El criterio fue escoger los diez días con mayor índice de claridad  $Kt$  dentro de un año de observaciones (valores típicos fueron  $Kt > 0,70$ ). La Tabla informa también sobre el tipo de instrumento y la frecuencia de observación.

Tabla 2. Locales para comparación GL0.2 vs. “verdad terrestre”: estaciones Red Saver-Net SMN (Servicio Meteorológico Nacional, Argentina), EEAOC (Estación Experimental Agroindustrial “Obispo Colombres”), INENCO (Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional/Universidad Nacional de Salta), INIA (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, Chile). Instrumento disponible: (\*) piranómetro de precisión tipo Kipp & Zonen; (\*\*) piranómetro sensor fotoeléctrico

| ID    | nombre            | latitud | longitud | Altitud<br>m | año  | Interv,<br>minutos | red       |
|-------|-------------------|---------|----------|--------------|------|--------------------|-----------|
| 33741 | Pilar             | -31,68  | -63,87   | 330          | 2018 | 1                  | SaverNet* |
| 29035 | El Colmenar       | -26,79  | -65,21   | 456          | 2018 | 15                 | EEAOC*    |
| 29055 | Colalao del Valle | -26,36  | -65,95   | 1710         | 2018 | 15                 | EEAOC**   |
| 29027 | El Rosal          | -24,400 | -65,700  | 3340         | 2015 | 1                  | INENCO*   |
| 29280 | Altos La Portada  | -23,504 | -70,405  | 105          | 2021 | 60                 | INIA**    |
| 29279 | Camar             | -23,407 | -67,964  | 2694         | 2021 | 60                 | INIA**    |
| 29295 | Ticnamar          | -18,580 | -69,496  | 3220         | 2021 | 60                 | INIA**    |
| 29296 | Visviri           | -17,595 | -69,477  | 4122         | 2021 | 60                 | INIA**    |

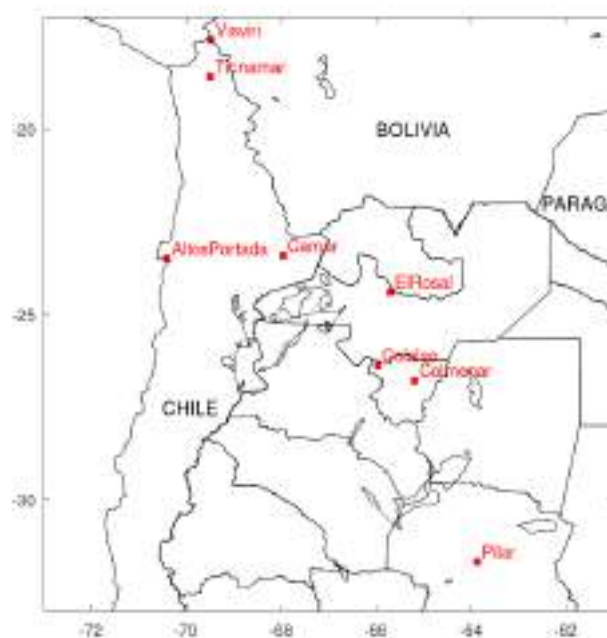


Figura 3. Distribución de locales para comparación modelo GL0.2 versus “verdad terrestre”



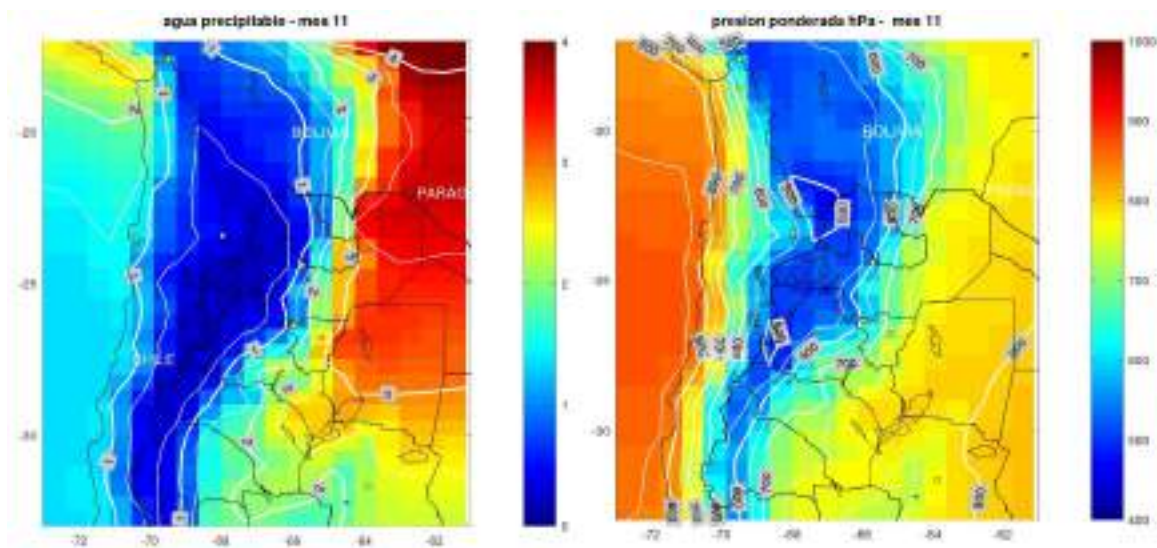


Figura 4. Distribución de agua precipitable  $w$  y de presión ponderada  $P_{med}$  en noviembre (promedio quinquenio 2000-2004).

#### Datos de presión atmosférica y agua precipitable,

Valores de presión atmosférica (hPa) y humedad específica (kg/kg) para superficie y perfiles atmosféricos fueron obtenidos en el *Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Application, Version 2* (MERRA2) para el período de 01-01-2020 a 31-12-2024. El MERRA2 es el reanálisis del *Global Modeling and Assimilation Office (NASA-GMAO)* que utiliza *Three-Dimensional Variation Data Assimilation (3DVAR)* para asimilar datos de atmósfera y océanos en una grilla global con resolución  $0,5^\circ \times 0,625^\circ$ , perfil con 42 niveles entre superficie y 0,01 hPa y ciclo de actualización de 6 horas (Gelaro et al., 2017). Fueron extraídos los valores diarios de la grilla global para el quinquenio 2020-2024, y calculados los valores medios mensuales de agua precipitable  $w$  y presión atmosférica ponderada  $P_{med}$  (Ecs. 3 y 4). Los valores obtenidos se asumieron como representativos del clima y aplicables a los años con datos piranométricos (ver Tabla 2). Para un día y local determinado, los valores de  $w$  y  $P_{med}$  fueron deducidos de la grilla global media 2020-2024 por interpolación de los respectivos campos mensuales. Como ejemplo ilustrativo, la Figura 4 describe la distribución geográfica de agua precipitable  $w$  (unidades  $\text{g cm}^{-2}$ ;  $1 \text{ g cm}^{-2} = 10 \text{ kg m}^{-2}$ ) y presión atmosférica ponderada  $P_{med}$  (unidades hPa) para noviembre (regionalmente, transición entre estación seca y húmeda).

## RESULTADOS

Las Figuras 5-7 describen algunos ciclos diarios resultantes del modelo GL0.2 (componentes UVNIR e IRS, y valor total) y la irradiancia en el tope de la atmósfera. Incluyen también el ciclo observado con medidas piranométricas. Para todas las estaciones, fueron escogidos los diez días con mayor índice de claridad  $K_t$  medidos por piranómetro.

La Figura 5 ilustra un resultado para dos locales en Argentina. La estación El Colmenar (llanura en Tucumán) tiene altitud  $z = 456 \text{ m}$ ,  $w = 2,7 \text{ g cm}^{-2}$  y  $P_{med} = 730 \text{ hPa}$ ; El Rosal (alta montaña en Salta) se sitúa a  $z = 3340 \text{ m}$ ,  $w = 0,5 \text{ g cm}^{-2}$ ,  $P_{med} = 600 \text{ hPa}$ . La irradiancia GL0.2 muestra buena concordancia con el ciclo observado de medidas  $G$ . Es importante observar que: 1) la reflectancia del suelo en la región es del orden de 0,10-0,15 en el visible y el efecto en la contrarreflexión atmosférica es despreciable; 2) eventual variación de  $0,5 \text{ g cm}^{-2}$  entre el valor  $w$  de ese día y el promedio quinquenal tiene impacto pequeño en GL0.2 (ilustrado por las líneas rojas en el gráfico); 3) el modelo GL 0.2 no incluye el efecto de aerosol. En este trabajo no son discutidas cuestiones relativas a la calidad en sí misma de las mediciones, como la calibración del instrumento (para El Rosal los valores medidos son superiores a GL0.2, pero puede deberse a agua precipitable menor que el valor “climático”); tampoco a la asimetría entre medidas matinales y vespertinas, como las causadas por el ciclo diario de turbidez atmosférica (observar en Colmenar, cerca del mediodía), ni a efectos de sombreado por obstáculos (véase El Rosal, al amanecer).



Se observó que la diferencia  $GL02 - G$  puede exceder los 30-50  $W m^{-2}$  en parte del ciclo pero que las irradiancias medias diarias en los dos casos divergen en  $\sim 10 W m^{-2}$  ( $0,86 MJ m^{-2}$  diarios =  $0,24 kWh m^{-2}$ ) o sea  $\sim 3\%$  de la irradiación diaria medida.

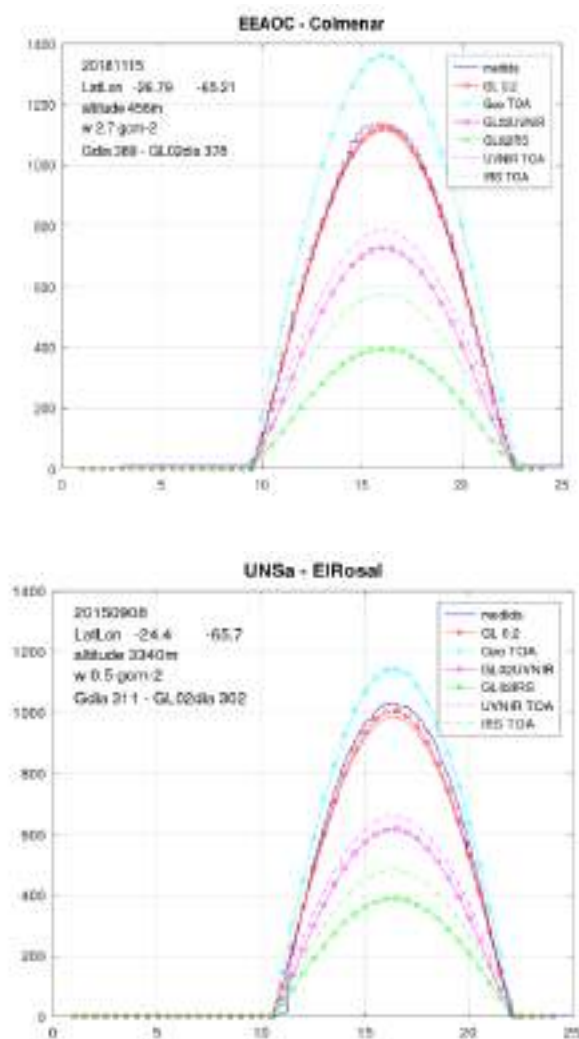


Figura 5. Ciclo diario en dos estaciones del Noroeste Argentino: El Colmenar, Tucumán (superior) y El Rosal (inferior). Irradiancias en el tope de la atmósfera:  $G_{TOA}$  (turquesa), UVNIR e IRS (líneas de trazos). Modelo GL 0.2: IRS (verde), UVNIR (magenta) y  $G$  total (rojo). Línea en azul: registro de piranómetro.

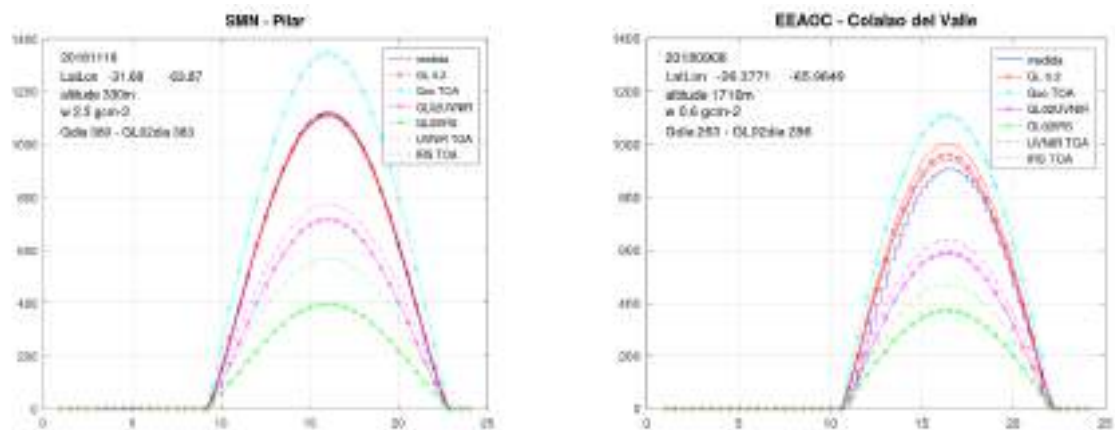


Figura 6. Ciclos diarios en dos locales de Argentina: uno a baja altitud, centro del país (Córdoba), y otro en valle de montaña, Tucumán.

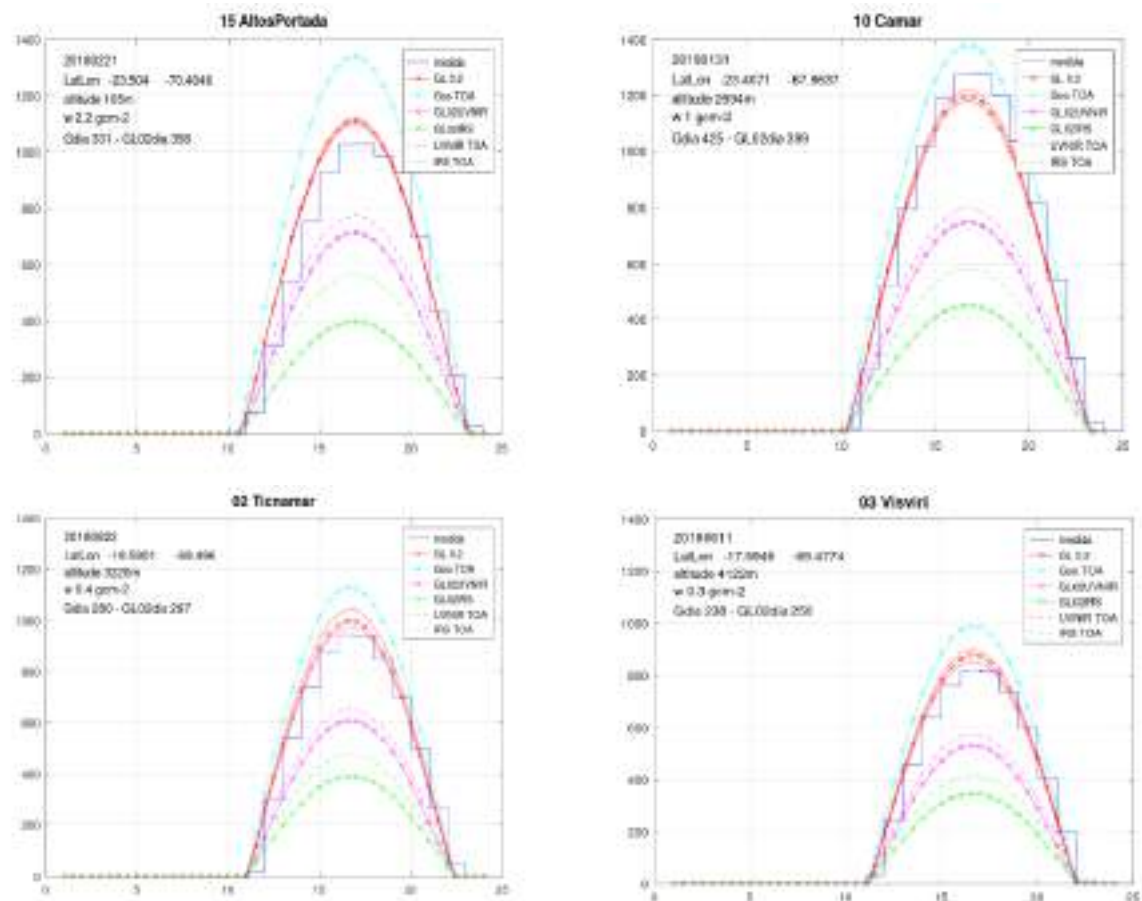


Figura 7. Locales en el norte de Chile. Resultados para secuencia de altitudes crecientes

Para los sitios ilustrados en la Figura 6, se observa una excelente coherencia en Pilar. La estación de Colalao del Valle es también coherente; el desvío mayor podría atribuirse a que el instrumento es un sensor Davis de tipo fotoeléctrico, sensible en el intervalo  $\lambda$ : (0,3-1,1  $\mu\text{m}$ ). Es importante notar que este instrumento (eventualmente calibrado a baja altitud) no es sensible en las bandas de absorción 1 a 5 del

espectro solar (ver Figuras 1 y 2) y no registrará parte del efecto de la disminución de agua precipitable en altitudes elevadas, especialmente en condiciones de cielo claro.

En el caso de Chile (Figura 7) los valores horarios de las medidas no permiten un análisis más detallado. Tratándose de una red agrometeorológica, la documentación consultada (Chacón y Contreras, 2025) indica el uso de solarímetro de tipo fotoeléctrico. Varias estaciones del INIA fueron descartadas por presentar evidente subestimación de la irradiancia. De todos modos, los resultados para las cuatro estaciones escogidas muestran elevada coherencia entre el modelo GL 0.2 y la “verdad terrestre” para altitudes entre 100 metros (litoral) y 4000 metros (en la Cordillera).

La Tabla 3 y Figura 8 presentan una síntesis del conjunto de comparaciones. La integración diaria muestra un buen ajuste en Pilar, El Rosal, Colmenar y Camar con la irradiancia media prevista; el “error”  $\delta G = GL - G$  tiene desviación media MBE y desviación estándar SD (dispersión)  $MBE \pm SD = -1 \pm 11 \text{ W m}^{-2}$ ; para las estaciones restantes la Figura sugiere desviación sistemática mayor, confirmada en la Tabla con  $MBE \pm SD = +22 \pm 8 \text{ W m}^{-2}$ . Observación: Colalao del Valle (un piranómetro Davis) se alinea con instrumentos de Chile.

*Tabla 3. Estadísticos medios para la desviación  $\delta G = (GL0.2 - G)$  de irradiancia media diaria: MBE (desviación media); SD (desviación estándar) y RMSE (desviación cuadrática media). La última línea agrupa los resultados de agrupar las estaciones indicadas.*

|              | Pilar       | El Rosal | Colmen. | Camar | AltosPort   | Ticnamar | Visviri | Colalao |
|--------------|-------------|----------|---------|-------|-------------|----------|---------|---------|
| altitud      | 330         | 3340     | 456     | 2694  | 105         | 3220     | 4122    | 1710    |
| MBE          | 9           | -12      | -8      | 6     | 32          | 20       | 14      | 23      |
| SD           | 9           | 5,5      | 6,4     | 3,5   | 11          | 2,5      | 3       | 3,5     |
| RMSE         | 13          | 13       | 11      | 7     | 34          | 20       | 15      | 24      |
| MBE $\pm$ SD | -1 $\pm$ 11 |          |         |       | +22 $\pm$ 8 |          |         |         |

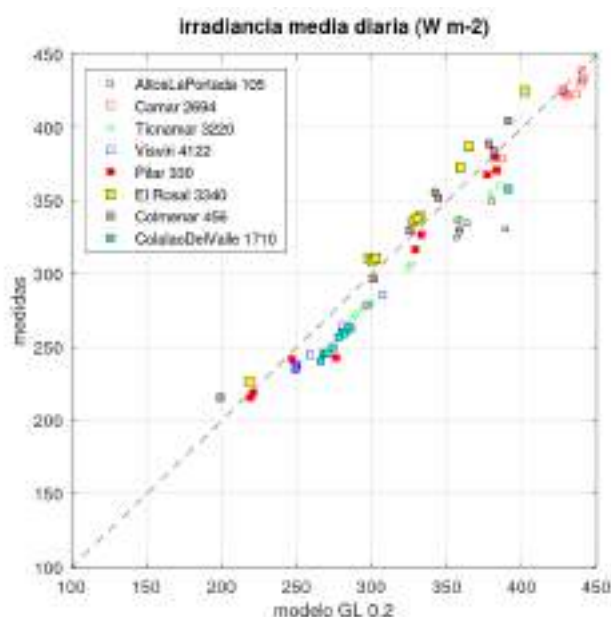


*Figura 8. Irradiancia media diaria del modelo GL 0.2 vs. Mediciones. El nombre de estaciones incluye su altitud.*

## CONCLUSIONES

El modelo GL0.2 es un modelo físico y no empírico, independiente de ajuste a mediciones locales de radiación. Describe el ciclo diario de irradiancia de cielo claro a partir de leyes físicas, con base en los parámetros atmosféricos locales presión  $P$  (o altitud  $z$ ), agua precipitable  $w$  y presión  $P_{med}$  ponderada con el perfil vertical de vapor. Esas tres variables dependen de la altitud y están disponibles en escala global en archivos como el MERRA2, con definición espacial de unos 60 km. La comparación con 8

estaciones en altitudes diversas sugiere que sus hipótesis simplificadas (suponer columna típica “climatológica” de ozono, agua precipitable y presión ponderada mensuales, y no incluir aerosol) inducen fluctuación de  $3\text{--}9\text{ W m}^{-2}$ , dependiendo de condiciones meteorológicas locales; el desvío medio (“bias”) menor es  $\text{MBE} = -1\text{ W m}^{-2}$  para medidas con piranómetros de precisión, mientras para instrumentos del tipo Davis o LiCor (Colalao del Valle y locales de Chile) es del orden de  $+22\text{ W m}^{-2}$  (7% de  $300\text{ W m}^{-2}$ ). Por lo tanto, el GL0.2 podría estimar ciclo diario de irradiancia de cielo claro tanto en las llanuras como en regiones montañosas como los Andes. Futuras campañas de medición y la intercomparación con modelos diseñados regionalmente permitirán perfeccionar el modelado físico y sus parametrizaciones. Mientras tanto, en su versión actual el GL0.2 tiene simplicidad suficiente y precisión razonable para ser utilizado, con eventuales ajustes locales de poca monta.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la cesión de datos de radiación solar de diversas instituciones/investigadores. Los de SMN-Pilar (año 2018) de la red Saver-Net (Orte et al., 2022) fueron suministrados por el MSc. Fernando Nollas, Servicio Meteorológico Nacional; los de irradiancia de El Rosal (2015) provienen del Dr. Germán Salazar, Universidad Nacional de Salta. Datos de EEAOC fueron cedidos por la Sección Agrometeorología (URL <https://agromet.eeaoc.gob.ar/>). Datos de Chile son de acceso público en el Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (URL <https://agrometeorologia.cl/>). Campos medios mensuales de agua precipitable y presión atmosférica ponderada quinquenio 2020-2024 estarán disponibles en página [G-STAR Datos](#), junto con programa en lenguaje Octave para interesados en extracción de dato local.

## REFERENCIAS

- Adler, N.O., Molina, M.L., Aiquel, F. (2010). Estimación de la irradiancia solar global para varias localidades de los Valles Calchaquíes, Noroeste de Argentina. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 14, 8.23-30.
- Antonanzas-Torres, F., Urraca, R., Polo, J., Perpiñán-Lamigueiro, O., Escobar, R. (2019). Clear sky solar irradiance models: A review of seventy models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 107, 374-387. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.02.032>
- Barbaro, S., Cannistraro, G., Giaconia, C., Orioli, A. (1988). The ASHRAE clear sky model. An evaluation in the Mediterranean zone. *Solar & Wind Technology* 5, 111-116. [http://dx.doi.org/10.1016/0741-983X\(88\)90097-5](http://dx.doi.org/10.1016/0741-983X(88)90097-5)
- Ceballos, J.C. (2000). Estimativa de radiação solar à superfície com céu claro: um modelo simplificado. *Revista Brasileira de Meteorologia* 15, 113-122. Disponible en [BibINPE](#) (control-click)
- Ceballos, J.C. (2021). STOCH2F: Stochastic two-flux code for diagnosis and assessment of solar radiation fluxes in the atmosphere. Part 1: 0.20-0.80 micron interval in clear-sky atmosphere. Relatorio de Pesquisa GSTAR RT-001-2021. <https://satelite.cptec.inpe.br/gstar/PUB/RPGSTAR/STOCH2Fpart1-2021.pdf>
- Ceballos, J.C. (2024). Model GL0.2: an improved clear-sky solar irradiance algorithm for lower and upper altitude sites. Part I: UV-VIS-NIR (UVNIR) model. Relatorio de Pesquisa GSTAR RT-002-2024. <https://satelite.cptec.inpe.br/gstar/PUB/RTGSTAR/RTGSTAR0022024.pdf>.
- Chacón C., G., Contreras, L. (2025). Descripción y usos de la red de agrometeorología INIA [www.agrometeorologia.cl](http://www.agrometeorologia.cl). Boletín INIA N° 516, 2025-07. <https://biblioteca.inia.cl/entities/publication/28f628f9-afaa-43e2-8247-0b5fb6fa29c>
- Checura Díaz, M.S., Salazar, G.A., Laspiur, R., Correa, T.G., Gutiérrez, J. (2012). Análisis de la radiación solar en el norte de Chile. Comparación entre datos medidos y estimados por modelos de cielo claro ARG-P y base de datos Swera. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 16, 11.101-106.
- Gelaro, R., McCarty, W., Suárez, M.J., Todling, R., Molod, A. et al. (2017). The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2) *J. of Climate*, v. 30, 5419-5454, 2017. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0758.1>
- Gueymard, C. (1989). A two-band model for the calculation of clear sky solar irradiance, illuminance, and photosynthetically active radiation at the Earth’s surface. *Solar Energy* 43, 253-265.

- Gueymard, C.A. (2004). The sun's total and spectral irradiance for solar energy applications and solar radiation models, *Solar Energy* 76(4):423-453. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2003.08.039>
- Iqbal, M. (1983). An introduction to solar radiation. Academic Press.
- Lacis, A.A., Hansen, J.E. (1974). A parameterization for the absorption of solar radiation in the earth's atmosphere. *J. Atmos. Sci.* 31, 118-133. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1974\)031<0118:APFTAO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1974)031<0118:APFTAO>2.0.CO;2)
- Liou, K.N. (2002). An Introduction to Atmospheric Radiation, cap. 6. Academic Press, 2<sup>nd</sup> Edition.
- McClatchey, R.A., R.W. Fenn, J.E.A. Selby, F.E. Volz, J.S. Garing (1972). Optical properties of the atmosphere. Third Ed, Air Force Cambridge Research Laboratories, Environ. Res. Papers No 411.
- Orte, F., Wolfram, E., Luccini, E., D'Elia, R., Lusi, A. et al. (2022). Red de monitoreo de la irradiancia solar UV-Total en Argentina "Saver-Net". *Meteorológica* 47(2), 1-13. <https://doi.org/10.24215/1850468Xe016>
- Roach, W.T. (1961). The absorption of solar radiation by water vapour and carbon dioxide in a cloudless atmosphere. *Quarterly J. of the Royal Met. Soc.* 87, 364-373. <https://doi.org/10.1002/qj.49708737308>
- Salazar, G.A., Hernández, A.L., Saravia, L.R. (2010). Practical models to estimate horizontal irradiance in clear sky conditions: Preliminary results. *Renewable Energy* 35, 2452-2460. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.01.033>
- Stephens, G.L. (1984). The parameterization of radiation for numerical weather prediction and climate models. *Monthly Weather Review* 112, 826-867. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1984\)112<0826:TPORFN>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1984)112<0826:TPORFN>2.0.CO;2)
- Zdunkowski, W., Trautmann, Th., Bott, A. (2007). Radiation in the Atmosphere, cap. 6. Cambridge University Press.

## **PHYSICAL ESTIMATOR OF CLEAR SKY SOLAR IRRADIANCE ADAPTED FOR VARIABLE HEIGHTS IN SOUTH AMERICA**

**ABSTRACT** We describe the structure of a physical model for estimation of clear-sky solar irradiance, integrating influence of ozone and water vapor column and altitude of a given site. Fundamental variables are atmospheric pressure, precipitable water and a mean pressure weighted with vapor vertical profile. These variables can be extracted from reanalysis of meteorological fields accessible in internet. Preliminary comparisons with daily cycles of irradiance are promising, using data of sites at various altitudes in Northwestern Argentina and Northern Chile. Results suggest deviations  $GL0.2 - G$  of  $10-50 \text{ W m}^{-2}$  during daily cycle and  $-1 \pm 11 \text{ W m}^{-2}$  for daily mean irradiance (bias plus/minus standard deviation) in the case of precision pyranometers, while for usual solarimeters is  $+22 \pm 8 \text{ W m}^{-2}$ .

**Keywords:** solar irradiance, clear sky model, Northwestern Argentina, Northern Chile

## COMPARACIÓN DE LA ENERGÍA SOLAR COLECTADA ENTRE PLANOS FIJOS Y SEGUIMIENTO EN DOS EJES EN LUJÁN (PAMPA HÚMEDA ARGENTINA)

**Raúl Righini, Pablo E. Ruiz, Sebastián Bazán, Valeria Stern**

Grupo de Estudios de la Radiación Solar (GERSolar), Instituto de Ecología y Desarrollo Sustentable (INEDES) - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) - Universidad Nacional de Luján (UNLu)  
Tel. 02323-440241– e-mail: [raulrighini@yahoo.com.ar](mailto:raulrighini@yahoo.com.ar)

**RESUMEN:** Se realizaron mediciones de radiación solar incidente en Luján en un plano orientado de tres maneras diferentes: horizontal, inclinado al norte el ángulo óptimo anual respecto a la horizontal, y siguiendo la posición del Sol mediante trackeo en dos ejes. El objetivo es determinar, con una serie de mediciones prolongadas en el tiempo, la mejora en la colección de energía de un plano (respecto al plano horizontal) que implican las otras dos orientaciones. Se construyó un dispositivo de seguimiento solar en dos ejes (acimutal y cenital) controlado por un Arduino Mega que calcula la posición del Sol obteniendo de un GPS los parámetros requeridos. Se usaron motores paso a paso para orientar un radiómetro que mide la irradiancia en las tres posiciones descritas. Se evaluaron las diferencias porcentuales entre la energía colectada en el plano horizontal y las otras dos posiciones, encontrándose ganancias en el trackeo en dos ejes que, en días despejados pueden alcanzar un 102% y una ganancia promedio mensual que se encuentra entre el 40,8% y el 68,8%, con clara dependencia estacional. El trackeo en un eje determina ganancias medias que se encuentran entre el 13,9 % y el 40,5 %.

**Palabras clave:** irradiación solar, plano de adquisición, ángulo óptimo, trackeo en dos ejes.

### INTRODUCCIÓN

Las estrategias de maximización de la energía colectada por un plano han sido muy analizadas en diversos ámbitos, tanto del país como del extranjero. El universo de aplicación de estas estrategias alcanza a aquellos sistemas tecnológicos que utilizan la radiación solar como fuente primaria de energía, tales como los sistemas de calentamiento de agua o de concentración de energía y, particularmente, a los sistemas fotovoltaicos de generación eléctrica.

En Argentina, entre otros casos, puede citarse a Grossi Gallegos y Righini (2013); Righini y Grossi Gallegos (1999), quienes evaluaron los ángulos anuales óptimos de inclinación de planos orientados al norte, considerando la variabilidad en los valores medios mensuales de radiación en cada una de las regiones de Argentina. Otros autores, como Alexandru y Pozna (2010), han estudiado sistemas de trackeo en dos ejes, asociando el análisis a la generación fotovoltaica y evaluando, mediante simulaciones, la ganancia energética.

Las experiencias de medición de radiación global incidente en un plano que trackea en un eje y en dos ejes resultan aún más limitadas, tanto por la cantidad de trabajos realizados como por la extensión del tiempo en el que se efectuaron las medidas correspondientes. En general, se realizaron teniendo como motivación la construcción de equipamientos diversos que puedan seguir al Sol en uno o dos ejes, generalmente en dos, pero la discusión de la ganancia energética que implica el trackeo ha sido poco desarrollada (Alexandru, C. y Pozna, C. (2010)). y sus valores resultan fuertemente dependientes de la ubicación del sitio en cuestión y de sus características climáticas.



El presente trabajo pretende aportar información en ese sentido, efectuando mediciones de la radiación solar global incidente en un plano. Mediante un seguidor solar de dos ejes, (cuyas características se describirán en el apartado siguiente), se realizaron comparaciones entre la energía colectada en un plano inclinado el ángulo óptimo anual para la colección de energía, un plano que siga la posición del Sol, y la energía solar que llega a un plano horizontal. Las mediciones se llevaron adelante durante varios meses del año 2025, con el objetivo de extenderlas, al menos, durante todo 2026.

La información recolectada posibilitará evaluar adecuadamente la ventaja del seguimiento en dos ejes en zonas con condiciones climáticas y latitudes similares a las de Luján (provincia de Buenos Aires, Argentina).

Por otro lado, la aplicación de la estrategia de medición seguida en el presente artículo, hará posible estudiar diferentes estrategias de trackeo en dos ejes, con vistas a maximizar la ganancia energética total de los sistemas cuando se considere el propio consumo de los mecanismos de seguimiento y la energía que producen.

## METODOLOGÍA

Se confeccionó un sistema de seguimiento en dos ejes (uno acimutal y otro cenital), basado en el uso de dos motores paso a paso destinados al movimiento de cada uno de los ejes. Un Arduino Mega calcula la posición solar en coordenadas locales y se comunica con los drivers de los motores paso a paso (que a su vez controlan los motores). Un GPS brinda la latitud, longitud y hora local del sitio de instalación. El algoritmo de cálculo de la posición solar posibilita determinar el ángulo acimutal y cenital solar de manera minutal. Como instrumento de medición se usó un radiómetro fotorvoltaico fabricado por CNEA (Bolzi et al, (2002); Bolzi et al, (2008)). El adquirente de datos empleado para guardar la información obtenida fue un datalogger Campbell CR1000X, donde se almacenan los promedios minutales de los datos entregados por el radiómetro. El esquema del dispositivo elaborado se presenta en la Figura 1, mientras que una fotografía del trackeador ya instalado se muestra en la Figura 2.

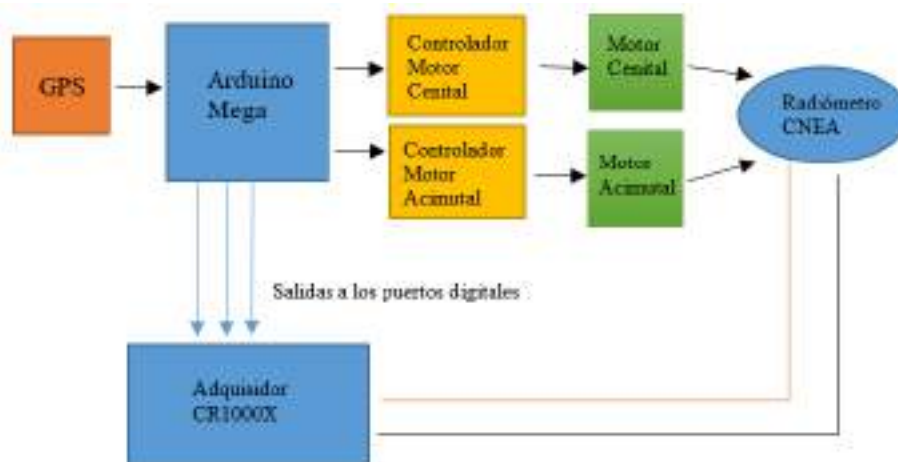


Figura 1: Esquema de funcionamiento del trackeador y el almacenamiento de datos.





*Figura 2: fotografía del trackeador, ya instalado.*

Una vez realizados los cálculos posicionales, se realizaron tres mediciones: primero, durante 13 segundos, se realizó una medición en el plano horizontal. Luego se movió el motor cenital hasta que el plano que soporta al radiómetro quedara orientado al norte e inclinado el ángulo óptimo anual respecto a la horizontal. Dicho ángulo es de  $28^\circ$  para Luján (Grossi Gallegos, H. y Righini, R., 2013). En esa posición se midió durante otros 13 segundos. Finalmente, el plano que contiene al radiómetro se orientó hacia la posición que ocupa el Sol, moviendo los motores paso a paso cenital y acimutal, y se efectuó una medición durante otros 13 segundos. Se esperó hasta que comience un nuevo minuto, y se reinició todo el ciclo de movimientos y mediciones. Cada una de las mediciones realizadas fue una medición puntual de un segundo de los valores de voltaje que entrega el radiómetro fotovoltaico. Las mediciones fueron realizadas y almacenadas en un adquisidor CR1000X, de la firma Campbell. En el adquisidor se almacenaron los promedios de cada una de las 13 mediciones realizadas en cada posición.

Las mediciones se realizan durante 13 segundos debido a varias limitaciones que impone el diseño experimental:

- Las medidas efectuadas en las tres posiciones diferentes debían estar lo más cerca posible en el tiempo, para poder compararlas entre sí.
- Los promedios de las tres medidas se asignaron a un mismo minuto.
- Cuando el plano en el que se situó el radiómetro alcanzó su posición, se esperó un segundo para que se estabilizara su voltaje antes de medir.
- El tiempo de viaje del trackeador que lo llevó de una posición a otra fue variable, alcanzando un máximo al amanecer y al atardecer.
- Todos esos tiempos debieron sumarse a los 39 segundos totales en los que se efectuaron las mediciones.

Estas limitaciones determinaron la elección de los 13 segundos para medir en cada una de las posiciones. Procediendo así, en el peor de los casos, quedaron unos cinco segundos antes de que comenzara un nuevo minuto dentro del cual debía realizarse el nuevo ciclo de medición.

El proceso adoptado para medir implica que el error asociado a las mediciones estuviese correlacionado con los errores de los parámetros angulares de posicionamiento del plano sobre el que se apoya el radiómetro, además del error asociado al registro del voltaje del mismo.

Es de notar que solamente se almacenaron los promedios de los valores de voltaje que provinieron del radiómetro fotovoltaico. En efecto, dado que la pretensión del trabajo es realizar una comparación relativa entre la energía que llega al plano horizontal y los planos que son orientados de formas diferentes, la constante propia de calibración del equipo pudo obviarse y, de esa manera, compararse los promedios de los voltajes en cada una de las posiciones. Al proceder así, cualquier cambio en la

constante de calibración del equipo a lo largo del experimento no tuvo relevancia alguna, dado que la frecuencia minutal de las comparaciones permitió asegurar que el radiómetro no puede haber variado su comportamiento dentro de minuto en el que las mediciones son realizadas.

Para codificar cada posición, se usaron dos salidas del Arduino Mega que se conectaron a dos puertos digitales del adquirente CR1000X.

Las mediciones se efectuaron únicamente cuando la altura solar supera los 7°, con el objetivo de evitar datos espurios debido a que el horizonte no está completamente despejado.

Los errores angulares fueron estimados en 1°, dada la incerteza mecánica que implica la orientación del plano de apoyo del radiómetro fotovoltaico y el movimiento de los motores paso a paso. Ello se determinó colocando un medidor angular en el trackeador y evaluando su posición horizontal y su orientación al norte en distintos momentos del día. La diferencia entre esos valores fue de ese orden. El error en la medición de los voltajes por parte de la CR1000X es menor que el 0,1%.

Las mediciones realizadas se extendieron entre el 7 de marzo y el 14 de julio de 2025. En total se analizaron 46982 datos cada un minuto, registrados en las tres posiciones mencionadas.

Las ganancias en cada minuto, respecto a las mediciones efectuadas en el plano horizontal, se definen como:

$$Ganancia\ minutal\ \%_i = \frac{voltaje_i - voltaje_{horizontal}}{voltaje_{horizontal}} * 100 \quad (1)$$

Donde los voltajes son promediados durante los 13 segundos medidos en cada posición y el sub índice *i* varía entre dos referencias: ángulo óptimo anual y trackeo en dos ejes.

Para las ganancias diarias se usó:

$$Ganancia\ diaria\ \%_i = \frac{\sum voltaje_i - \sum voltaje_{horizontal}}{\sum voltaje_{horizontal}} * 100 \quad (2)$$

donde *i* toma los valores anteriormente mencionados y las sumatorias son efectuadas a lo largo del día para posiciones del Sol que superen los 7° de altura solar.

## RESULTADOS

Los valores máximos de diferencia entre la energía diaria acumulada en el plano horizontal y las acumuladas en un plano inclinado el ángulo óptimo anual y otro que trackea en dos ejes correspondieron a días de cielos absolutamente despejados, como era de esperar. A título de ejemplo, se muestra en la Figura 3 el correspondiente al día 11 de mayo:

Definiendo las ganancias porcentuales para cada una de las posiciones (ángulo óptimo anual y trackeo en dos ejes) como:

$$Ganancia\ trackeo\ dos\ ejes\ (\%) = 100 * \frac{mv\ trackeo - mv\ horizontal}{mv\ horizontal} \quad (3)$$

$$Ganancia\ óptimo\ anual\ (\%) = 100 * \frac{mv\ óptimo\ anual - mv\ horizontal}{mv\ horizontal} \quad (4)$$

Para este día la ganancia porcentual diaria de la energía colectada por el plano inclinado orientado al norte cuya inclinación respecto al horizontal es la del ángulo óptimo anual (28°), fue de 51,2%. La ganancia del plano que trackea en dos ejes fue del 102% respecto a la energía del plano horizontal.

Si graficamos las ganancias minuto a minuto, para el 11 de mayo (kt diario de 0,72), obtenemos el gráfico que se muestra en la figura 3.

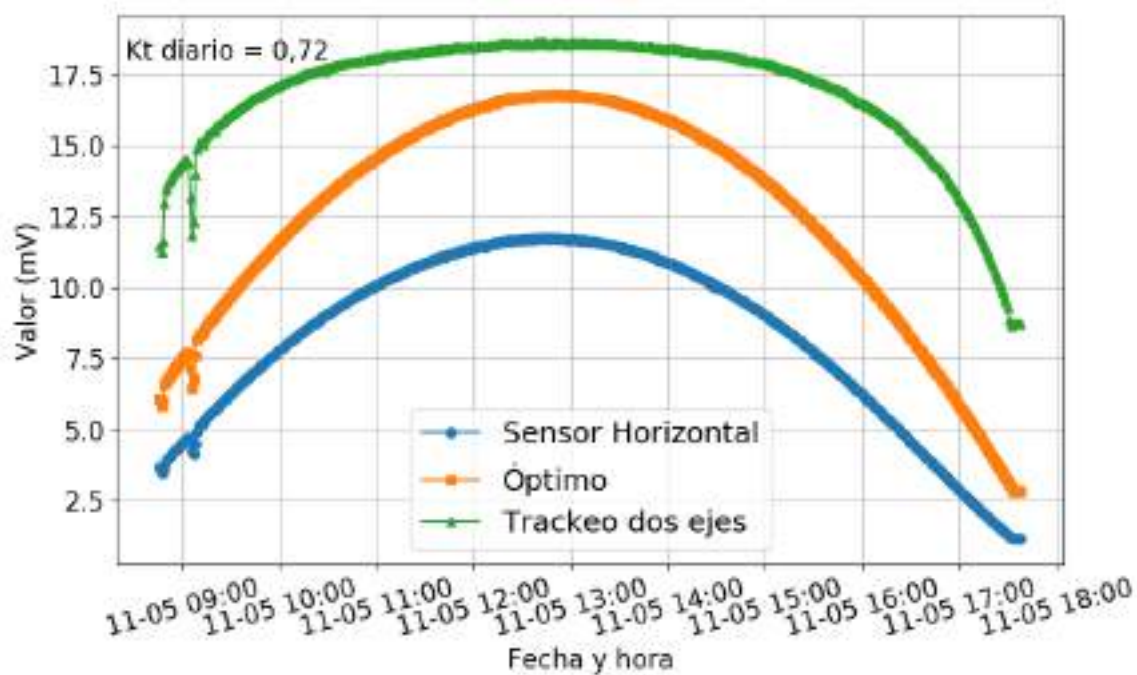


Figura 3. Valores de voltaje medidos en las tres posiciones diferentes durante el día 11 de mayo.

La figura 4 muestra las ganancias porcentuales calculadas para cada minuto para el plano que soportaba al radiómetro ubicado en las posiciones correspondientes al óptimo anual y al trackeo en dos ejes.

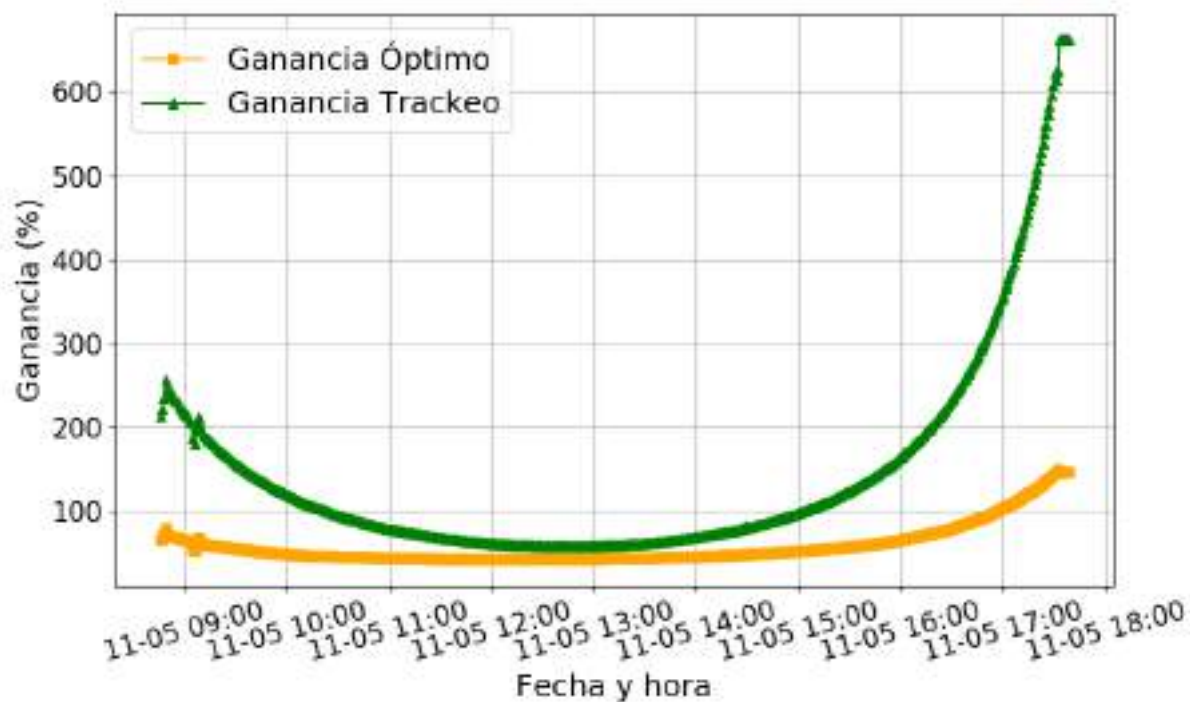


Figura 4: ganancias porcentuales respecto a la medición en plano horizontal para las posiciones de medición: en el ángulo óptimo anual y con trackeo en dos ejes.

Un día con cobertura parcial de nubes puede ejemplificarse con el día 8 de mayo, donde el kt diario fue 0,58, que presenta un gráfico como el que se muestra, a continuación, en la Figura 5.

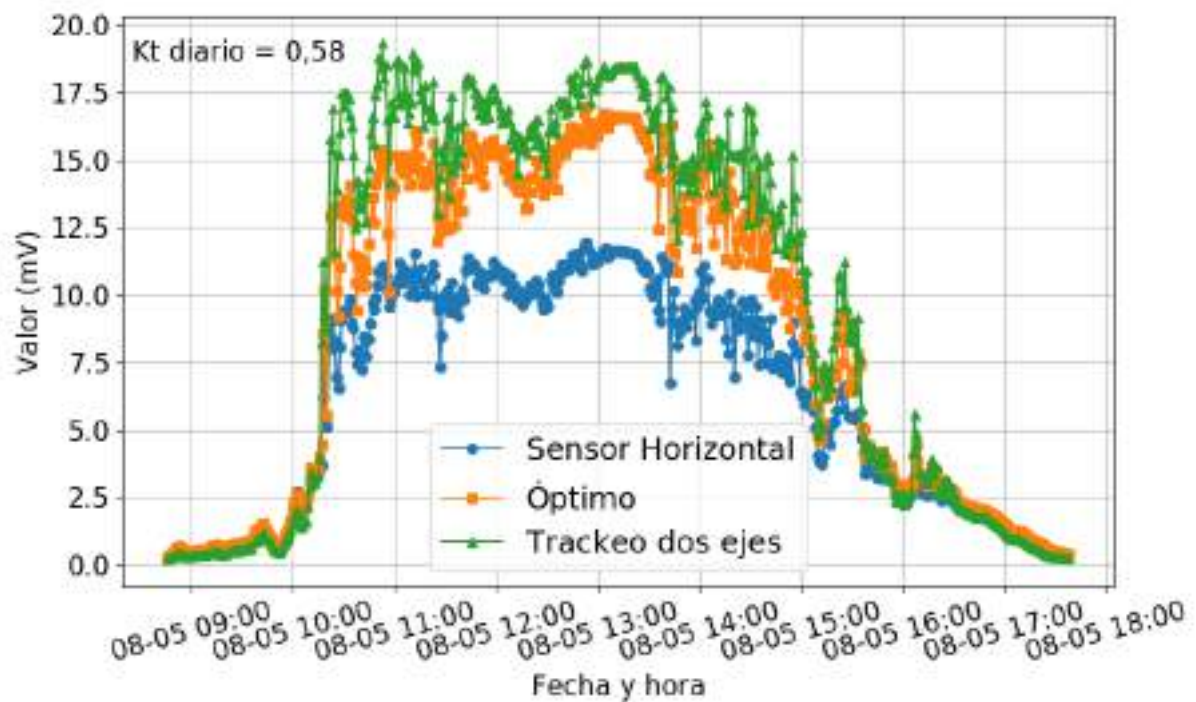


Figura 5: milivoltios promediados cada minuto para cada una de las posiciones de medición el día 8 de mayo.

Para este día particular la ganancia porcentual diaria de la energía colectada por el plano inclinado orientado al norte el ángulo óptimo anual respecto al horizontal, fue de 36,6%. La ganancia del plano que trackea en dos ejes fue del 55,2% respecto al horizontal. Las ganancias porcentuales minutales del 8 de mayo se muestran en la Figura 6.

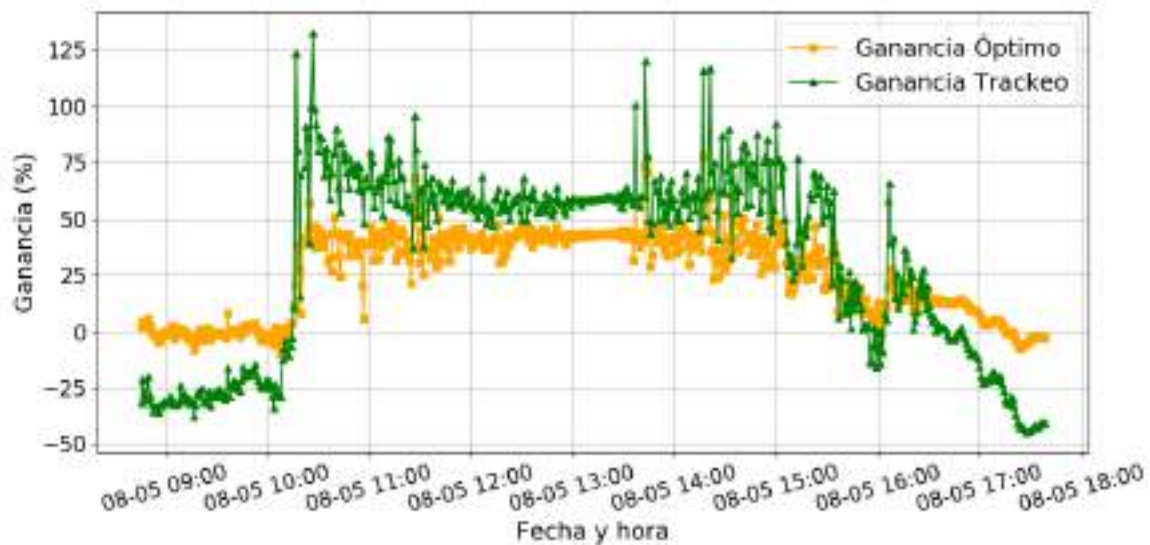


Figura 6: Ganancias porcentuales respecto a la medición en plano horizontal para las posiciones de medición: en el ángulo óptimo anual y con seguimiento en dos ejes, el día 8 de mayo. La ganancia de trackeo es negativa en algunos momentos.

Un día de cobertura prácticamente total, determina que la ganancia del trackeo en dos ejes puede llegar a ser negativa. Es decir: el trackeo no supone ninguna ventaja respecto al plano horizontal sino, más bien, una desventaja, tal como se muestra en la Figura 7.

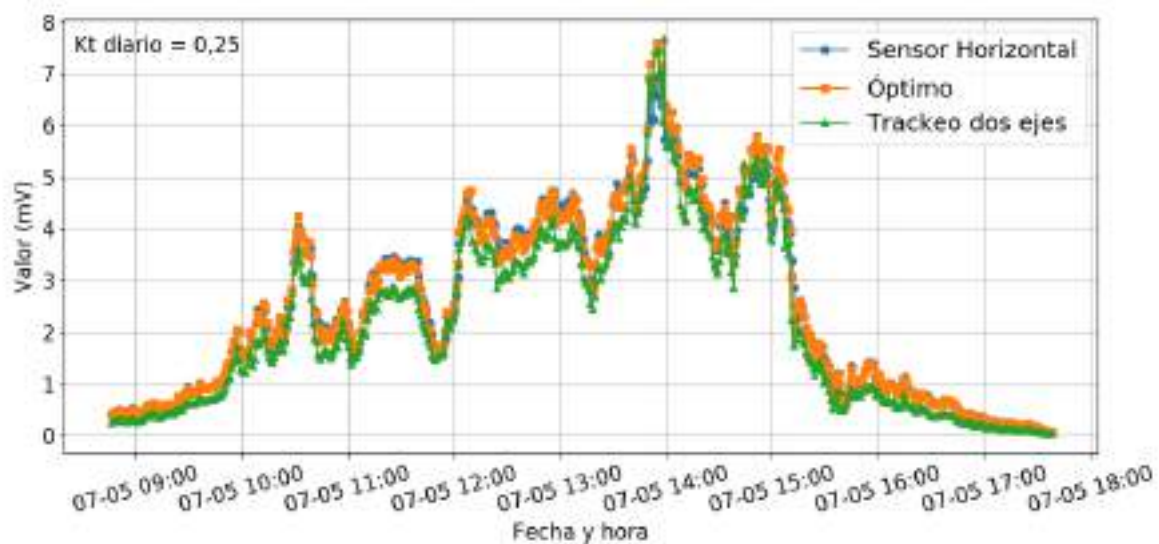


Figura 7: milivoltios promediados cada minuto para cada una de las posiciones de medición el día 7 de mayo.

Durante ese día, la ganancia porcentual diaria de la energía colectada por el plano inclinado orientado al norte el ángulo óptimo anual respecto al horizontal, fue de 1,2%; mientras que la ganancia del plano que trackea en dos ejes fue del -12,2% respecto al horizontal. En la Figura 8 se muestran las ganancias porcentuales minutales a lo largo del día 7 de mayo.

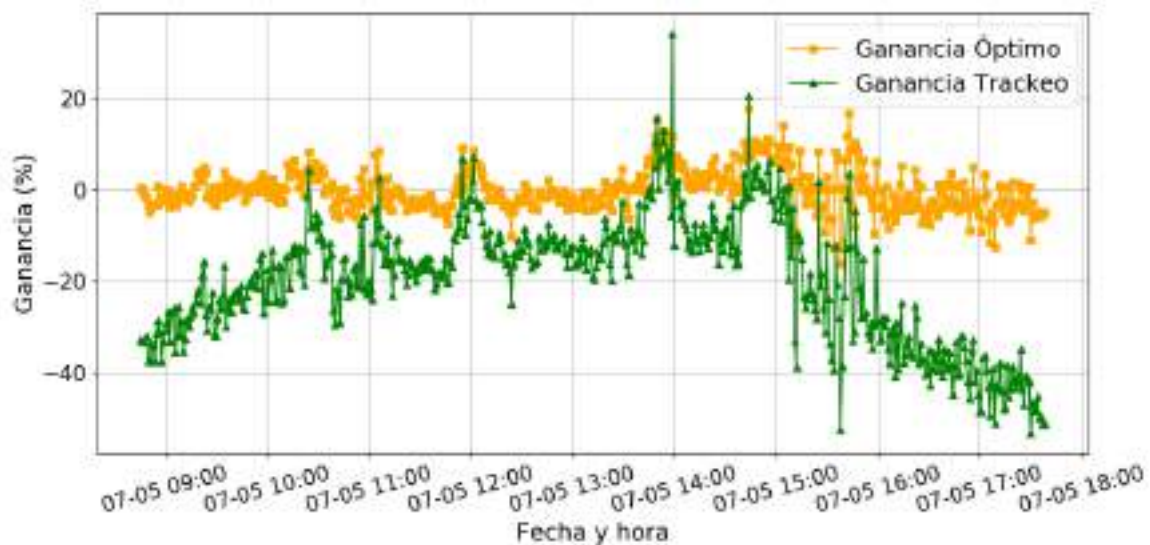


Figura 8: ganancias porcentuales respecto a la medición en plano horizontal para las posiciones de medición: en el ángulo óptimo anual y con trackeo en dos ejes el día 7 de mayo.

### Análisis de las ganancias

Las ganancias de ambas situaciones (trackeo en dos ejes y plano fijo en el ángulo óptimo anual) en función del ángulo cenital, son mostradas en la Figura 9.



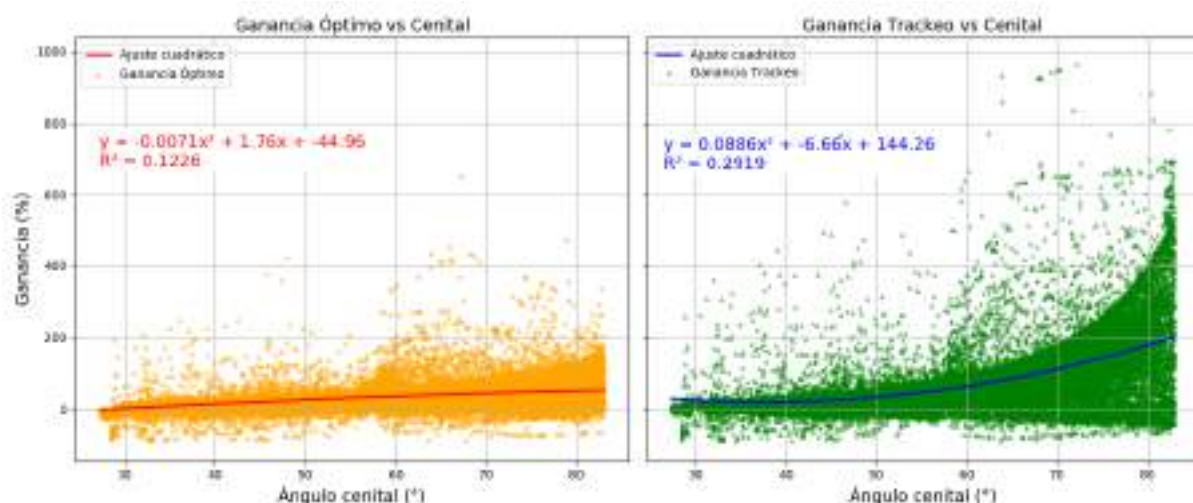


Figura 9: ganancias del plano inclinado el ángulo óptimo anual y del plano que trackea en dos ejes, en función del ángulo cenital.

Tal como se visualiza, la tendencia fue, en el caso del seguimiento en dos ejes, que la ganancia aumentara a medida que aumentaba el ángulo cenital. Ese hecho se veía bien reflejado en un día de cielo despejado, tal como el que mostró en la Figura 4. Si bien la presencia de nubes alteraba esa ganancia, la tendencia se mantiene. En cambio, en el caso del plano orientado al norte un ángulo igual al óptimo anual ( $28^\circ$ ) respecto a la horizontal, la tendencia se revela como muy débil. En ese caso, no puede determinarse a priori ninguna dependencia de la ganancia con el ángulo cenital.

En la Tabla 1 se muestra la ganancia, con respecto a la medición en plano horizontal, que se obtuvo midiendo en el ángulo óptimo y trackeando, a nivel mensual. Se presenta también el índice de claridad  $kt$  medio mensual, recordando que el índice de claridad,  $kt$ , se define como el cociente entre la irradiancia global horizontal y la irradiancia extraterrestre proyectada en el plano horizontal:

$$kt = \frac{\text{Irradiancia Global Horizontal}}{\text{Irradiancia TOA Horizontal}} \quad (5)$$

El  $kt$  diario fue calculado a partir de mediciones tomadas con frecuencia de un minuto realizadas con un piranómetro modelo CMP21 de la firma Kipp & Zonen, que forma parte del instrumental de medición instalado en el predio del GERSolar. El  $kt$  medio mensual, se calculó promediando los  $kt$  diarios en el mes. Las ganancias en las dos posiciones, ángulo inclinado igual al óptimo anual y el trackeo en dos ejes en función del  $kt$  se muestran en la Tabla 1, mientras que el gráfico de las ganancias en función del  $kt$  se ilustra en la Figura 10.

Tabla 1: Promedios mensuales de ganancias para cada una de las orientaciones.

| Mes   | Ganancia óptimo anual (%) | Ganancia track (%) | Kt medio mensual |
|-------|---------------------------|--------------------|------------------|
| Marzo | 13,9                      | 40,8               | 0,54             |
| Abril | 27,7                      | 55,3               | 0,59             |
| Mayo  | 28,6                      | 59,1               | 0,51             |
| Julio | 40,5                      | 68,8               | 0,43             |

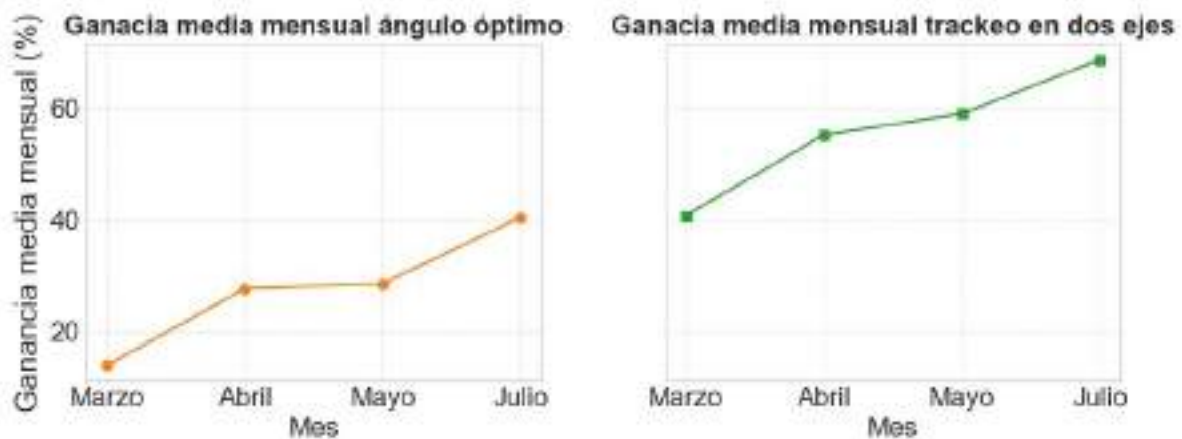


Figura 10: ganancias medias mensuales para las diferentes situaciones de orientación del plano.

Ambas ganancias medias evidenciaron un comportamiento dentro de lo esperable: la relacionada con el óptimo anual crece hacia el invierno ya que el Sol, en esa época, presenta menor altura, por lo que el plano inclinado capturó mayor energía que en los meses de verano, cuando el Sol se encuentra más alto. En el caso del trackeo en dos ejes, el aumento se debió a que, en los meses de verano, el plano horizontal recibió más energía que durante los meses de otoño e invierno, por lo que la ganancia del trackeo en dos ejes (que se calculó respecto al plano horizontal) fue menor. Por lo tanto, las medias mensuales resultaron consistentes con las diferentes geometrías solares para cada una de las estaciones del año.

Resulta interesante evaluar la conveniencia de realizar el trackeo en dos ejes. Dicha evaluación se relaciona con la energía que el propio sistema de trackeo requiere para moverse. Hay en la bibliografía varios trabajos que la abordan empleando aprendizaje de máquina (Krismanto et al (2024)). También hay trabajos evalúan la factibilidad del trackeo en dos ejes usando simulaciones basadas en modelos físicos: Ahmad et al. (2013), y de Rambhowan y Oree (2014). No obstante, la bibliografía no da cuenta de una serie extensa de mediciones que soporten las conclusiones alcanzadas.

Una primera aproximación que puede emplearse es definir cuál sería la ganancia del trackeo en dos ejes. Dada las mediciones efectuadas, es posible determinar cuánta energía colecta un plano que trackea al Sol en dos ejes cuando el seguimiento se hace a partir de un ángulo cenital específico durante un día despejado. Las ganancias fueron calculadas para un día despejado, trackeando para ángulos cenitales menores que un ángulo cenital específico. El resto del tiempo el plano permanecía orientado al norte el ángulo óptimo anual para Luján. Los resultados se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2: Ganancias (%) trackeando en dos ejes para valores mayores del ángulo cenital indicado y

| Ángulo cenital | Ganancia (%) | Ángulo cenital | Ganancia (%) | Ángulo cenital | Ganancia (%) |
|----------------|--------------|----------------|--------------|----------------|--------------|
| 82             | 49,1         | 71             | 66,5         | 60             | 85,3         |
| 81             | 51,5         | 70             | 68,6         | 59             | 87,0         |
| 80             | 51,8         | 69             | 70,3         | 58             | 88,3         |
| 79             | 52,4         | 68             | 72,0         | 57             | 89,8         |
| 78             | 54,1         | 67             | 73,8         | 56             | 91,4         |
| 77             | 55,6         | 66             | 75,5         | 55             | 92,8         |
| 76             | 57,5         | 65             | 77,2         | 54             | 94,3         |
| 75             | 59,4         | 64             | 79,0         | 53             | 95,9         |
| 74             | 61,3         | 63             | 80,6         | 52             | 97,6         |
| 73             | 62,8         | 62             | 82,2         | 51             | 100,3        |
| 72             | 64,7         | 61             | 83,9         |                |              |

dejando fijo el plano de colección en el óptimo anual para el resto de los ángulos cenitales para el día 11 de mayo.



Los valores porcentuales de ganancias (respecto a la energía colectada en el plano horizontal) mostrados en la Tabla 2 se seleccionaron bajo la siguiente condición de seguimiento del Sol: se trackeó en dos ejes, mientras que el ángulo cenital fuese mayor que el indicado en la Tabla 2. Para ángulos inferiores, el plano de colección se ubicó mirando al norte inclinado respecto de la horizontal el ángulo óptimo anual. Este cálculo está justificado dado que, en condiciones de cielo despejado, las mayores ganancias de trackeo en dos ejes se dieron cuando los ángulos cenitales fueron relativamente altos. Debido al hecho que esas ganancias disminuyeron a medida que el ángulo cenital se acercaba al correspondiente al mediodía solar, parece razonable analizar la ventaja de trackear en dos ejes durante un cierto tiempo y, luego, dejar el plano de colección fijo en una posición favorable para recepción de energía solar. Este ángulo fijo sería el óptimo anual, en una primera aproximación. Proceder así se justificaría en función del consumo energético del propio equipo de seguimiento, considerando que mantener inmóvil el plano de colección no consume energía y trackear sí. El ángulo cenital óptimo que determina la mejor performance energética del sistema de seguimiento depende del consumo energético del sistema de trackeo y de la energía generada por el sistema de aprovechamiento. También depende de la época del año, ya que, hacia el verano, período en que las alturas solares son mayores, debería variarse el ángulo fijo y, en vez de usar el óptimo anual. Quizá convenga, en esa época, por ejemplo, dejar el sistema en el plano horizontal en los momentos en que no se realice seguimiento en dos ejes, dado que el ángulo de inclinación óptimo del plano, respecto a la horizontal, durante los meses de verano, para Luján, es  $0^\circ$  (Righini, R. y Grossi Gallegos, 1999).

En el caso particular del día despejado estudiado, dejar de trackear para ángulos cenitales menores que  $60^\circ$  (lo que ocurre entre las 11 y las 13 durante el mes de mayo), dejando luego fijo el plano, en la dirección norte, un ángulo inclinado respecto a la horizontal un valor igual al óptimo anual, representaría una ganancia del 85% diaria en la colección de energía. Este valor resulta un 15% inferior al máximo posible al trackear en dos ejes todo el día, lo que no es una disminución muy importante pero que puede resultar significativa en el balance energético total que considere el consumo del sistema de trackeo.

Se trata de una primera aproximación que requiere medir durante todo un año, sin embargo, resulta útil para analizar estrategias que optimicen el balance energético global de un sistema de colección de energía solar que utilice esta tecnología de seguimiento en dos ejes.

Por otro lado, lo que se desprende del análisis de datos correspondientes a días nublados, queda claro que en situaciones de cobertura de cielo que, en todo caso, determinen un kt diario menor o igual a 0,4, no conviene trackear en absoluto. Esto está relacionado con la anisotropía de la radiación difusa, que resulta relativamente mayor en el horizonte (sobre todo el horizonte sur)) (Klucher, 1979; Hay y McKay, 1985; Pérez et al., 1990). Al inclinarse sensiblemente el plano de colección de la radiación como ocurre durante el trackeo en dos ejes, la energía captada es menor que la que captura un plano horizontal. Por otro lado el albedo del suelo pampeano, cercano a 0,2, implica que es mayor la energía perdida, cuando el kt es bajo, que la ganancia que presupone trackear en dos ejes.

## CONCLUSIONES

Se ha construido un dispositivo muy económico, con un nivel de precisión suficiente para evaluar las ventajas energéticas de mecanismos de trackeo para incrementar la energía colectada por un plano.

La ventaja de usar un mismo radiómetro para evaluar la energía recibida en las diferentes orientaciones del plano, consiste en evitar las incertezas asociadas a las constantes de calibración de los radiómetros y asegura la homogeneidad del comportamiento de los mismos durante el pequeño período de tiempo en el que son comparadas sus mediciones. En tal sentido, podemos afirmar que los datos colectados representan adecuadamente la energía colectada por el plano.

La información recolectada (una serie de mediciones inusualmente larga para la mayoría de los análisis que se han hecho sobre sistemas de seguimiento solar) se revela, por un lado, incompleta: es necesario realizar una serie de mediciones que al menos sea anual para tomar en cuenta cómo las diferentes trayectorias del Sol en el cielo y las condiciones de cobertura de nubes, influyen, efectivamente, en la

determinación del ángulo óptimo fijo de colección y en la ganancia que representa el trackeo en dos ejes. Ese análisis debe, necesariamente, complementarse con el trackeo en un eje, para considerar todas las posibilidades usuales de seguimiento que emplean, por ejemplo, los sistemas fotovoltaicos de generación eléctrica.

Las ganancias que representan el ángulo óptimo frente al plano horizontal en los meses estudiados van del 14% (el mes de menor ganancia) al 41% (mes de mayor ganancia), mientras que, en los mismos meses, las ganancias del trackeo frente al plano horizontal abarcan un rango comprendido entre el 41% y el 69%. Estos últimos valores están dentro del orden de valores descriptos en Ahmed Rhif et al., 2013 y Rambhowan y Oree, 2014.

De lo que surge de los datos considerados, pueden deducirse estrategias de trackeo que mejoren la generación energética total, ya que tales estrategias deben considerar la propia energía consumida por el sistema de seguimiento. En tal sentido puede aconsejarse, en base a lo medido, que en días con alta cobertura de nubes ( $k_t$  menor a 0,4) no conviene trackear en absoluto, dado que las ganancias que supone el seguimiento en dos ejes pueden llegar a ser negativas (comparadas con la energía recibida por un plano horizontal).

También se presentó una herramienta de evaluación que, bajo condiciones de cielo despejado, permitirá, una vez conocido el consumo del sistema de seguimiento, seleccionar a partir de qué ángulo cenital conviene dejar de trackear en dos ejes, con el objetivo de optimizar la generación de energía.

## REFERENCIAS

- Ahmad, F., Dahli, N. F., & Wahab, A. F. (2013). Power feasibility of a low power consumption solar tracker. *Procedia Environmental Sciences*, 17, 682–691.  
<https://doi.org/10.1016/j.proenv.2013.02.086>
- Alexandru, C. y Pozna, C. (2010). Simulation of a dual-axis solar tracker for improving the performance of a photovoltaic panel. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 224(6), 797–811. <https://doi.org/10.1243/09576509JPE871>
- Bolzi C. G., Tamasi M.J.L., Martínez Bogado M.G., Plá J. C. (2002). Radiómetros fotovoltaicos de bajo costo desarrollados en la C.N.E.A.: prototipo comercial. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 6, 11.01-11.02
- Bolzi C. G., Martínez Bogado M. G., Tamasi M. J. L., Grossi Gallegos H., Righini R. (2008). Desarrollo de radiómetros fotovoltaicos de bajo costo en la CNEA. *Actas del IX Congreso Panamericano de Iluminación Luxamérica 2008*, organizado por la Asociación Argentina de Luminotecnia, Rosario, Santa Fe, Argentina, Tomo I pp. III-38 a III-45.
- Grossi Gallegos, H. y Righini, R. (2013). Ángulo óptimo para planos colectores de energía solar integrados a edificios. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* (ISSN 0329-5184), Vol. 16, pp. 04.01-04.07. <https://portalderevistas.unsa.edu.ar/index.php/erma/article/view/1490>
- Hay, J. E., & McKay, D. C. (1985). Estimating solar irradiance on inclined surfaces: A review and assessment of methodologies. *International Journal of Solar Energy*, 3(4-5), 203-240.
- lucher, T. M. (1979). Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces. *Solar Energy*, 23(2), 111-114.
- Krismanto, A. U., Ariski, M., Lomi, A., & Setiadi, H. (2024). Hardware implementation and design of artificial neural network based dual axis solar tracker. En *Proceedings of the International Conference on Advanced Technology and Multidiscipline (ICATAM2022)* (Vol. 3047, Art. 030001). AIP Publishing. <https://doi.org/10.1063/5.0194339>
- Perez, R., Ineichen, P., Seals, R., Michalsky, J., & Stewart, R. (1990). Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. *Solar Energy*, 44(5), 271-289.
- Rambhowan, Y. y Oree, V. (2014). Improving the dual-axis solar tracking system efficiency via drive power consumption optimization. *Applied Solar Energy*, 50(2), 83–91.  
<https://doi.org/10.3103/S0003701X1402011X>

Rhif, A., Kardous, Z., y BenHadj Brahiek, N. (2013, enero). A sliding mode multimodel control for a sensorless photovoltaic system.

Righini, R. y Grossi Gallegos, H. (1999). Ángulos sugeridos para optimizar la colección anual de irradiación solar diaria en Argentina sobre planos orientados al norte. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 3.

## **COMPARISON OF COLLECTED SOLAR ENERGY BETWEEN FIXED PLANES AND TWO-AXIS TRACKING IN LUJÁN (ARGENTINE HUMID PAMPA)**

**ABSTRACT:** Incident solar radiation measurements were taken in Luján on a plane oriented in three different directions: horizontal, tilted north at the optimal annual angle relative to the horizontal, and tracking the position of the Sun using two-axis tracking. The objective is to determine, through a series of measurements over time, the improvement in energy collection of a plane (relative to the horizontal plane) implied by the other two orientations. A two-axis solar tracking device (azimuthal and zenithal) was built, controlled by an Arduino Mega, which calculates the position of the Sun by obtaining the required parameters from a GPS. Stepper motors were used to orient a radiometer that measures irradiance in the three positions described. The percentage differences between the energy collected in the horizontal plane and the other two positions were evaluated. Two-axis tracking showed gains of up to 102% on clear days, and average monthly gains ranged between 40.8% and 68.8%, with clear seasonal dependence. Single-axis tracking yielded gains of between 13.9% and 40.5%.

**Keywords:** solar irradiation, acquisition plane, optimal angle, two-axis tracking.

## APLICACIÓN DE UN MODELO DE MACHINE LEARNING PARA CLASIFICAR LA NUBOSIDAD A PARTIR DE DATOS DE IRRADIANCIA GLOBAL HORIZONTAL

**Anabela Lusi<sup>1,2</sup>, Facundo Orte<sup>1,2</sup>, Elian Wolfram<sup>3</sup>, José Ignacio Orlando<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Departamento de Investigaciones en Láseres y Aplicaciones (DEILAP), UNIDEF (CITEDEF-CONICET), IRL-IFAECI-CNRS-3351, Villa Martelli (B1603), Buenos Aires, Argentina.

<sup>2</sup>Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Godoy Cruz 2290 (C1425FQB) CABA, Argentina

<sup>3</sup>Servicio Meteorológico Nacional (SMN), Av. Dorrego 4019 (C1425GBE), CABA, Argentina

<sup>4</sup>Yatiris Group, Instituto PLADEMA, CONICET, UNCPBA, Tandil (B7000), Argentina  
e-mail: [anabelalusi@gmail.com](mailto:anabelalusi@gmail.com)

**RESUMEN:** La radiación solar que alcanza la superficie terrestre está modulada por diversos factores, siendo la nubosidad el de mayor impacto y el que presenta las variaciones más rápidas. Las diferentes clases o tipos de nubes pueden generar patrones característicos en los niveles de irradiancia medidos, los cuales pueden aprovecharse para determinar la clasificación de la propia nubosidad. En este estudio se aplica un modelo de machine learning sobre una base de datos de GHI y un modelo de cielo claro, para clasificar la nubosidad en el sitio de Villa Martelli perteneciente a la red Saver-Net, durante los años 2015 a 2024. Se encontró que la mayor frecuencia relativa corresponde a situaciones de cielo despejado, seguida por la clase mezcla, mientras que la clase de nubes menos frecuente fue Stratocumulus-Stratus-Altostratus. Esta distribución puede estar relacionada con la precisión del modelo para discriminar cada grupo. Este trabajo representa un avance en la clasificación de nubosidad y aporta información valiosa para estudios orientados a evaluar tendencias y cambios a largo plazo.

**Palabras clave:** clasificación de nubosidad, GHI, y aprendizaje supervisado.

### INTRODUCCIÓN

Las nubes desempeñan un papel fundamental en el balance energético de la Tierra, ya que modulan tanto la radiación solar entrante como la radiación infrarroja saliente (Stephens y L'Ecuyer, 2015). Sus características, como la opacidad, el desarrollo vertical o la altura de la base y el tope, determinan en gran medida el tipo de nube y, con ello, su efecto sobre la cantidad de radiación que alcanza la superficie terrestre. Este efecto se produce a través de procesos de reflexión, absorción y dispersión de la radiación por parte de las partículas que componen la nube, y varía según factores como su volumen, forma, espesor, composición y cobertura (Deneke et al., 2008; Kokhanovsky, 2004; Ododo et al., 1996; Orsini et al., 2002). Por esta razón, la presencia y el movimiento de las nubes generan variaciones significativas, incluso a muy corto plazo, en los valores de Irradiancia Horizontal Global (GHI) medidos en superficie, con implicancias directas en campos como la meteorología, la predicción de energía solar y la gestión de sistemas eléctricos.

La Organización Meteorológica Mundial (OMM) (WMO, 2017) clasifica las nubes en diez géneros principales, agrupados en niveles altos, medios y bajos según la altitud a la que se observan. Esta clasificación es tradicionalmente realizada por observadores meteorológicos, a partir de la apariencia y distribución de las nubes en el cielo (octas). Sin embargo, este método resulta costoso y presenta un



grado inevitable de subjetividad. Dadas las dificultades asociadas con la clasificación visual, los investigadores han buscado desarrollar metodologías más objetivas y rentables para la detección de nubes. Como alternativa, se han desarrollado distintos métodos que utilizan otras herramientas, como datos satelitales (Escrig et al., 2013; Liang y Yuan, 2016; Nespoli et al., 2022), cámaras de todo cielo (Kassianov et al., 2005; Long et al., 2006) o parámetros meteorológicos medidos en superficie (Dürr y Philipona, 2004).

En este contexto, surge la posibilidad de utilizar series temporales de GHI, un parámetro de medición sencilla y de mayor disponibilidad, para inferir el tipo de nubosidad presente en la atmósfera. A fines de la década de 1990, Duchon y O'Malley (1999) (Duchon y O'Malley, 1999) propusieron un método para discriminar el tipo de nube basándose en mediciones de irradiancia de un piranómetro y análisis estadístico. Sin embargo, este enfoque mostró una precisión entre las estimaciones del piranómetro con las observaciones desde tierra aproximadamente el 45% de las veces. Estas diferencias fueron atribuidas a que el piranómetro se enfoca en las nubes que cruzan la trayectoria del Sol y a la susceptibilidad de la interferencia de aerosoles.

Los avances recientes en técnicas de machine learning (ML) o aprendizaje automático, ofrecen un marco más robusto para abordar este desafío, como se ha evidenciado en diversas aplicaciones dentro del campo de las Ciencias de la Tierra (Lary et al., 2018). Estos modelos tienen la ventaja de ser lo suficientemente flexibles para aplicarse en diferentes escenarios, ya que son capaces de aprender automáticamente patrones y relaciones entre sus variables de entrada y salida. Diversos autores han utilizado estas técnicas para la detección de cielos despejados (M. Liu et al., 2021; Mommert, 2020). Otros investigadores han utilizado este método para detectar diferentes condiciones de nubosidad (Lee et al., 2004; Taravat et al., 2015).

Lusi et. al (2024) (Lusi et al., 2024) desarrollaron un modelo de clasificación de nubosidad basado en el algoritmo XGBoost, utilizando únicamente mediciones de GHI y un modelo de cielo despejado. Inspirado en el enfoque de Duchon y O'Malley (1999), el modelo fue entrenado con datos de GHI del año 2019 en Villa Martelli, Buenos Aires, mientras que las etiquetas de referencia provinieron de la clasificación de imágenes todo cielo, realizada por observadores meteorológicos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de Argentina (<https://www.smn.gob.ar/>). El modelo alcanzó un accuracy de 0,88 y un coeficiente kappa de Cohen de 0,87 en el conjunto de test. Dicho modelo se encuentra disponible públicamente para ser usado.

En el presente estudio, se implementa el modelo de ML desarrollado por Lusi et. al (2024) para clasificar la nubosidad en el sitio de la red Saver-Net de Villa Martelli, Buenos Aires, y obtener estadísticas de la presencia de las diferentes clases de nubes durante los años 2015 a 2024. El modelo, previamente entrenado y validado en este sitio, se aplica aquí con el fin de generar dichas estadísticas sobre un periodo más largo.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

### ***Zona de estudio***

La red Sudamericana de Gestión de Riesgos Ambientales (SAVER-Net, por sus siglas en inglés), es una red de monitoreo remoto de la atmósfera, que fue desplegada entre 2013 y 2018 en el marco de un proyecto conjunto entre Argentina, Chile y Japón (Orte et al., 2022). Incluye ocho sitios de medición distribuidos en Argentina, equipados con diversos instrumentos para la caracterización de la atmósfera. Entre ellos, se incluyen piranómetros Kipp&Zonen CMP-21 (285-2800 nm). Los piranómetros registran la GHI en el rango de onda corta sobre un plano horizontal, con una resolución temporal de un minuto. El presente trabajo se llevó a cabo en el sitio de Villa Martelli (VMA) (34,58°S, 58,48°O, 25 m s.n.m.), uno de los nodos de la red, con datos adquiridos durante los años 2015 a 2024.

El conjunto de datos de GHI de la estación fue sometido a un control de calidad. Dentro de los procedimientos aplicados, se incluye la exclusión de medidas de altura solar baja ( $<7^\circ$ ), la inspección visual de las series para identificar periodos defectuosos y el análisis conjunto con otras características,

como el índice de claridad (kt), para poder detectar la presencia de sombras o errores sistemáticos y descartar el periodo en caso de que el registro esté defectuoso.

### **Modelo de machine learning utilizado para la clasificación**

El modelo de clasificación de nubosidad que se utilizó en este trabajo fue desarrollado por Lusi et al. (2024) y es un clasificador supervisado basado en XGBoost con función de pérdida softmax. El modelo es capaz de discriminar seis clases de nubosidad, a partir de la combinación de series temporales de mediciones de GHI y de un modelo de irradiancia de cielo claro ( $GHI_{CS}$ ). En este trabajo se utilizó el modelo McClear (Lefèvre et al., 2013) para obtener  $GHI_{CS}$ . El modelo de ML determina la clasificación de la nubosidad en ventanas temporales de 33 minutos de duración. Una descripción detallada del entrenamiento, validación, testeo y desempeño del modelo puede encontrarse en Lusi et al. (2024).

La Figura 1 muestra las siete categorías de nubosidad (seis categorías más la clase mezcla) capaces de discriminar, agrupadas en dos grandes grupos denominados “not-mixed” (no mezcla) y “mixed” (mezcla). Estas categorías son: Cb-Ns (Cumulonimbus y Nimbostratus), Ac-Cc (Alto cumulus y Cirrocumulus), Cu (Cumulus), Sc-St-As (Stratocumulus, Stratus y Alto cumulus), Ci-Cs (Cirrus y Cirrostratus) y Clear-sky (cielo despejado). Si bien la clase “clear sky” no es una clase de nubosidad estrictamente, se incluye como una clase más dentro de las clasificaciones.

Cabe destacar que la clase “mezcla” se asigna cuando en una ventana temporal coexisten más de uno de los grupos de la clase “no mezcla”. Por ejemplo, si en una ventana se detectan simultáneamente Cb-Ns y Cu, esa ventana se clasifica como mezcla.

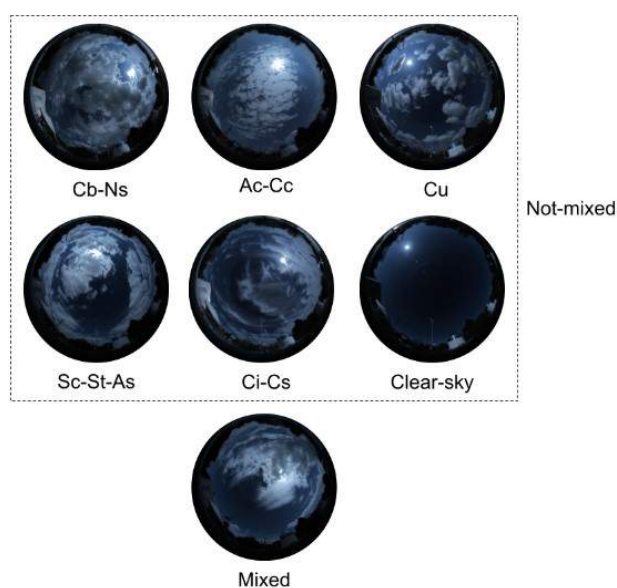


*Figura 1: Clasificaciones posibles de nubosidad a partir del modelo de machine learning (Lusi et al., 2024)*

Con el fin de obtener las clasificaciones dentro de los siete grupos posibles, se siguió la siguiente metodología. En primer lugar, se calcularon diferentes características (*features*) para intervalos de 33 minutos de irradiancia definidas en Lusi et al. (2024). Estas *features*, son utilizadas como indicadores de la variabilidad de la radiación solar presente, con las cuales fue entrenado el modelo de ML. Se determinaron a través de las siguientes estimaciones dentro de las ventanas temporales de 33 minutos:

- Desviación estándar del índice de variabilidad (Stein et al., 2012).
- Desviación cuadrática media entre GHI y  $GHI_{CS}$ .
- Desviación estándar, media y valor máximo del índice de claridad modificado (Perez et al., 1990).
- Asimetría y curtosis de la serie del índice de claridad modificado.
- Variabilidad media de los cambios en el índice de claridad modificado.

Luego de calcular y normalizar las *features*, se utilizó el modelo de ML disponible públicamente en GitHub (<https://github.com/anabelalusi/cloud-classification>) para obtener las clasificaciones de nubosidad. La Figura 2 presenta un esquema de la metodología empleada.



*Figura 2: Metodología para la aplicación del modelo de ML para clasificación de nubosidad. El modelo se alimenta con ocho features extraídas de ventanas temporales de 33 minutos, que utilizan únicamente GHI y GHI<sub>cs</sub>. La salida corresponde a la clasificación del periodo en una de las siete clases de nubosidad.*

Es importante destacar que el modelo clasifica en seis grupos principales de nubosidad. Adicionalmente, se incorporó en el post procesamiento la clase “mezcla”, que corresponde a la presencia simultánea de más de un grupo de nubosidad (por ejemplo, si se detecta Ac-Cc y Cu en la ventana de tiempo, se etiqueta como mezcla). Para identificar esta categoría, se calcula la entropía de las probabilidades de clasificación, cuando la entropía supera el umbral de 0,7, la etiqueta de salida se define como “mezcla”, siguiendo lo indicado en Lusi et al. (2024).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### **Clasificación de nubosidad**

El modelo asignó una clasificación de nubosidad a la serie temporal de GHI registrada en VMA durante el periodo 2015-2024, evaluando ventanas consecutivas de 33 minutos, siempre y cuando la serie esté completa.

La Figura 3 muestra un caso de estudio correspondiente al 28 de enero de 2019. Las líneas verticales de colores sobre la gráfica representan las ventanas clasificadas en cada categoría de nubosidad. En la parte inferior, tres imágenes captadas por la cámara de observación del cielo ilustran momentos específicos del día, coincidiendo con las clasificaciones del modelo.



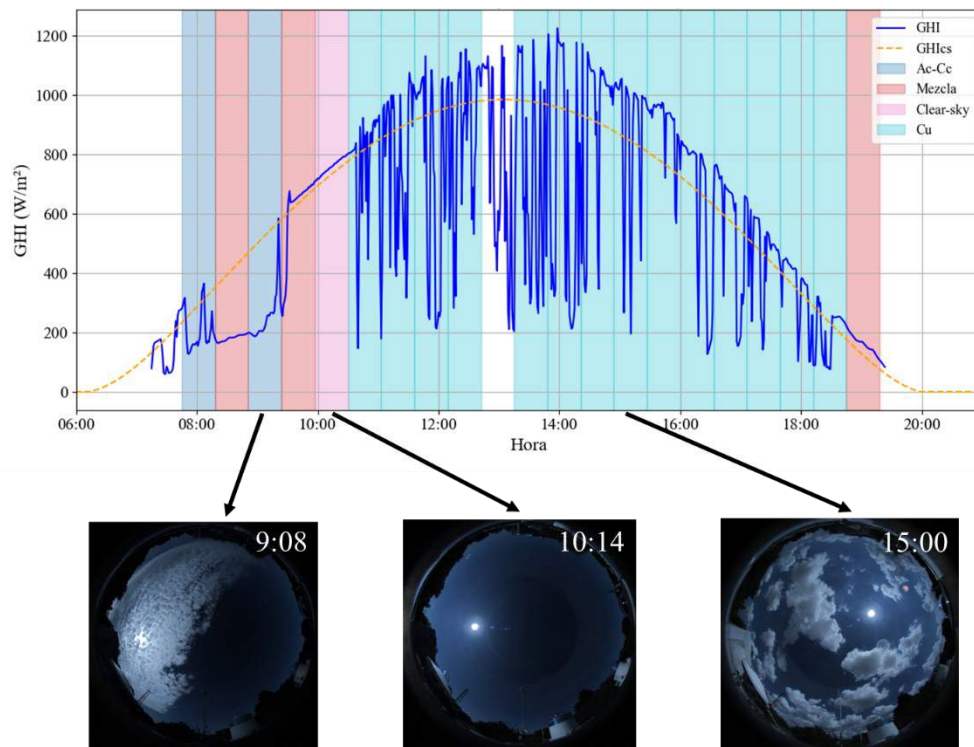


Figura 3: Clasificación de nubosidad para el 28 de enero de 2019 en VMA. Las líneas verticales de colores indican las ventanas de 33 minutos clasificadas por el modelo en distintas categorías de nubosidad: Ac-Cc, Mezcla, Clear-Sky y Cu. En la parte inferior se muestran imágenes de la cámara de observación del cielo que ilustran tres ventanas específicas.

A las 9:08h, la ventana fue etiquetada como Ac-Cc. A las 10:14h, la alta correspondencia entre las curvas GHI y  $GHI_{CS}$  respalda la clasificación como cielo despejado (Clear-sky). Finalmente, a las 15:00h, la imagen evidencia cúmulos bien definidos, en concordancia con la clasificación Cu asignada por el modelo.

La Tabla 1 resume la cantidad de ventanas de 33 minutos clasificadas para cada tipo de nubosidad, así como el porcentaje que representa cada clase durante los años 2015 a 2024.

Tabla 1: Resumen de las clasificaciones de nubosidad en VMA durante el periodo 2015 a 2024.

| Clase     | Número de ventanas | Frecuencia relativa (%) |
|-----------|--------------------|-------------------------|
| Clear-sky | 22900              | 37,2                    |
| Mezcla    | 20118              | 32,7                    |
| Cb-Ns     | 7213               | 11,7                    |
| Ci-Cs     | 5691               | 9,3                     |
| Ac-Cc     | 2360               | 3,8                     |
| Cu        | 1735               | 2,8                     |
| Sc-St-As  | 1504               | 2,4                     |

A partir de los resultados se observa que la clase predominante es Clear-sky, condición para la cual el modelo también presenta mayor precisión (Lusi et al., 2024). Esto sugiere que el modelo podría ser una herramienta útil para aplicaciones relacionadas con la radiación solar, donde la identificación de períodos de cielo despejado es fundamental.

En segundo lugar, la clase Mezcla muestra una alta frecuencia relativa, indicando que en la mayoría de las ventanas de 33 minutos se detectó la presencia simultánea de más de uno de los seis grupos “not mixed”. Por su parte, la clase Sc-St-As presenta la frecuencia más baja, lo que indica una menor presencia durante el periodo analizado. Sin embargo, es importante destacar que esta es también la clase con mayor dificultad para la discriminación por parte del modelo de ML (Lusi et al., 2024).

**Distribución anual de las clases de nubosidad**

La Figura 4 presenta la frecuencia relativa anual de las distintas clases de nubosidad asignadas por el modelo entre 2015 y 2024. La frecuencia relativa se calculó considerando el porcentaje de cada clase sobre la cantidad total de muestras analizadas en un año particular. Se destacan las categorías Clear-sky y Cu en la mayoría de los años, mientras que las clases Ci-Cs y Ac-Cc, Cb-Ns muestran porcentajes más bajos y relativamente estables a lo largo del periodo analizado.

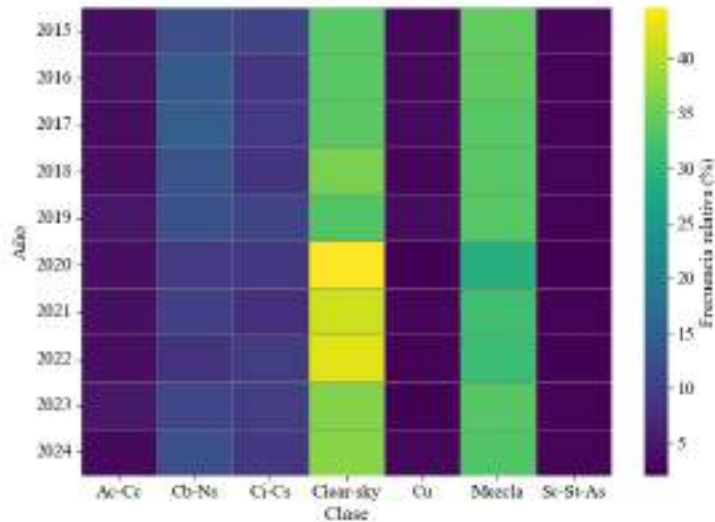


Figura 4: Distribución porcentual anual de las clases de nubosidad observadas entre 2015 y 2024. Cada valor representa el porcentaje relativo al total de ventanas de observación de cada año.

Esta representación permite detectar años con valores atípicos. Por ejemplo, los años 2020 y 2022, presentan una mayor proporción de clasificaciones de cielo despejado en comparación con el resto de los años. Este patrón podría asociarse a condiciones meteorológicas particulares o a variaciones en los forzantes climáticos de escala regional. Por otro lado, la consistencia observada en algunas clases sugiere la presencia de un régimen nuboso persistente, mientras que otras evidencian una mayor variabilidad interanual.

**Distribución estacional de las clases de nubosidad**

La Figura 5 muestra la distribución porcentual estacional de las diferentes clases de nubosidad asignadas por el modelo en el sitio durante el período analizado.

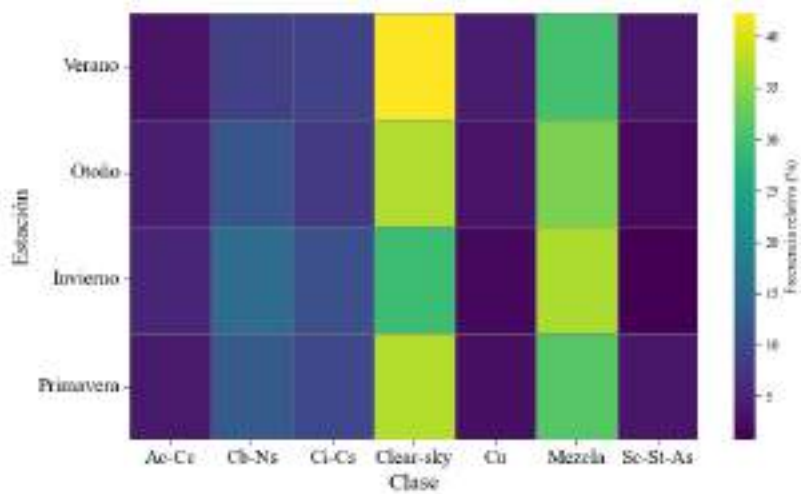


Figura 5: Distribución porcentual por estación de las clases de nubosidad observadas entre 2015 y 2024. Cada valor representa el porcentaje relativo al total de ventanas de observación de cada estación.

Se observa que durante el verano predomina la clase Clear-sky, representando el 42,3% de las clasificaciones, seguida por la clase Mezcla con un 30% y la clase Ci-Cs con un 8,9%. En otoño, Clear-sky y Mezcla mantienen una presencia similar, con 37,2% y 34,0% respectivamente, mientras que las clases Cb-Ns y Ci-Cs aumentan su presencia alcanzando 11,8% y 7,7%. Durante el invierno se observa un incremento en las clases Mezcla (37,1%) y Cb-Ns (15,3%), acompañado de una reducción de la clase de Clear-sky al 29,3%. Además, Ci-Cs también incrementa su frecuencia a un 10,8%. En primavera, la distribución vuelve a ser similar a la predicha en otoño, con Clear-sky en 37,5%, Mezcla en 31,3%, y las clases Cb-Ns y Ci-Cs con 12,3% y 9,7%, respectivamente. Las clases de menor frecuencia, como Ac-Cc y Cu, mantienen porcentajes inferiores al 6% durante todas las estaciones.

## CONCLUSIONES

Este trabajo muestra la utilidad de un modelo de ML para clasificar la nubosidad a partir de series temporales de GHI y de un modelo de cielo claro en ventanas de 33 minutos. La aplicación del modelo sobre datos de VMA entre 2015 y 2024 permitió identificar las diferentes clases de nubosidad, resultando la clase de cielo despejado la más frecuente durante el periodo analizado.

La distribución anual de las clases nubosas evidencia patrones consistentes a lo largo de los años, con variaciones que podrían estar asociadas a condiciones meteorológicas particulares, como se observó en los años 2020 y 2022 con un mayor porcentaje de cielo claro. La presencia y frecuencia relativa de clases menos comunes, aunque algunas más difíciles de discriminar por el modelo, también aportan información valiosa sobre la variabilidad nubosa local.

Este tipo de análisis permite caracterizar la climatología nubosa, y además establece una base comparativa para futuras investigaciones orientadas a evaluar tendencias y posibles cambios de largo plazo en la nubosidad.

## FUENTES DE FINANCIAMIENTO

Se retira este contenido en la versión actual para respetar los lineamientos de revisión doble-ciego.

## AGRADECIMIENTOS

Se retira este contenido en la versión actual para respetar los lineamientos de revisión doble-ciego.

## REFERENCIAS

- Deneke, H. M., Feijt, A. J., y Roebeling, R. A. (2008). Estimating surface solar irradiance from METEOSAT SEVIRI-derived cloud properties. *Remote Sensing of Environment*, 112(6), 3131-3141. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.03.012>
- Duchon, C. E., y O'Malley, M. S. (1999). Estimating Cloud Type from Pyranometer Observations. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 38(1), 132-141. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1999\)038<0132:ECTFPO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1999)038<0132:ECTFPO>2.0.CO;2)
- Dürr, B., y Philipona, R. (2004). Automatic cloud amount detection by surface longwave downward radiation measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109(D5). <https://doi.org/10.1029/2003JD004182>
- Escrig, H., Batlles, F. J., Alonso, J., Baena, F. M., Bosch, J. L., Salbidegoitia, I. B., y Burgaleta, J. I. (2013). Cloud detection, classification and motion estimation using geostationary satellite imagery for cloud cover forecast. *Energy*, 55, 853-859. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.01.054>
- Kassianov, E., Long, C., y Ovchinnikov, M. (2005). Cloud Sky Cover versus Cloud Fraction: Whole-Sky Simulations and Observations. *Journal of Applied Meteorology*, 44. <https://doi.org/10.1175/JAM-2184.1>
- Kokhanovsky, A. (2004). Optical properties of terrestrial clouds. *Earth-Science Reviews*, 64(3), 189-241. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(03\)00042-4](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(03)00042-4)

- Lary, D., Zewdie, G., Liu, X., Wu, D., Levetin, E., Allee, R., Malakar, N., Walker, A., Mussa, H., Mannino, A., y Aurin, D. (2018). Machine Learning Applications for Earth Observation (pp. 165-218). [https://doi.org/10.1007/978-3-319-65633-5\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-319-65633-5_8)
- Lee, Y., Wahba, G., y Ackerman, S. A. (2004). Cloud Classification of Satellite Radiance Data by Multicategory Support Vector Machines. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 21(2), 159-169. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2004\)021<0159:CCOSRD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2004)021<0159:CCOSRD>2.0.CO;2)
- Lefèvre, M., Oumbe, A., Blanc, P., Espinar, B., Gschwind, B., Qu, Z., Wald, L., Schroedter-Homscheidt, M., Hoyer-Klick, C., Arola, A., Benedetti, A., Kaiser, J. W., y Morcrette, J.-J. (2013). McClear: A new model estimating downwelling solar radiation at ground level in clear-sky conditions. *Atmospheric Measurement Techniques*, 6(9), 2403-2418. <https://doi.org/10.5194/amt-6-2403-2013>
- Liang, X., y Yuan, C. (2016). Derivation of 3D cloud animation from geostationary satellite images. *Multimedia Tools and Applications*, 75(14), 8217-8237. <https://doi.org/10.1007/s11042-015-2738-7>
- Liu, M., Xia, X., Fu, D., y Zhang, J. (2021). Development and Validation of Machine-Learning Clear-Sky Detection Method Using 1-Min Irradiance Data and Sky Imagers at a Polluted Suburban Site, Xianghe. *Remote Sensing*, 13(18), 3763. <https://doi.org/10.3390/rs13183763>
- Liu, S., Duan, L., Zhang, Z., y Cao, X. (2019). Hierarchical Multimodal Fusion for Ground-Based Cloud Classification in Weather Station Networks. *IEEE Access*, 7, 85688-85695. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2926092>
- Long, C., Sabburg, J., Calbó, J., y Pages, D. (2006). Retrieving Cloud Characteristics from Ground-Based Daytime Color All-Sky Images. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 23. <https://doi.org/10.1175/JTECH1875.1>
- Loyber, P. J. (2022). Entrenamiento de un modelo de IA para el procesamiento de imágenes todo cielo y clasificación de nubes [Instituto Tecnológico de Buenos Aires, ITBA]. <https://ri.itba.edu.ar/handle/123456789/3982>
- Lusi, A. R., Orte, P. F., Wolfram, E., y Orlando, J. I. (2024). Cloud classification through machine learning and global horizontal irradiance data analysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 150(765), 5435-5451. <https://doi.org/10.1002/qj.4880>
- Mommert, M. (2020). Cloud Identification from All-sky Camera Data with Machine Learning. *The Astronomical Journal*, 159(4), 178. <https://doi.org/10.3847/1538-3881/ab744f>
- Nespoli, A., Niccolai, A., Ogliari, E., Perego, G., Collino, E., y Ronzio, D. (2022). Machine Learning techniques for solar irradiation nowcasting: Cloud type classification forecast through satellite data and imagery. *Applied Energy*, 305, 117834. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117834>
- Ododo, J. C., Agbakwuru, J. A., y Ogbu, F. A. (1996). Correlation of solar radiation with cloud cover and relative sunshine duration. *Energy Conversion and Management*, 37(10), 1555-1559. [https://doi.org/10.1016/0196-8904\(96\)86837-3](https://doi.org/10.1016/0196-8904(96)86837-3)
- Orsini, A., Tomasi, C., Calzolari, F., Nardino, M., Cacciari, A., y Georgiadis, T. (2002). Cloud cover classification through simultaneous ground-based measurements of solar and infrared radiation. *Atmospheric Research*, 61(4), 251.
- Orte, F., Wolfram, E., Luccini, E., D'Elia, R., Lusi, A., Pallotta, J., Nollas, F., Carmona, F., Papandrea, S., Cabezas, M. D., Benítez, G. C., y Mizuno, A. (2022). Red de Monitoreo de la Irradiancia Solar UV-Total en Argentina «Saver-Net». *Meteorológica*, 47(2). <https://doi.org/10.24215/1850468Xe016>
- Perez, R., Ineichen, P., Seals, R., y Zelenka, A. (1990). Making full use of the clearness index for parameterizing hourly insolation conditions. *Solar Energy*, 45(2), 111-114. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(90\)90036-C](https://doi.org/10.1016/0038-092X(90)90036-C)
- Stein, J. S., Hansen, C., y Reno, M. J. (2012, marzo 1). The Variability Index: A New and Novel Metric for Quantifying Irradiance and PV Output Variability. World Renewable Energy Forum, United States. <https://www.osti.gov/biblio/1068417>
- Stephens, G. L., y L'Ecuyer, T. (2015). The Earth's energy balance. *Atmospheric Research*, 166, 195-203. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.06.024>
- Taravat, A., Del Frate, F., Cornaro, C., y Vergari, S. (2015). Neural Networks and Support Vector Machine Algorithms for Automatic Cloud Classification of Whole-Sky Ground-Based Images. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 12(3), 666-670. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2014.2356616>
- WMO. (2017). Manual on the Observation of Clouds and Other Meteors – International Cloud Atlas: Vol. Basic Documents No. 2. <https://library.wmo.int/idurl/4/66297>

## CLOUD CLASSIFICATION FROM GLOBAL HORIZONTAL IRRADIANCE USING A MACHINE LEARNING MODEL

**ABSTRACT** Solar radiation reaching the Earth's surface is modulated by various factors, with cloudiness being the most impactful factor, exhibiting the fastest variations. Different cloud classes or types can generate characteristic patterns in measured irradiance levels, which can be leveraged to determine cloud classification. In this study, a machine learning model was applied to a global horizontal irradiance (GHI) database and a clear-sky model to classify cloudiness at the Villa Martelli site, part of the Saver-Net network, from 2015 to 2024. The highest relative frequency corresponded to clear-sky conditions, followed by the mixed cloud class, whereas the least frequent class was the stratocumulus-stratus-alto-cumulus. This distribution may be related to the accuracy of the model in discriminating each group. This study represents an advance in cloud classification and provides valuable information for studies aimed at evaluating long-term trends and changes.

**Keywords:** cloud classification, GHI and supervised learning algorithms.

## ADAPTACIÓN AL SITIO DE IRRADIANCIA SOLAR GLOBAL USANDO APRENDIZAJE AUTOMÁTICO. CASO DE ESTUDIO: COTA COTA Y CHIVAY (PERÚ)

**Miriam Manrique<sup>1,2</sup>, Rubén Ledesma<sup>2,3</sup>, Nicolas Rivera-Lera<sup>2,3</sup>, Germán Salazar<sup>2,3</sup>**

<sup>1</sup>Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) - Av. Tupac Amaru 210-Rímac-Lima-Perú.

<sup>2</sup>Grupo de Estudio y Evaluación de la Radiación Solar (GEERS)-INENCO-CONICET-Av. Bolivia 5150 - Salta - Argentina.

<sup>3</sup>Facultad de Ciencias Exactas - Universidad Nacional de Salta -Av. Bolivia 5150 – Salta - Argentina.  
e-mail: miriam.manrique.m@uni.pe

**RESUMEN:** En este estudio aplicamos la técnica de Adaptación al Sitio (AaS) para mejorar la estimación de la irradiancia global horizontal (GHI) de la base de datos satelital National Solar Radiation Database (NSRDB) en dos estaciones radiométricas del sur del Perú (Cota Cota y Chivay), para los años 2021 y 2022, con una frecuencia temporal horaria. Se evaluaron diferentes funciones adaptivas mediante modelos estadísticos, como la Regresión Lineal Simple (SLR), Regresión Lineal Múltiple (MLR) y un modelo de aprendizaje automático, (Perceptrón Multicapa, MLP). Las métricas utilizadas para evaluar el performance de estas funciones fueron el error medio de sesgo (rMBE) y el error cuadrático medio (rRMSE) porcentuales, así como sus versiones absolutas. Los resultados muestran que SLR y MLR corrigen el sesgo ( $rMBE \approx 0$ ), pero no los desvíos de las estimaciones (rRMSE), mientras que el MLP la reduce en aproximadamente un 4% en Chivay y en casi un 0,5% en Cota Cota. Esta mínima diferencia para Cota Cota podría deberse a que la base de datos satelital NSRDB tendría una buena correlación con los datos medidos, lo que no ocurría en Chivay.

**Palabras clave:** Irradiancia solar global, adaptación al sitio, aprendizaje automático, Perú.

### INTRODUCCIÓN

Conocer la distribución espacial y temporal del recurso solar en un sitio o región de interés es la primera tarea antes de cualquier otra al momento de diseñar o dimensionar un equipo con el que se pretenda aprovechar la energía solar para generar energía eléctrica.

Si no se dispone de datos de irradiancia solar (por ejemplo, Irradiancia Global Horizontal (GHI)) medidos para una región o sitio, se pueden usar datos estimados por modelos satelitales, como la National Solar Radiation Database de Estados Unidos (NSRDB, 2018), el Copernicus Atmosphere Monitoring Service de radiación solar (CAMS-Rad, 2004), el Land Surface Analysis Satellite Application Facility (LSA-SAF, 2005) o Solcast (2016), empresa que proporciona datos y pronósticos de la irradiancia solar y energía fotovoltaica. Sin embargo, esos modelos tienen desviaciones de los valores reales, por lo que siempre debe analizarse el error que presentan localmente (Yang y Bright, 2020; Salazar et al., 2020; Fernández-Peruchena et al., 2020). Existe un método que permite disminuir el error de los datos estimados por los modelos de las bases de datos satelitales, a través del uso de una serie de datos medidos en el sitio de interés: la Adaptación al Sitio (AaS). Esto permite utilizar los valores estimados (ya adaptados) con un sesgo menor al original, mejorando la situación general (Polo et al., 2020, 2016).



Tradicionalmente, se han utilizado métodos como la regresión lineal o el mapeo de cuantiles para minimizar el sesgo y mejorar el desempeño de estas técnicas en áreas geográficas específicas (Salazar et al., 2021). Sin embargo, estudios recientes sugieren que los modelos de aprendizaje automático ofrecen un enfoque más efectivo para la AaS, superando a las técnicas estadísticas convencionales (Salazar et al., 2024). Dado que los modelos de aprendizaje automático pueden adaptarse mejor al analizar las diferencias en las condiciones en cada localidad, su aplicación en la AaS para la estimación de irradiancia solar tiene un gran potencial. No obstante, la performance de estos modelos depende de las condiciones climáticas en cada sitio, de la orografía, de la calidad de las mediciones de irradiación y de la calidad del modelo satelital usado, lo que hace necesario desarrollar y comparar múltiples algoritmos para identificar la configuración de adaptación más adecuada (Esposito et al., 2024).

En el caso de Perú son pocas las estaciones que disponen de datos medidos de GHI. Por tanto, el presente trabajo evalúa y compara los modelos regresión lineal simple (SLR), múltiple (MLR), el Multilayer Perceptron (MLP) para la adaptación al sitio de datos de GHI provenientes de la base de datos satelital (NSRDB), utilizando registros de dos estaciones radiométricas ubicadas en Cota Cota y Chivay, ambas localizadas en el sur del Perú. El objetivo es analizar el desempeño de los modelos para mejorar la calidad de la información radiométrica en la región.

### METODOLOGÍA

#### Lugar de estudio

Nuestro análisis y estudio se centra en dos estaciones radiométricas, Cota Cota y Chivay, ubicadas en en el departamento de Arequipa, Perú (Figura 1). Las coordenadas geográficas de cada estación se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1: Coordenadas de ubicación de las estaciones radiométricas Cota Cota y Chivay. El signo negativo indica latitud sur y longitud oeste

| Estación  | Latitud(°) | Longitud (°) | Altitud (m.s.n.m) |
|-----------|------------|--------------|-------------------|
| Cota Cota | -15,21     | -71,39       | 4240              |
| Chivay    | -15,64     | -71,60       | 3644              |



Figura 1: Mapa de ubicación de las estaciones radiométricas de Cota Cota y Chivay.



### **Datos medidos**

La GHI se obtuvo a partir de registros proporcionados por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) de los años completos 2021 y 2022, usando un piranómetro de la marca Kipp & Zonen CMP3, con una frecuencia de registro horaria correspondiente a las estaciones de estudio.

### **Datos estimados**

Los datos estimados de GHI provienen del servicio NSRDB, que proporciona la irradiancia solar. La utilizada en este trabajo tiene una resolución espacial de 2 km y una frecuencia temporal de 10 min, y está disponible desde el año 2018. Dicha irradiancia es calculada por el Modelo Físico Solar (PSM) del Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL) (Sengupta et al., 2018). Se empleó este conjunto de datos porque cubre toda Sudamérica, lo que resulta especialmente útil para nuestros lugares de estudio.

### **Preprocesamiento**

Antes de aplicar la adaptación al sitio, convertimos los datos satelitales estimados a escala horaria: promediamos los datos de 10 minutos para poder compararlos con los medidos. Luego, sincronizamos ambas fuentes a la misma zona horaria (GMT-5).

Los datos medidos en tierra de ambas estaciones radiométricas, fueron sometidos a un control de calidad. Se aplicaron los filtros mencionados en (Nollas et al., 2023) como se muestra en las Ecs. (1-3) para eliminar valores atípicos, datos nulos y anomalías instrumentales que puedan presentarse.

$$GHI < 1,5 S E_{SC} (\cos \theta_z)^{1.2} + 100 W/m^2 \quad (1)$$

$$GHI < (6,5331 - 0,065502 \theta_z + 1,8312 \times 10^{-4} \theta_z^2) / (1 + 0,01113 \theta_z) \quad (2)$$

$$K_t < 1,4 \quad (3)$$

donde:

$E_{SC}$  = Irradiancia Solar Total ( $1361 W/m^2$ )

$\theta_z$  = Ángulo cenital solar

$K_t$  = Índice de claridad

### **Adaptación al Sitio**

La AaS es un procedimiento que permite corregir estadísticamente series de irradiancia solar derivadas de bases de datos satelitales (BDS) utilizando como referencia datos medidos en tierra de menor extensión temporal. La corrección se realiza en el periodo de simultaneidad entre ambas series, en el cual se estima una función de calibración que relaciona los valores de GHI medidos en tierra y los estimados por el satélite; minimizando la diferencia entre ellos y generando una serie corregida. Una vez hallada, esta función se aplica al resto de la BDS fuera del periodo de simultaneidad. (Gueymard, 2012; Polo et al., 2016).

A continuación, se describen los modelos utilizados en este artículo para la realización de la AaS en los dos sitios peruanos mencionados:

La SLR asume una relación lineal entre la variable independiente y una dependiente. En este estudio, la variable independiente corresponde a la GHI estimada por la base de datos NSRDB ( $GHI_{NSRDB}$ ), mientras que la variable dependiente, es la GHI medida en las estaciones ( $GHI_{Medido}$ ).

La MLR incorpora más variables predictoras. En nuestro caso, se consideraron la GHI de cielo claro, la temperatura, la humedad relativa, el ángulo cenital solar y el coseno del ángulo cenital solar. Cabe resaltar que estas variables fueron seleccionadas porque reducen el sesgo y la dispersión de los datos.

Las expresiones matemáticas de la SLR y MLR, se presentan en (Salazar et al., 2024). Estos dos modelos lo que hacen es ajustar los datos de NSRDB a los datos medidos en tierra.

El MLP es posiblemente el método más interesante para encontrar una función adaptativa. Se trata de un tipo de red neuronal artificial (RNA) con una estructura feedforward compuesta por capas de entrada, ocultas y de salida, donde las neuronas intermedias aplican funciones de activación no lineales (Rumelhart et al., 1986). El proceso de entrenamiento se realiza mediante aprendizaje supervisado, comparando las salidas generadas por la red con los valores medidos y calculando un error, que se retropropaga a través de la red para ajustar los pesos mediante un algoritmo de optimización (Salazar et al., 2024).

Es importante tener en cuenta que, en SLR y MLR, no requiere etapas de entrenamiento y prueba en el mismo sentido que un MLP, porque su ajuste es analítico y directo. Sin embargo, en esta investigación se tomó el año 2021 para ajuste (Train) y el año 2022 para prueba (Test), no porque sea obligatorio para el modelo, sino para evaluar su capacidad de generalización y comparar con método de aprendizaje automático. Este punto de vista se debe tomar en cuenta al analizar la Tabla 3.

### **Entrenamiento, Validación y Prueba para el MLP**

En el caso del MLP, es indispensable separar los datos en conjuntos de entrenamiento, validación y prueba, ya que el modelo ajusta sus pesos mediante un proceso iterativo de optimización y existe el riesgo de sobreajuste (overfitting). Esto ocurre cuando el modelo se especializa excesivamente en una función de correlación sobre la serie de datos de entrenamiento, logrando métricas muy favorables en dicho periodo, pero mostrando un desempeño deficiente fuera de él. Por ello, resulta fundamental verificar la capacidad de generalización del modelo (Abu-Mostafa, Magdon-Ismael y Lin, 2012).

Durante la etapa de entrenamiento, el objetivo es estimar la función que relaciona los valores de irradiancia medidos y los estimados. Para ello, en este trabajo se utilizaron los datos del año 2021, de los cuales se asignó un 80 % al entrenamiento y un 20 % a la validación, seleccionados de forma aleatoria con el fin de evitar sesgos estacionales. En el entrenamiento, el modelo ajusta sus parámetros para minimizar el error entre los valores observados y estimados, mientras que en la validación se evalúa el desempeño del modelo frente a datos no vistos en el entrenamiento.

Finalmente, para comprobar la verdadera capacidad de generalización y reducir el riesgo de sobreajuste, se implementó una tercera fase: la prueba (Test). En esta etapa se utilizaron los datos del año 2022 en ambas estaciones, completamente independientes de los utilizados en el entrenamiento y validación.

### **Métricas de desempeño**

Para comparar y evaluar los resultados de los modelos se realizó un análisis de sus métricas de desempeño, siguiendo la metodología aplicada en estudios previos (Ledesma et al., 2023; Salazar et al., 2021; Fernández-Peruchena et al., 2020), tal como se muestra en la Tabla 2.

*Tabla 2: Métricas de desempeño*

| <b>Métricas de desempeño utilizadas en este análisis</b> | <b>Ecuación</b>                                                    |
|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Error medio de sesgo (Mean Bias Error)                   | $MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_{est,i} - y_{med,i}$             |
| Error cuadrático medio                                   | $RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_{est,i} - y_{med,i})^2}$ |
| Error medio sesgo porcentual o relativo                  | $rMBE = \frac{MBE}{\bar{y}_{med}} \times 100\%$                    |
| Error cuadrático medio porcentual o relativo             | $rRMSE = \frac{RMSE}{\bar{y}_{med}} \times 100\%$                  |

donde:

$y_{est,i}$  = Valor estimado

$y_{med,i}$  = Valor medido  
 $\bar{y}_{med}$  = Media de los valores medidos

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Resultados de las métricas de desempeño

La Tabla 3 muestra los resultados de la base satelital NSRDB comparada con mediciones de GHI en las dos estaciones de estudio: Cota Cota y Chivay, aplicando tres modelos de ajuste: SLR, MLR y MLP. La comparación se realiza con las métricas RMSE y MBE y sus valores porcentuales respectivamente, tanto para el conjunto de entrenamiento (Train) año 2021, como para el conjunto de prueba (Test) año 2022.

En Cota Cota, el modelo satelital NSRDB presenta un error rRMSE inicial de 20,04 % en entrenamiento y 16,36 % en prueba. Tras la corrección con SLR y MLR, se observa una reducción no tan marcada en rRMSE, tanto en Train como en el Test, con sesgos (rMBE) prácticamente nulos, lo que indica que la corrección lineal logra centrar las estimaciones, pero no mejora la dispersión de los datos. El MLP alcanza un error rRMSE reducido a 19,54 % (Train) y 15,88 % (Test), además de un sesgo mínimo (<0,1 %). En los tres casos la reducción del error es mínimo, esto puede indicarnos que la base NSRDB es buena para este lugar.

En Chivay, se presenta el mismo patrón, aunque con errores absolutos mayores en la estimación satelital inicial (rRMSE de 23,67 % en Train y 21,93 % en Test). Tanto SLR como MLR logran notorias mejoras, con reducciones de aproximadamente 3% en rRMSE y sesgos cercanos a cero. Sin embargo, el MLP ofrece una mejor métrica, alcanzando un rRMSE de 18,73% (Train) y 17,39 % (Test), reduciendo el error de dispersión en más de 4% respecto al NSRDB sin ajuste. Por tanto, de los tres modelos usados para la técnica de adaptación al sitio, el más recomendable para mejorar la GHI estimada por NSRDB en Chivay es el MLP.

Tabla 3: Métricas de desempeño de las estaciones radiométricas Cota Cota y Chivay

| Estación  | Modelo | Etapas | RMSD (W/m <sup>2</sup> ) | MBE (W/m <sup>2</sup> ) | rRMSE (%) | rMBE (%) |
|-----------|--------|--------|--------------------------|-------------------------|-----------|----------|
| Cota Cota | NSRDB  | Train  | 97,28                    | -6,23                   | 20,04     | -1,18    |
|           |        | Test   | 85,76                    | -8,68                   | 16,36     | -1,66    |
|           | SLR    | Train  | 97,26                    | 0,00                    | 19,80     | 0,00     |
|           |        | Test   | 85,40                    | 3,14                    | 16,29     | 0,60     |
|           | MLR    | Train  | 96,15                    | 0,00                    | 19,57     | 0,00     |
|           |        | Test   | 84,17                    | 2,78                    | 16,06     | 0,53     |
|           | MLP    | Train  | 95,09                    | -1,83                   | 19,54     | -0,62    |
|           |        | Test   | 83,43                    | -5,06                   | 15,88     | -0,01    |
| Chivay    | NSRDB  | Train  | 111,83                   | 53,35                   | 23,67     | 11,24    |
|           |        | Test   | 110,59                   | 53,72                   | 21,93     | 10,64    |
|           | SLR    | Train  | 98,03                    | 0,00                    | 20,46     | 0,00     |
|           |        | Test   | 96,66                    | -0,17                   | 19,15     | -0,03    |
|           | MLR    | Train  | 95,70                    | 0,00                    | 19,98     | 0,00     |
|           |        | Test   | 93,66                    | -2,92                   | 18,55     | -0,58    |
|           | MLP    | Train  | 91,13                    | 4,34                    | 18,73     | -0,40    |
|           |        | Test   | 90,05                    | 5,40                    | 17,39     | -0,81    |

### Comparación de los gráficos de dispersión de las estaciones radiométricas Cota Cota y Chivay

Analizadas y observadas las métricas de desempeño se realizó los gráficos de dispersión presentados en las Figuras 2 y 3 que muestran la comparación entre  $GHI_{Medido}$  y los valores estimados por el satélite

( $GHI_{NSRDB}$ ), así como su versión corregida mediante el modelo de Perceptrón Multicapa ( $GHI_{Adaptado-MLP}$ ), para las estaciones radiométricas Cota Cota y Chivay.

En la estación Cota Cota (Figura 2), los datos estimados por el satélite NSRDB (puntos azules) muestran una ligera subestimación en la pendiente de 0,94 y un intercepto 39,5 W/m<sup>2</sup>. Con la adaptación al sitio mediante MLP (puntos naranjas), la pendiente permanece igual y el intercepto baja a 33,2 W/m<sup>2</sup>, reduciendo así el sesgo y mejorando la alineación de los datos respecto a la línea ideal  $y=x$  de color fucsia. Por tanto, el modelo adaptado logra un mejor ajuste a las mediciones reales, aunque todavía se aprecia una ligera subestimación en los valores más altos de radiación.

En la estación Chivay (Figura 3), la comparación muestra que los datos originales de NSRDB (puntos azules) tienden a sobreestimar la  $GHI_{Medido}$ , especialmente en valores bajos, con un intercepto alto de 83,3 W/m<sup>2</sup>. Tras aplicar la adaptación al sitio con MLP (puntos naranjas), la pendiente se mantiene en 0,94 pero el intercepto baja a 27,7 W/m<sup>2</sup>, lo que significa que el sesgo se reduce de forma notable. Por tanto, la nube de puntos adaptada (naranja) se alinea más con la línea  $y=x$  en comparación con la nube original (azul), lo cual evidencia una buena corrección de sesgo.

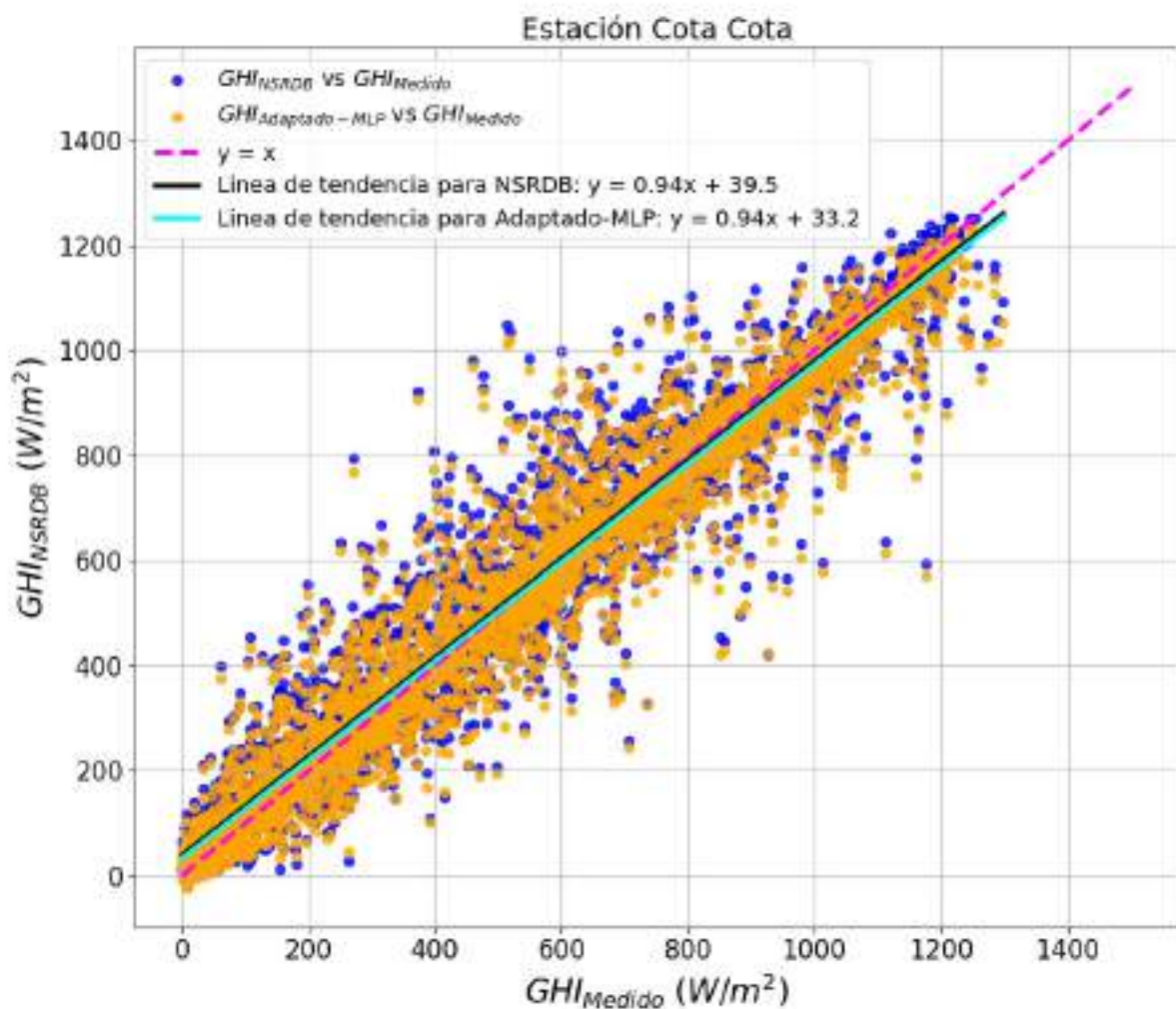


Figura 2: Diagrama de dispersión para la estación Cota Cota entre  $GHI_{NSRDB}$  y  $GHI_{Adaptado-MLP}$  vs  $GHI_{Medido}$ .

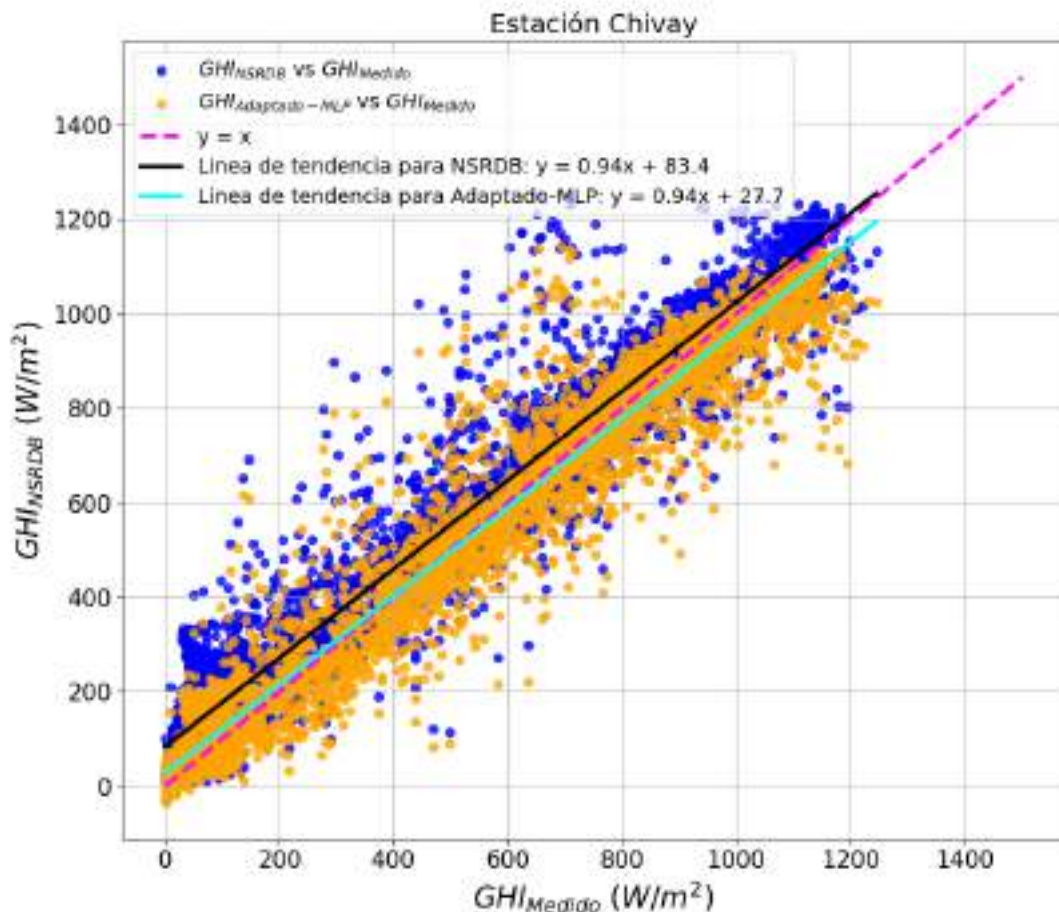


Figura 3: Diagrama de dispersión para la estación Chivay entre  $GHI_{NSRDB}$  y  $GHI_{Adaptado-MLP}$  VS  $GHI_{Medida}$ .

#### **Análisis de la comparación temporal diaria de GHI medido, estimado y ajustado mediante MLP**

En las Figuras 4 y 5 se muestra la evolución diaria de la GHI para diferentes fechas representativas en las estaciones Cota Cota y Chivay durante el año 2022, comparando las mediciones en tierra ( $GHI_{Medido}$ ) con las estimaciones satelitales originales de NSRDB ( $GHI_{NSRDB}$ ) y las series ajustadas mediante perceptrón multicapa ( $GHI_{Ajustado-MLP}$ ). Cabe señalar que no se incluyeron las curvas de ajuste de los modelos SLR y MLR, con el fin de evitar solapamientos y facilitar la visualización de las diferencias.

En Cota Cota (Figura 4), se observa que las curvas estimadas por NSRDB reproducen en general el patrón horario de la irradiancia, pero con una ligera sobreestimación en las horas cercanas al mediodía solar, particularmente en días despejados como el 08 y 09 de junio. En días como el 12 y 13 de noviembre se aprecia una buena adaptación. En fechas con presencia de nubosidad (por ejemplo, 21 y 22 de octubre), se muestra mayor diferencia entre ambas mediciones. El ajuste con el MLP reduce estas diferencias y aproxima la curva estimada a la medida.

En Chivay (Figura 5), las diferencias iniciales entre  $GHI_{NSRDB}$  y  $GHI_{Medido}$  son más pronunciadas, especialmente en días con alta nubosidad (03 y 05 de enero), donde las estimaciones satelitales tienden a sobrestimar significativamente en las primeras horas y subestimar en las últimas. El MLP atenúa estas diferencias, aunque persisten ligeras diferencias en días parcialmente nublados, como el 12 y el 13 de noviembre. En días como el 20 y 21 de octubre, se logra un ajuste muy cercano entre  $GHI_{Medido}$  y  $GHI_{Ajustado-MLP}$  a lo largo de casi todo el ciclo diario.

En conclusión, el análisis visual confirma que el MLP no solo reduce el sesgo medio, sino que mejora la representación de la forma de la curva diaria de GHI, especialmente en días con presencia de nubosidad; debido a que aprende patrones específicos del sitio.

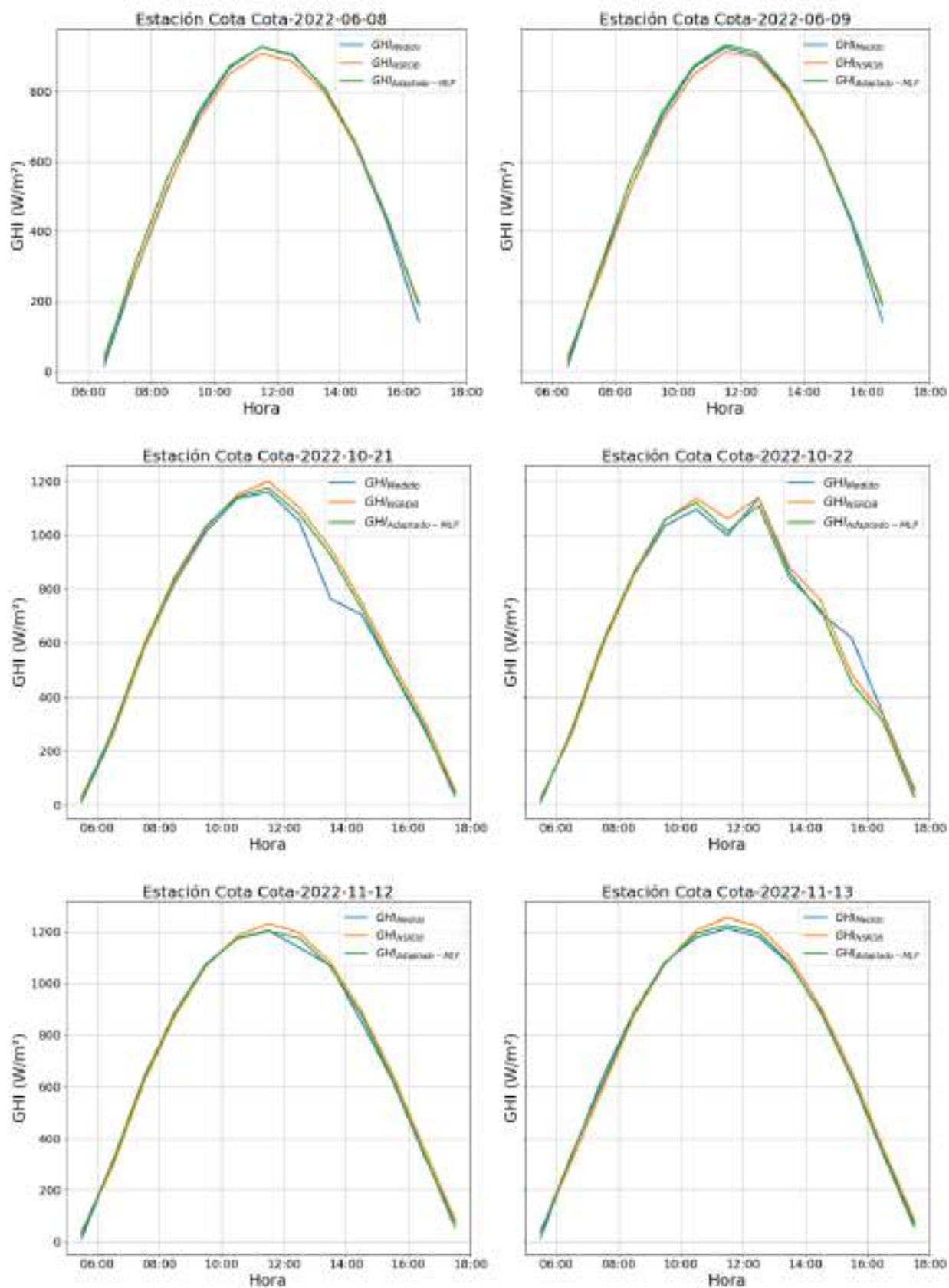


Figura 4: Representación de la evolución diaria de la GHI de la estación Cota Cota para 6 días del año 2022.



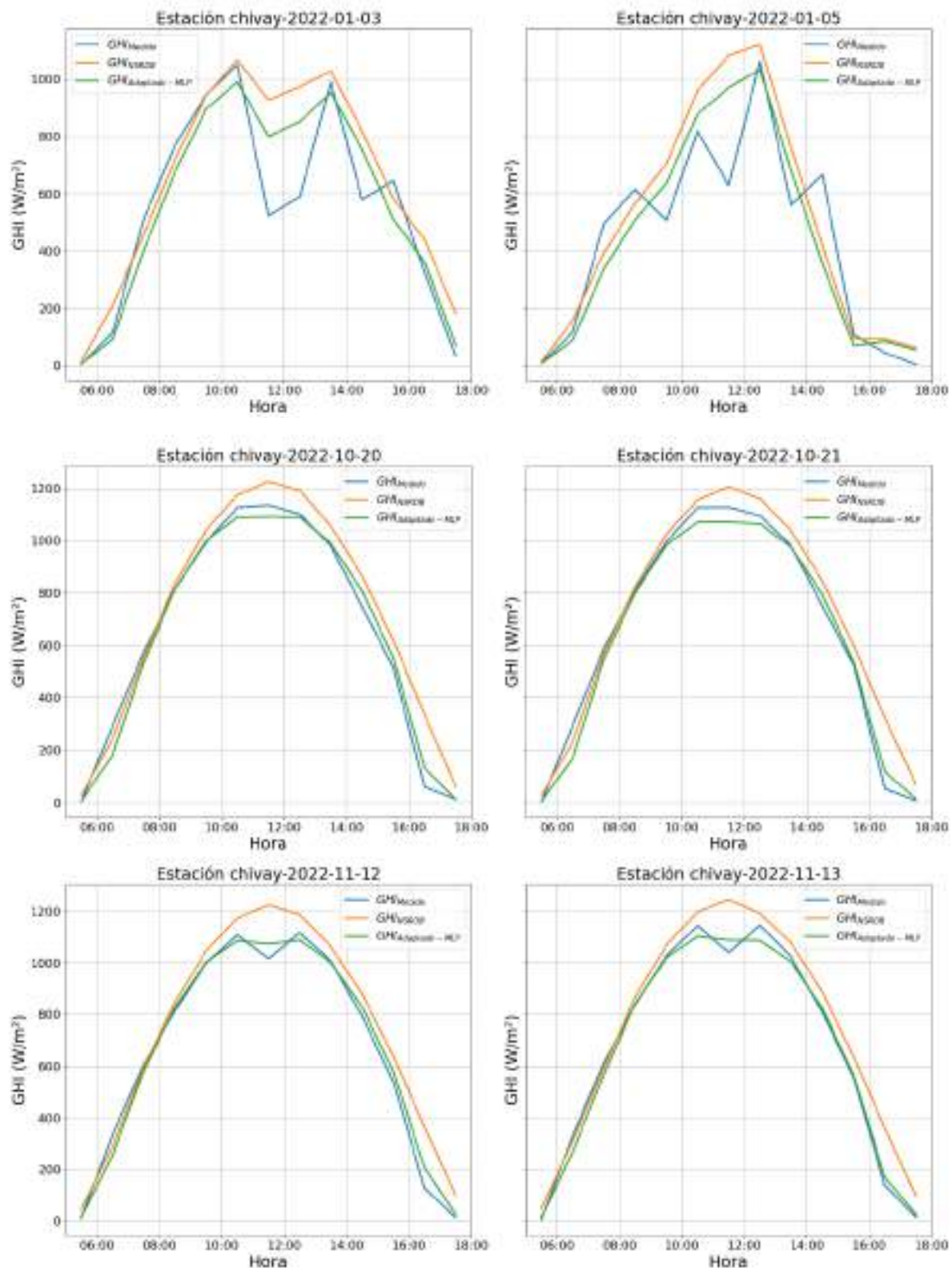


Figura 5: Representación de la evolución diaria de la GHI de la estación Chivay para 6 días del año 2022.



## CONCLUSIONES

Los resultados muestran que la AaS puede mejorar las métricas entre los valores de GHI medidos y adaptados. Particularmente, para los datos analizados de las dos estaciones, tanto SLR como MLR mostraron corrección del sesgo ( $rMBE \approx 0$ ) sin disminuciones en el rRMSE. El MLP mostró una corrección similar en el sesgo y una corrección en el rRMSE, de 0,5% en Cota Cota y de 4% en Chivay.

En el caso de Cota Cota, los resultados podrían indicar que la base satelital NSRDB ya presenta una buena correlación con los datos medidos, por lo que no es posible una mejora significativa (reducción del error) en los valores adaptados referidos a esta estación.

En el caso de Chivay, los modelos reducen todos el rRMSE, destacándose el MLP, que lo hace hasta un 4%, respecto al valor original del NSRDB. Esta diferencia hace razonable el uso de esta metodología para mejorar las estadísticas a largo plazo de la base de datos NSRDB adaptada para esta estación.

Este análisis muestra que la base de datos NSRDB puede ser confiable para la realización de cálculos previos de dimensionamiento de sistemas solares. También muestra que las metodologías utilizadas pueden servir para mejorar la precisión de datos locales obtenidos de bases satelitales, usando la metodología de la AaS. Sin embargo, esta es una línea de investigación que aún debe ser profundamente estudiada, mediante el análisis de bases de datos de radiación solar medidos en la región de interés.

## FUENTES DE FINANCIAMIENTO

CONCYTEC subvencionó este trabajo a través del Programa PROCIENCIA en el marco del concurso «Becas en programas de doctorado educativo a través de alianzas interinstitucionales», según contrato PE501090126-2024, y del Concurso de Alianzas Interinstitucionales para Programas de Doctorado correspondientes a la UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA, según contrato PE501084296-2023- PROCIENCIA-BM.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), por la provisión de los datos de GHI de las estaciones Cota Cota y Chivay, porque sin ellos no hubiera sido posible realizar este análisis.

## REFERENCIAS

- Abu-Mostafa, Y., Magdon-Ismael, M., y Lin, H. (2012). Learning from data. 1ª edición. pp, 119-151. AMLBook, USA.
- CAMS Rad [en línea] Copernicus Atmosphere Monitoring Service - solar radiation. Dirección URL:<<https://atmosphere.copernicus.eu/solar-radiation-supplementary-products> [consulta: julio de 2025]
- Esposito, E., Leanza, G., y Di Francia, G. (2024). Comparative analysis of ground-based solar irradiance measurements and Copernicus satellite observations. *Energies*, 17(7), 1579. <https://doi.org/10.3390/en17071579>.
- Fernández-Peruchena, C. M., Polo, J., Martín, L., y Mazorra, L. (2020). Site-adaptation of modeled solar radiation data: The SiteAdapt procedure. *Remote Sensing*, 12(13). <https://doi.org/10.3390/rs12132127>
- Gueymard, C. A. (2012). Clear-sky irradiance predictions for solar resource mapping and large-scale applications: Improved validation methodology and detailed performance analysis of 18 broadband radiative models. In *Solar Energy* (Vol. 86, Issue 8, pp. 2145–2169). <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.11.011>
- Ledesma, R., Alonso-Suárez, R., Monetta, A., Laguarda, A., Vilela, O., & Salazar, G. (2023). Evaluación en Uruguay del producto DSR GOES-16 de irradiancia solar global horizontal. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente (AVERMA)*

- LSA-SAF [en línea] Land Surface Analysis Satellite Application Facility. Dirección URL:< <https://lsa-saf.eumetsat.int/en/s>> [consulta: julio de 2025]
- Nollas, F. M., Salazar, G. A., & Gueymard, C. A. (2023). Quality control procedure for 1-minute pyranometric measurements of global and shadowband-based diffuse solar irradiance. *Renewable Energy*, 202, 40–55. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.11.056>
- NSRDB [en línea] National Solar Radiation Database. Dirección URL: < <https://nsrdb.nrel.gov/> > [consulta: mayo de 2025]
- Polo J, Wilbert S, Ruiz-Arias JA, Meyer R, Gueymard C, Súrri M, et al. Preliminary survey on site adaptation techniques for satellite-derived and reanalysis solar radiation datasets. *Solar Energy* (2016); 132:25–37. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.03.001>
- Polo, J., Fernández-Peruchena, C. M., Vindel, J. M., González, J. A., & Gueymard, C. A. (2020). Benchmarking on improvement and site-adaptation techniques for modeled solar radiation datasets. *Solar Energy*, 201, 469–479. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.03.040>
- Rumelhart, D. E., Hinton, G. E., & Williams, R. J. (1986). Learning representations by back-propagating errors. *nature*, 323(6088), 533-536.
- Salazar, G., Ledesma, R. D., Ruiz, C. L., y De Castro Vilela, O. (2024). Análisis de desempeño de diferentes técnicas de aprendizaje automático en una adaptación al sitio de irradiancia solar global para Salta (Argentina). *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente (AVERMA)*.
- Salazar, G., Gueymard, C., Galdino, J. B., de Castro Vilela, O., & Fraidenraich, N. (2020). Solar irradiance time series derived from high-quality measurements, satellite-based models, and reanalyses at a near-equatorial site in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 117, 109478. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109478>.
- Salazar, G., Alonso Suárez, R., Laguarda Cirigliano, A., Ledesma, R. D. (2021). Evaluación del proceso de adaptación al sitio aplicado a la irradiancia solar global medida en la ciudad de Salta, Argentina. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente (AVERMA)*.
- Solcast [en línea] empresa que proporciona datos y pronósticos de la irradiancia solar y energía fotovoltaica. Dirección URL:< <https://solcast.com/>> [consulta: julio de 2025]
- Sengupta, M., Xie, Y., Lopez, A., Habte, A., Maclaurin, G., y Shelby, J. (2018). The National Solar Radiation Data Base (NSRDB). In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 89, pp. 51–60). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.003>
- Yang, D., y Bright, J. M. (2020). Worldwide validation of 8 satellite-derived and reanalysis solar radiation products: A preliminary evaluation and overall metrics for hourly data over 27 years. *Solar Energy*, 210, 3–19. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.04.06>

## **SITE ADAPTATION OF GLOBAL SOLAR IRRADIANCE USING MACHINE LEARNING. CASE STUDY: COTA COTA AND CHIVAY (PERU)**

**ABSTRACT;** In this study, we applied the Site Adaptation (AaS) technique to improve the estimation of global horizontal irradiance (GHI) from the National Solar Radiation Database (NSRDB) at two radiometric stations in southern Peru (Cota Cota and Chivay) for the years 2021 and 2022, with hourly temporal frequency. Different adaptive functions were evaluated using statistical models, such as Simple Linear Regression (SLR), Multiple Linear Regression (MLR), and a machine learning model (Multilayer Perceptron, MLP). The metrics used to evaluate the performance of these functions were the mean bias error (rMBE) and the mean square error (rRMSE) in percentage terms, as well as their absolute versions. The results show that SLR and MLR correct the bias ( $rMBE \approx 0$ ), but not the deviations from the estimates (rRMSE), while MLP reduces it by approximately 4% in Chivay and by almost 0.5% in Cota Cota. This minimal difference for Cota Cota could be due to the fact that the NSRDB satellite database has a good correlation with the measured data, which was not the case in Chivay.

**Keywords:** Global solar irradiance, site adaptation, machine learning, Peru.

## MODELIZACION DE LA INCIDENCIA DE LA FORESTACIÓN SOBRE LA DISPONIBILIDAD DE RADIACIÓN SOLAR EN CAÑONES URBANOS DE BAJA DENSIDAD. CASO DE LA CIUDAD DE MENDOZA

**Cecilia G. Loncharich<sup>1</sup>, Claudia F. Martinez<sup>1,2</sup>, Erica N. Correa<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. (INAHE-CONICET-CCT Mendoza). C.P. 5500 – Mendoza, Argentina.

<sup>2</sup>Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo. C.P.: 5500, Mendoza, Argentina

Tel. 0261-5244346 e-mail: [cloncharich@mendoza-conicet.gob.ar](mailto:cloncharich@mendoza-conicet.gob.ar)

**RESUMEN:** La ciudad de Mendoza se caracteriza por una intensa forestación utilizada para el acondicionamiento bioclimático de los cañones urbanos durante las horas de sol, respondiendo al modelo de “ciudad oasis”. En esta metrópoli es clave identificar en qué medida el dosel forestal afecta los intercambios radiativos de energía, tomando en consideración que el 80% del sector residencial del área metropolitana está representado por baja densidad edilicia. El trabajo presenta los primeros resultados de una investigación orientada a simular la distribución de la radiación solar en las distintas fachadas que componen el cañón urbano tomando en cuenta la influencia de la morfología, la tecnología urbano-edilicia y su combinación con distintas especies forestales. Se utilizó el software Rhino y la interfaz de programación visual Grasshopper con tres complementos principales Ladybug, Honeybee y Lands Design. La contrastación de los primeros resultados obtenidos mediante simulación y su vinculación con los datos monitoreados a campo, muestra un buen nivel de ajuste, con un error relativo que oscila entre +/- (2 a 25) % cuando se comparan datos simulados y medido. Esto muestra una performance aceptable del modelo, considerando la complejidad asociada a la modelización de las distintas especies y su combinación con la volumetría urbana.

**Palabras clave:** radiación solar, cañones urbanos, forestación urbana, baja densidad edilicia, modelos de simulación.

### INTRODUCCIÓN

En los entornos urbanos, los árboles proporcionan numerosos servicios ecosistémicos, muchos de los cuales pueden aprovecharse para gestionar el consumo y la disponibilidad de energía de los edificios residenciales. Existe en la bibliografía internacional referencias respecto de su potencial para proporcionar sombra, ayudar al acondicionamiento del espacio (Speak A. et al., 2020) y reducir las temperaturas del aire urbano (Tan, Z. et al., 2016). Está demostrado que influyen en la demanda de consumo energético doméstico, y en el suministro de energía a través de incidencia en las posibilidades de calefacción solar pasiva y la generación de energía renovable a partir del aprovechamiento del recurso solar (Staley D. C., 2015; Liu, H. et al., 2023).

En ciudades de zonas áridas, la fuerte presión antrópica asociada a la urbanización ha repercutido principalmente sobre la sustentabilidad de dos recursos básicos para su gestión y uso, como son: el agua y la energía. En estas ciudades, la ventaja de utilizar energía solar como recurso energético, frente a otras fuentes como la biomasa, la energía hidroeléctrica o la energía nuclear, radica en que no precisa agua y, por tanto, elimina las preocupaciones ambientales relativas al incremento de su consumo y los consiguientes problemas de escasez. (Noorollahi, Y. et al., 2021).



De modo particular, en la ciudad de Mendoza, seleccionada como caso de estudio, una intensa forestación ha sido utilizada para el acondicionamiento bioclimático de los cañones urbanos durante las horas de sol, respondiendo al concepto de “ciudad oasis”. Por lo tanto resulta fundamental en el ámbito de esta metrópoli, establecer en qué medida el dosel forestal afecta los intercambios de energía de tipo radiativo, tomando en consideración que el 80% del sector residencial del área metropolitana está representado por baja densidad edilicia cuya altura oscila entre uno y dos niveles (3 a 6 m), la cual se encuentra flanqueada por un arbolado en alineación cuya altura preponderante corresponde a especies de primera y segunda magnitud (15 a 25 m), plantados a una distancia de 3 a 5 m de la línea de edificación (Martínez et al., 2014). Sumado, la orientación preponderante de la trama de la ciudad es O-E, por lo que el resultado de la combinación entre las edificaciones, la forestación y el recorrido solar tiene un impacto significativo en la disponibilidad de radiación solar en techos y fachadas, tanto para su aprovechamiento en calefacción e iluminación de los espacios, como su disponibilidad para la captación solar en paneles fotovoltaicos o sistemas solares térmicos (Fogl y Moudrý, 2016). Por lo tanto, cuantificar la influencia de los árboles en la radiación solar interceptada por los edificios es un aspecto importante para comprender las complejas interrelaciones entre la forma urbana y las condiciones ambientales (Freitas, S. et al., 2015). Los resultados de la literatura consultada indican que los árboles reducen por término medio el 38% de la radiación solar total recibida por los tejados de los edificios residenciales. Además, se encontraron fuertes correlaciones entre las medidas de la estructura de los árboles (altura media, variabilidad de la altura de los árboles y volumen normalizado de los árboles) y la radiación directa interceptada en verano, mientras que las relaciones con la radiación difusa fueron consistentes durante todo el año. Por último, un examen de la relación horaria entre los atributos estructurales de los árboles y las estimaciones de radiación interceptada permite informar a los planificadores los impactos acumulativos de los árboles en las iniciativas de gestión de la energía en las ciudades (Tooke, T. et al., 2011).

La forma tridimensional urbana y su relación con las características morfológicas del arbolado en alineación de calles es un factor determinante de las condiciones ambientales dinámicas de las ciudades. Es por ello por lo que se requiere información estructural detallada de los edificios y la vegetación, combinada con observaciones micrometeorológicas, para modelar con precisión las interacciones espaciales y temporales con la radiación solar (Hofierka y Kanuk, 2009, Wiginton et al., 2010). A partir de la información resultante de esta combinación es posible desarrollar información precisa sobre el microclima urbano y su potencial para el aprovechamiento de la energía solar en un entorno determinado.

La evaluación del recurso solar bajo estos considerandos implica la necesidad de adaptar distintas herramientas de simulación de la realidad local y/o desarrollar nuevas si fuera necesario para la estimación del potencial solar en entornos urbanos (Martín Ávila et. al., 2015). En este marco, la presente investigación describe el desarrollo de un protocolo de mediciones a campo, que se desarrolla en áreas urbanas y tiene por objetivo establecer un modelo empírico que posibilite cuantificar la incidencia de distintas especies forestales de uso urbano sobre la disponibilidad de radiación, en los paramentos horizontales y verticales que componen los cañones urbanos. Posteriormente este modelo de evaluación empírica será utilizado para evaluar la aptitud de distintos modelos de estimación de la radiación solar para representar adecuadamente la condición radiativa real del espacio.

## **METODOLOGÍA**

La investigación se estructura en las siguientes etapas: 1. Selección de casos de estudio. 2. Monitoreo a campo. 3. Confección de la maqueta virtual. 4. Armado del modelo y simulación de los casos de estudio.

### ***Criterios de selección de casos***

Se seleccionaron cuatro cañones urbanos ubicados en la ciudad de Mendoza, según los siguientes criterios:

- Mismo ancho desde línea municipal a línea municipal (20m)
- Orientación del cañón urbano, Oeste-Este
- Presencia de homogeneidad de especie forestal en el frente de la vivienda, como así también en la vereda opuesta.

- Densidad edilicia: baja (menor a 2m<sup>3</sup> por m<sup>2</sup>)

La selección del ancho del cañón urbano responde a que el 75% de éstos en la ciudad de Mendoza tienen esta medida (Ruiz et. al.,2015). La selección de la orientación Oeste-Este se debe a la importancia de la ganancia solar en este caso, y que resulta superior a la de los cañones urbanos Norte-Sur. Investigar en sectores de baja densidad constructiva se justifica porque ésta es representativa del 80% del parque edilicio de la ciudad.

Considerando el Censo de Arbolado de la Provincia del año 2022 (<https://miarbol.gov.ar>) las especies seleccionadas son: *Platanus hispánica* (plátano), *Morus alba* (morera) *Fraxinus excelsior* (fresno europeo), *Paracenegalia visco* (acacia visco). Esta selección se fundamenta en la alta representatividad de estas especies dentro del total que componen el arbolado en alineación de la ciudad de Mendoza. La especie *Paracenegalia visco* (acacia visco) además se seleccionó por ser una especie nativa con menor requerimiento hídrico respecto de las otras. La sumatoria de las cuatro especies seleccionadas es representativa del 64% del total de ejemplares implantados. La Figura 1 muestra los cañones urbanos de 20m de ancho monitoreados -, su caracterización forestal y se presenta la localización de cada uno.

| Especie Forestal | <i>Platanus hispánica</i><br>“plátano”                                             | <i>Morus alba</i><br>“morera”                                                      | <i>Fraxinus excelsior</i><br>“fresno europeo”                                       | <i>Paracenegalia visco</i><br>“acacia visco”                                         |
|------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Imagen           |  |  |  |  |
| Caso             | <i>Roca 364</i>                                                                    | <i>- Agustín Álvarez 858</i>                                                       | <i>J. de Dios Videla 884</i>                                                        | <i>Martín Zapata 50</i>                                                              |
| Entre calles     | Martínez de Rosas y Olascoaga                                                      | Boulogne Sur Mer y Paso de Los Andes                                               | Boulogne Sur Mer y Huarpes                                                          | Boulogne Sur Mer y Tiburcio Benegas                                                  |

Figura 1: Casos de estudio evaluados y su caracterización forestal.

### Monitoreo a campo

La elaboración del protocolo de medición tuvo en cuenta la trayectoria del recorrido solar, durante la estación estival (cerca del solsticio de verano), la selección del día de medición coincidió con condiciones atmosféricas estables, es decir, día con condiciones de cielo claro, despejado sin nubosidad. Se tomaron mediciones cada 3 horas. El ciclo de mediciones comenzó el 27 de diciembre de 2024 y finalizó el 20 de febrero de 2025. Este trabajo muestra los resultados obtenidos el día 20 de febrero de 2025, en el caso situado en calle Roca N°364 de la ciudad de Mendoza. Las variables medidas se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1: rango horario y variables de medición

| Rango horario | Variables medidas                                                                                                                                |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 9:00          | Temperatura del aire                                                                                                                             |
| 12:00         | Radiación solar hemisférica global, sobre plano vertical y sobre plano horizontal                                                                |
| 15:00         |                                                                                                                                                  |
| 18:00         | Albedo plano vertical y plano horizontal a 1.30m de altura.<br>Sky View Factor (toma de imágenes hemisféricas) sobre plano vertical y horizontal |

### **Equipamiento utilizado:**

Torres de medición: Se diseñaron y construyeron dos torres de medición destinadas a registrar la radiación global incidente en plano vertical. Dichas torres sostienen, cada una, dos sensores de radiación solar del tipo Onset S-LIB-M003 Solar Radiation (Silicon Pyranometer), con una incertidumbre de 3% informada por fabricante, los cuales se ubicaron a una altura de 1.30 y 2.30 m en posición vertical. Junto con los sensores, se incorporó también un datalogger tipo Onset HOBO H21-USB Micro Station para el almacenamiento de la información (Figura 2 y 3).

En cada lugar de medición, se ubicaron las torres sobre la vereda colindante a la fachada de exposición Norte frente a cada árbol consecutivo y separadas una distancia correspondiente al intervalo de plantación de las especies forestales, respetando la misma posición en cada uno de los casos (Figura 4).

Simultáneamente con la toma de datos de radiación en el plano vertical, mediante albedómetro tipo Kipp y Zonen CMP 3, se registró la radiación global hemisférica incidente en plano horizontal y los valores de albedo a 1.30m de altura en tres localizaciones: centro del cañón urbano y al lado de cada una de las torres. Esto se realiza con el objeto de caracterizar cada uno de los entornos analizados. El albedómetro tiene una incertidumbre combinada declarada por el ente de calibración de 1.5%.

Las mediciones se realizan en forma itinerante registrando la radiación solar global hemisférica horizontal cada 20 segundos durante un minuto (3 registros por punto de medición). Se considera un lapso de espera de 2 minutos entre cada medición a fin de que el instrumento se estabilice a la condición del sitio. Este procedimiento se realiza dos veces por cada sitio de medición.

Para la evaluación visual de la incidencia del forestal sobre ambos planos -vertical y horizontal-, y la determinación del grado de enmascaramiento, para cada horario de medición se tomaron imágenes hemisféricas con cámara de ojo de pez, marca Nikon Colpic. Ver Figura 5.

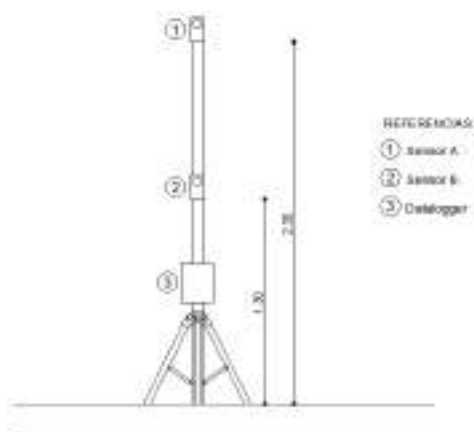


Figura 2: Croquis de torre de medición construida. Figura 3: Ubicación de las torres de medición.

### **Procedimiento de medición:**

Se registró el horario de llegada y se colocaron las torres de medición sobre la fachada elegida, respetando la ubicación presentada en el croquis de la Figura 2. Los solarímetros colocados en las torres registran el dato de radiación solar global en superficie vertical cada 20 segundos y permanecen operativas todo el tiempo que dura la medición.

Se procedió a tomar tres imágenes con la cámara fotográfica de ojo de pez: una en el centro de la calzada con orientación vertical (para tomar la amplitud de bóveda celeste), y las otras dos contiguas a cada torre de medición con orientación vertical (para tomar la amplitud del cañón urbano). Esta disposición se muestra en la Figura 3.





*Figura 4: Puntos azules numerados como 1,2 y 3 indica la toma de imágenes hemisféricas y los puntos de ubicación del solarímetro.*



*Figura 5. Imágenes hemisféricas, Caso plátanos, hora 12:00PM. Calle Roca*

Posteriormente, se efectuaron mediciones de radiación hemisférica global horizontal utilizando un solarímetro (albedómetro), así como la evaluación del albedo correspondiente en cada entorno. Estas mediciones se realizaron en los tres puntos previamente identificados para la toma de imágenes hemisféricas: uno en el centro de la calzada y dos junto a cada torre de medición. Cada registro tuvo una duración de un minuto por punto. Como medida de seguridad, se estableció un tiempo de espera de 2 minutos entre cada registro para asegurar que el sensor se estabilice a la nueva condición de medición.

#### ***Criterios de transcripción de datos. Escalado de las imágenes para la construcción de la maqueta virtual.***

El procedimiento metodológico parte de dos insumos fundamentales: la medición de radiación solar in situ y el relevamiento arquitectónico y forestal del área de estudio. Estos datos son incorporados al entorno de modelado tridimensional en Rhinoceros (Rhino), donde se desarrolla una representación detallada del espacio urbano bajo análisis.

Como primer paso, se procedió a representar el trazado urbano de la zona en estudio en planta, para poder extruir la volumetría del mismo, utilizando planos catastrales. A continuación, se escaló y relevó la posición de cada uno de los puntos de medición, para luego utilizar las cotas de los mismos y extraer valores de radiación en cada uno de ellos (Figura 6).



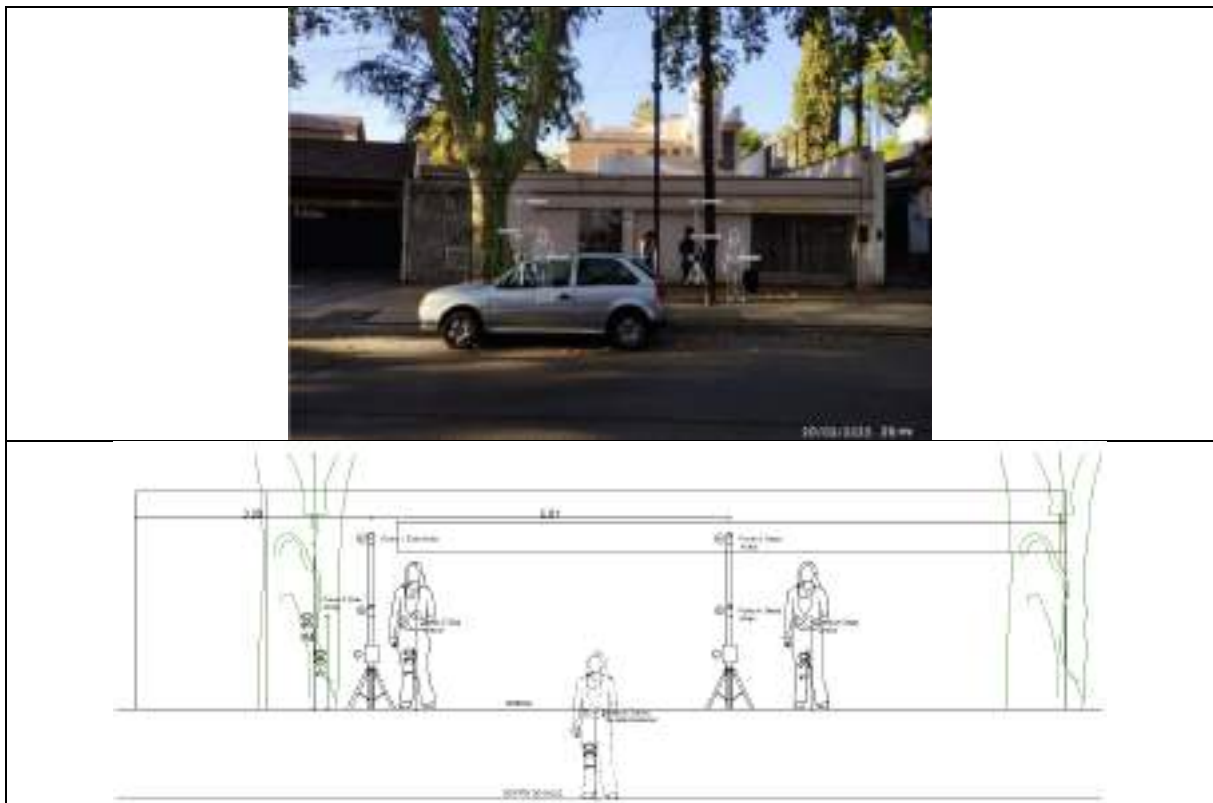


*Figura 6: Detalle de puntos de medición y escalado de la imagen*

#### ***Armado del modelo y simulación de los casos de estudio.***

Como próximo paso, se realizó la representación de la información recopilada en el programa de modelado Rhinoceros 8 (Rhino), ver Figura 7, utilizando tanto la vista en planta como la volumétrica para desarrollar geometrías adaptativas que simulan la incidencia del sol en diferentes configuraciones superficiales. Esto facilita la identificación de áreas con mayor y menor aprovechamiento del potencial solar. Luego, se creó la conexión con la interfaz de Grasshopper mediante el uso de los programas de diseño ambiental Ladybug, Honeybee y Lands Design.

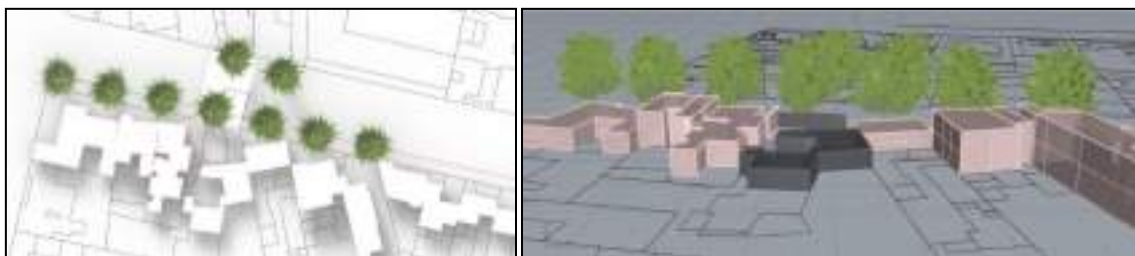
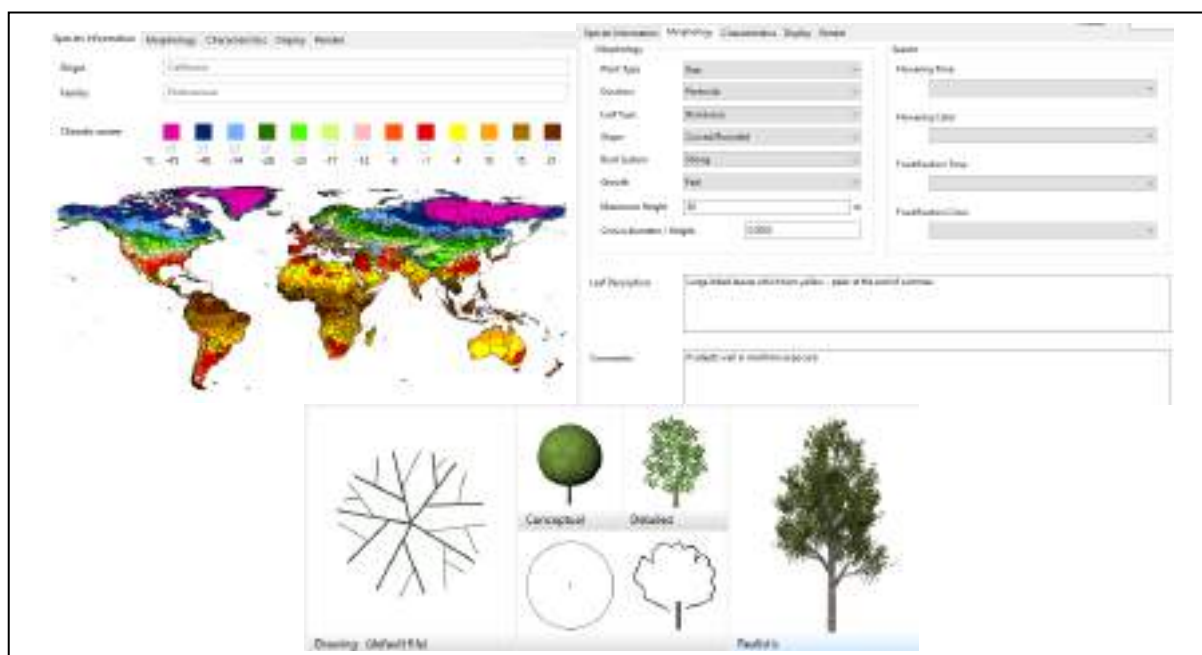
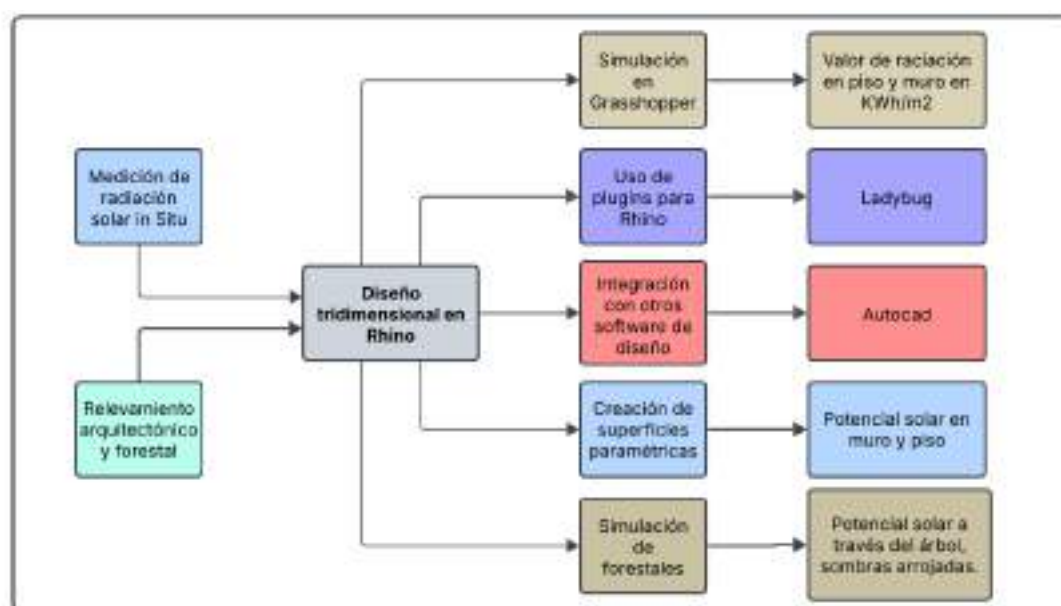


*Figura 7: Volumetría resultante de elevación de planimetría*

Con el modelo creado, se inician varias líneas de trabajo complementarias, incluyendo la integración de herramientas climáticas mediante un archivo epw obtenido de Climate One Building (2009-2023) en la ciudad de Mendoza, lo que permite la geolocalización de la maqueta virtual. En el siguiente paso, se añaden elementos de vegetación al modelo, analizando el impacto de las sombras generadas por los árboles urbanos sobre las estructuras construidas, con el plugin Lands Design, el cual permite agregar las características, medidas y especificaciones técnicas del forestal (Figura 8).



Esta fase permite calcular la radiación solar incidente sobre plano vertical y horizontal teniendo en cuenta la influencia del follaje. Este proceso de trabajo se resume en la Figura 9.



Como resultado de la simulación, se obtuvo el comportamiento de la radiación solar incidente sobre muros y pisos, permitiendo obtener valores expresados en kWh/m<sup>2</sup>, tal cual puede observarse en la Figura 10.



## RESULTADOS

Para el análisis y contrastación de los resultados obtenidos, se confecciona la Tabla 2. Por ser este un informe de avance de la investigación en marcha, se presentan los resultados de las mediciones del cañón urbano con *Plátanus hispanica*, contrastados con los resultados obtenidos de la simulación en dicho cañón urbano, a las 12:00 hs. PM del día de monitoreo referenciado. Se indica radiación incidente en  $W/m^2$ , para el plano horizontal en el centro del cañón urbano y para el plano vertical a una altura de 1.30 m. Además, y con el objeto de inferir la acción de las distintas especies forestales bajo análisis, y su influencia sobre la radiación incidente, se simulan las otras tres especies analizadas, sobre el mismo cañón urbano, y el comportamiento de la radiación incidente en ambos planos –vertical y horizontal– para el caso analizado sin forestales.

Para la evaluación, además, se utilizan dos indicadores: Porcentaje de bloqueo (Ec. 1) y Error relativo porcentual (Ec. 2). El primero permite inferir la acción del forestal sobre la disponibilidad solar de los planos analizados contrastando el caso con forestal versus el cañón urbano sin forestal. El segundo permite evaluar cuánto se aleja la predicción del dato simulado de radiación, versus el dato medido (Ec. 1 y Ec. 2).

$$\text{Porcentaje de bloqueo: } PB = 100 - (Vs/Vt) * 100 \quad (1)$$

$$\text{Error relativo porcentual: } E\% = (Vm - Vs)/Vm \quad (2)$$

*Tabla 2: Radiación incidente en el plano vertical y horizontal del cañón urbano forestado con plátanos vs datos simulados en 5 escenarios; plátanos, sin forestal, moreras, fresnos y acacias. 12 PM 20/02/2025*

|        |       | Hora de Medición | PLÁTANO              |                | CANAL SIN ÁRBOLES          | MORERA         |                                             | FRESNO         |                                             | ACACIA         |                                             |
|--------|-------|------------------|----------------------|----------------|----------------------------|----------------|---------------------------------------------|----------------|---------------------------------------------|----------------|---------------------------------------------|
|        |       |                  | Valor Medido         | Valor Simulado | Simulado de referencia (T) | Valor Simulado | Porcentaje de bloqueo: $PB=100-(Vs/Vt)*100$ | Valor Simulado | Porcentaje de bloqueo: $PB=100-(Vs/Vt)*100$ | Valor Simulado | Porcentaje de bloqueo: $PB=100-(Vs/Vt)*100$ |
|        |       |                  | Radiación en $W/m^2$ |                |                            |                |                                             |                |                                             |                |                                             |
| ESTE   | MURO  | 12:06            | 28,8                 | 22,5           | 96,43                      | 12,03          | 87,52                                       | 9,22           | 90,44                                       | 10,25          | 89,37                                       |
| OESTE  | MURO  | 12:05            | 30,04                | 31,94          | 93,43                      | 86,87          | 7,02                                        | 87,99          | 5,82                                        | 86,87          | 7,02                                        |
| CENTRO | CALLE | 12:02            | 49,56                | 51,15          | 94,78                      | 73,58          | 22,37                                       | 93,82          | 1,01                                        | 74,09          | 21,83                                       |

Los resultados de la Tabla 2 muestran los valores promedio de las mediciones de radiación solar realizadas en cada punto, versus los valores obtenidos en esos puntos, a partir del modelo simulado, tanto para el caso monitoreado (considerado caso base), como para un conjunto de tres escenarios simulados sobre el caso base, el cañón urbano sin árboles, el cañón urbano con: moreras, fresnos y acacias.

*Tabla 3: Datos de Radiación incidente en el plano vertical y horizontal del cañón urbano forestado con plátanos corregidos por desviación st. e incertidumbre del instrumental.*

|        |       | Hora de Medición | PLÁTANO             |                | Incertidumbre medición % | Rango de Medida (W/m2) |
|--------|-------|------------------|---------------------|----------------|--------------------------|------------------------|
|        |       |                  | Valor Medido (W/m2) | Desviación st. |                          |                        |
| ESTE   | MURO  | 12:06            | 28,8                | + / - 0,28     | 3,00                     | 27,66-29,95            |
| OESTE  | MURO  | 12:05            | 30,04               | + / - 0,27     | 3,00                     | 28,88-31,22            |
| CENTRO | CALLE | 12:02            | 49,56               | + / - 0,47     | 1,50                     | 48,35-50,78            |

La Tabla 3 muestra los valores promedio de las 6 mediciones de radiación en cada punto, corregida por su desviación st. y la incertidumbre del instrumento, los resultados muestran que la medida promediada en el muro este se desvía +/- 1.15 W/m2, la del muro oeste, +/-1,17 W/m2 y la del centro +/- 1.23 W/m2.

Tabla 4: Error relativo, entre el valor simulado y el valor medido en cada caso, tomando como cierto el valor medido

|        |       | Hora de medición | PLÁTANO         |          | Error porcentual                         | Porcentaje de bloqueo             |
|--------|-------|------------------|-----------------|----------|------------------------------------------|-----------------------------------|
|        |       |                  | Medido Promedio | Simulado | $E\% = \frac{V_m - V_s}{V_m} \times 100$ | $PB = 100 - (V_s/V_m) \times 100$ |
|        |       |                  | $W/m^2$         |          | $V_m$                                    |                                   |
| ESTE   | MURO  | 12:06            | 28,8 +/- 1,15   | 22,5     | 18-25 %                                  | 76,67                             |
| OESTE  | MURO  | 12:05            | 30,04 +/- 1,17  | 31,94    | +/- 4%                                   | 65,81                             |
| CENTRO | CALLE | 12:02            | 49,56 +/- 1,23  | 51,15    | +/- 2,4 %                                | 46,03                             |

Tomando estas desviaciones de la medición en cuenta y contrastando con los valores simulados, de la observación de la Tabla 4 se puede inferir un buen ajuste entre los datos que arroja el simulador y los datos medidos, siendo su error relativo entre +/- (2.4 a 4) %, mientras que la predicción es más pobre para el caso del muro norte al este, donde el error relativo se encuentra entre 18 a 25%. Sin embargo, para ser una primera aproximación, se considera que el modelo utilizado ofrece un ajuste aceptable considerando la complejidad de la morfología del forestal en la ciudad, que se encuentra afectada por el manejo de poda a lo largo del año, tanto a cargo del municipio como de empresas prestadoras de servicios (electricidad, telefonía e, internet). Cuando analizamos el porcentaje de bloqueo del forestal sobre la distribución de la radiación incidente en el plano vertical -muros- y horizontal -calle-, observamos que, para el caso del plátano, ver Tabla 4, especie de primera magnitud, de aproximadamente-18 m de altura, la forestación incide sobre la radiación generando mayor homogeneidad en su distribución en los planos evaluados, con un porcentaje de bloqueo de la radiación sobre los muros que oscila entre 65.81 y el 76,67%. Este comportamiento es beneficioso en términos de protección y manejo de la radiación, pero perjudicial, en lo relativo a las posibilidades de aprovechamiento en verano.

Cuando analizamos el porcentaje de bloqueo del forestal, para el caso de las otras especies analizadas, ver Tabla 2, se observa que por tratarse de especies de segunda magnitud forestal (8 a 12 m de altura), la distribución de la radiación incidente en el plano vertical es mucho más heterogénea, generando sobre los muros condiciones de luz y sombra, y un menor bloqueo de la radiación sobre el plano horizontal. El efecto de la morera y de la acacia, en relación al bloqueo de la radiación incidente, resulta semejante, reportando valores de bloqueo para el caso del muro del orden de 7 a 90% dependiendo del punto de medición observado. En el caso del centro del cañón urbano el bloqueo de ambas especies sobre plano horizontal es semejante y del orden del 22%. Esta asimetría dificulta el manejo del diseño de las protecciones solares en verano, pero mejora las posibilidades de aprovechamiento activo de la radiación solar. Cabe destacar que, a semejanza de su comportamiento en términos de incidencia sobre la distribución de la radiación solar, acacia visco es una especie nativa de menor requerimiento hídrico que la morera.

Finalmente, el fresno, especie también de segunda magnitud (altura 8 a 12m), pero con un desarrollo de copa más compacto que las anteriores, muestra un comportamiento de bloqueo de tipo puntual sobre la porción del muro inmediata más próxima, se observa que el bloqueo asciende al 91 % de la radiación incidente sobre el muro norte al este, sin embargo, sobre el muro norte al oeste observamos que este porcentaje desciende al 5.8%; y muestra el manejo más desfavorable hacia el centro del cañón urbano, donde el bloqueo no supera el 1%.

El comportamiento verificado pone de manifiesto la importancia de la selección del forestal de acuerdo a las opciones de diseño y a los objetivos de aprovechamiento de la energía en las zonas de baja densidad edilicia que, en la ciudad de Mendoza, son de uso mayoritariamente residencial. Es necesario definir previamente a la renovación forestal o la forestación de un cañón urbano, si lo que se busca, durante el verano, es el aprovechamiento activo de la misma o el manejo pasivo, en términos de asegurar niveles adecuados de iluminación y protección de la radiación solar en verano de los espacios.

La Figura 11 compila las salidas gráficas del modelo utilizado en los escenarios analizados.



Rhino +  
Grasshopper +  
Lands Design

**.epw**  
Weather data

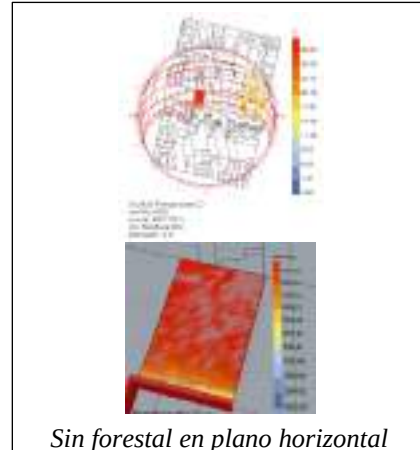
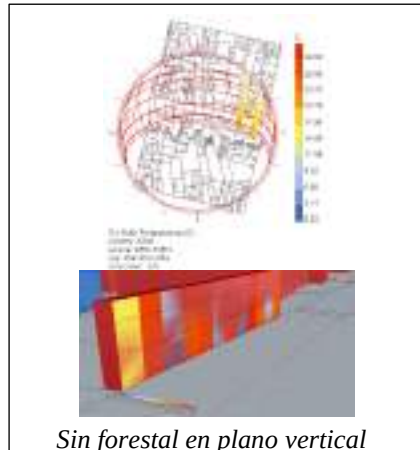
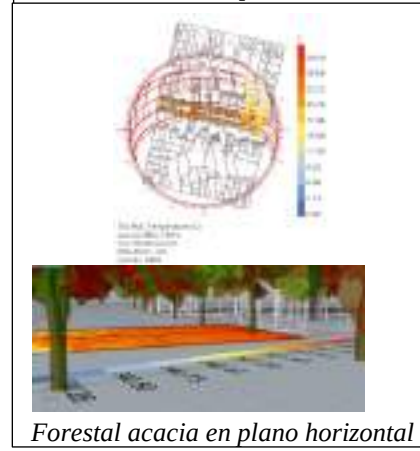
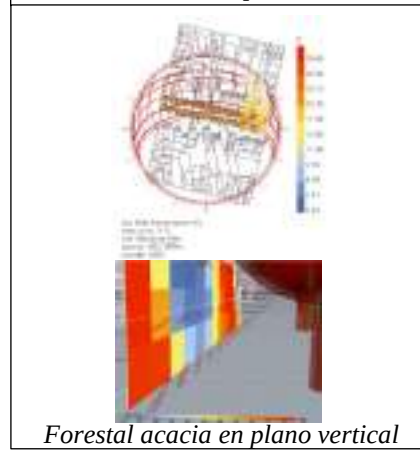
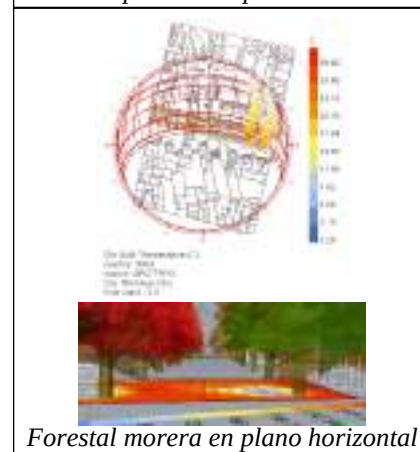
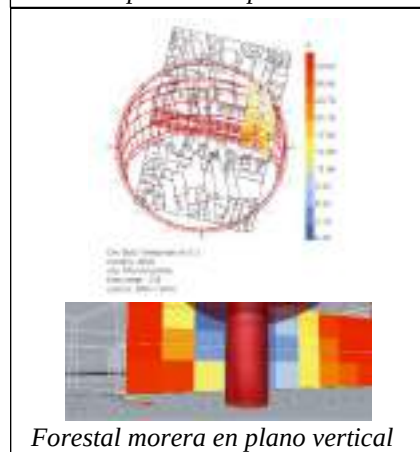
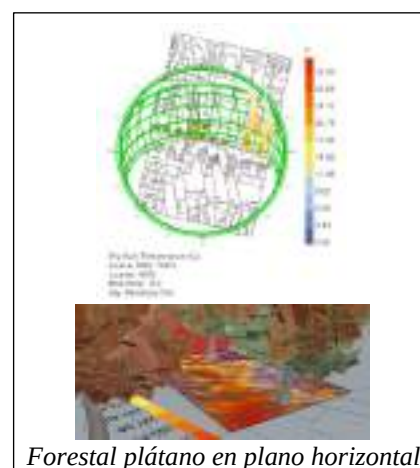
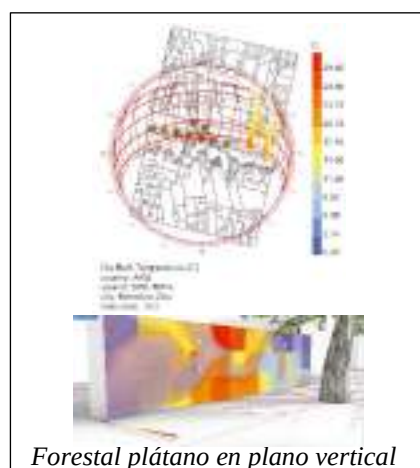


Figura 11: Representación de las salidas gráficas del modelo, para el caso y los escenarios analizados.

Finalmente se observa que, la evaluación del potencial solar sobre las fachadas de un cañón urbano forestado requiere métodos más sofisticados que permitan calcular la radiación solar incidente en un modelo digital 3D que contenga a los forestales y sus características morfológicas y optotérmicas. Es deseable un alto grado de facilidad de uso para los modelos de potencial solar a gran escala, lo que cambia con el número de herramientas de software que se requieren para realizar diferentes tareas dentro de un análisis completo. En este sentido, los modelos que funcionan como componentes no esenciales en un software de diseño asistido por ordenador (CAD), como es el caso de LadyBug utilizado en la presente investigación, ofrecen la ventaja de presentar mayor número de funcionalidades avanzadas de modelado 3D del CAD, que en ocasiones incluyen posibilidades de diseño paramétrico junto con modelos energéticos específicos (Anton y Tănase, 2016), otros ejemplos de estas herramientas son Ecotect, DIVA y Skelion.

## CONCLUSIONES

Este trabajo presenta los primeros resultados de una investigación orientada a simular la distribución de la radiación solar en las distintas fachadas que componen el cañón urbano tomado en cuenta la influencia de la morfología y la tecnología urbano-edilicia y su combinación con distintas especies forestales. Para ello se utilizó el software Rhino y la interfaz de programación visual Grasshopper con tres complementos principales Ladybug, Honeybee y Lands Design.

La contrastación de los primeros resultados obtenidos mediante simulación y su vinculación con los datos monitoreados a campo, muestra un buen nivel de ajuste, con un error relativo promedio del orden de +/-2 a 25 %, esto muestra una buena performance del modelo considerando la complejidad asociada a la modelización de las distintas especies forestales y su combinación con la volumetría urbana.

Sumado los resultados ponen en evidencia el impacto de la morfología de la especie forestal en la disponibilidad de radiación solar en los diferentes planos que componen el cañón urbano vial de 20 m de ancho. Demostrando que, el plátano especie de primera magnitud, genera un bloqueo más homogéneo de la distribución solar en la baja densidad edilicia, del orden del 70 % en los planos verticales al norte y del 46% en los planos horizontales, mientras que el fresno, especie de segunda magnitud, de follaje denso y desarrollo vegetativo de tipo individual, sin solapamiento lateral de copas, presenta un bloqueo heterogéneo de la misma, del orden del 90% en los paramentos verticales al norte en la zona inmediata a la localización del forestal, y de 6% en los paramentos verticales al norte alejados del forestal. Mientras que no evidencia bloqueo prácticamente de la radiación incidente sobre plano horizontal.

Los resultados muestran que Ladybug Tools (LBT), es un complemento paramétrico que permite a los usuarios evaluar los efectos de múltiples variables como geometrías, materiales, climas y forma urbana, de manera ágil e iterativa. Como herramienta, ofrece la posibilidad de desarrollar una retroalimentación del proceso de diseño y análisis de los espacios urbanos y conectar la disponibilidad de la radiación solar de un espacio con las variables que lo caracterizan a fin de identificar las intervenciones necesarias para su manipulación.

En futuras etapas se plantea completar todo el proceso de monitoreo y contrastación, para todos los casos bajo análisis, y utilizar otras herramientas de predicción a fin de identificar fortalezas y debilidades de las mismas, y definir cuál de todas ofrece mayores beneficios bajo los condicionantes que imponen las características de la ciudad en estudio.

## FUENTES DE FINANCIAMIENTO

Esta investigación ha sido posible por el apoyo financiero del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y la Agencia Nacional de Promoción de la Ciencia y la Tecnología (ANPCyT) mediante los fondos recibidos a través de los proyectos de investigación PICT-2020-02444 y PIP 2021-0900.

## REFERENCIAS

Anton, I., y Tănase, D. (2016). Informed geometries. Parametric modelling and energy analysis in early stages of design. *Energy Procedia*, 85, 9-16.



- Censo Georreferenciado del arbolado urbano del Área Metropolitana de Mendoza - UNICIPIO (2022). <https://miarbol.mendoza.gov.ar/tableros/d/rIYUH7j7k/estadisticas-sistema-informacion-y-gestion-arbolado?orgId=1&var-municipio=All&var-distrito=All&var-calle=All>
- Fogl, M., Moudrý, V. (2016). Influence of vegetation canopies on solar potential in urban environments. *Applied Geography*, 66, 73-80.
- Freitas, S., Catita, C., Redweik, P., y Brito, M. C. (2015). Modelling solar potential in the urban environment: State-of-the-art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 915-931.
- Hofierka J, Kaňuk J. (2009). Assessment of photovoltaic potential in urban areas using opensource solar radiation tools. *Renewable Energy*, 34, pp. 2206-2214.
- Liu, H. Y., Skandalos, N., Braslina, L., Kapsalis, V., y Karamanis, D. (2023, July). Integrating solar energy and nature-based solutions for climate-neutral urban environments. In *Solar* (Vol. 3, No. 3, pp. 382-415). MDPI.
- Martín Ávila A. M., Domínguez Bravo J., Amador Guerra J. (2016). Desarrollo de un modelo geográfico para la evaluación del potencial fotovoltaico en entornos urbanos”, *GeoFocus (Artículos)*, nº 18, p. 143-167. ISSN: 1578-5157.
- Martínez CF, MA Cantón, FA Roig Juñent. 2014. Incidencia del déficit hídrico en el crecimiento de árboles de uso urbano en ciudades de zonas áridas: Caso de Mendoza, Argentina. *Interciencia* 39 (12): 890-897.
- Noorollahi, Y., Golshanfard, A., Ansaripour, S., Khaledi, A., y Shadi, M. (2021). Solar energy for sustainable heating and cooling energy system planning in arid climates. *Energy*, 218, 119421.
- Ruiz, M. A., Correa, E. N., y Cantón, M. A. (2015). Incidencia de la selección de la especie forestal en el confort térmico de cañones urbanos de zonas áridas: El caso de Mendoza, Argentina. *Urbano*, 18(32), 60-70.
- Speak, A., Montagnani, L., Wellstein, C., y Zerbe, S. (2020). The influence of tree traits on urban ground surface shade cooling. *Landscape and urban planning*, 197, 103748
- Staley, D. C. (2015). Urban forests and solar power generation: partners in urban heat island mitigation. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 10(1), 78-86.
- Tan, Z., Lau, K. K. L., y Ng, E. (2016). Urban tree design approaches for mitigating daytime urban heat island effects in a high-density urban environment. *Energy and Buildings*, 114, 265-274.
- Tooke, T. R., Coops, N. C., Voogt, J. A., y Meitner, M. J. (2011). Tree structure influences on rooftop-received solar radiation. *Landscape and Urban Planning*, 102(2), 73-81.
- Wiginton L.K., Nguyen H.T., Pearce J.M. (2010): “Quantifying rooftop solar photovoltaic potential for regional renewable energy policy. *Computers, Environment and Urban Systems*, 34, pp. 345-357.

## MODELING THE IMPACT OF FORESTATION ON THE AVAILABILITY OF SOLAR RADIATION IN LOW-DENSITY URBAN CANYONS. THE CASE OF THE CITY OF MENDOZA

**ABSTRACT:** The city of Mendoza is characterized by intense forestation used for the bioclimatic conditioning of urban canyons during daylight hours, responding to the “oasis city” model. In this metropolis, it is essential to identify the extent to which the forest canopy affects radiative energy exchanges, taking into account that 80% of the residential sector of the metropolitan area is represented by low building density. This paper presents the initial results of a study aimed at simulating the distribution of solar radiation on the different facades that make up the urban canyon, taking into account the influence of morphology, urban building technology, and their combination with different forest species. Rhino software and the Grasshopper visual programming interface were used with three main add-ons: Ladybug, Honeybee, and Lands Design. The comparison of the initial results obtained through simulation and their link to the data monitored in the field shows a good level of adjustment, with a relative error ranging from +/- (2 to 25) % when comparing simulated and measured data. This shows an acceptable performance of the model, considering the complexity associated with modeling the different species and their combination with urban volumetry.

**Key words:** solar radiation, urban canyons, urban forestation, low building density, simulation models.



## IDENTIFICACIÓN DE MUESTRAS DE IRRADIANCIA SOLAR DE CIELO CLARO MEDIANTE APRENDIZAJE AUTOMÁTICO NO SUPERVISADO

**Nicolás Rivera-Lera<sup>1,2</sup>, Miriam Manrique<sup>3</sup>, Germán Salazar<sup>1,2</sup>, Rubén Ledesma<sup>1,2</sup>, Agustín Laguarda<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Instituto de investigaciones en Energía no Convencional (INENCO)

<sup>2</sup>Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de Salta

<sup>3</sup>Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), Lima Perú

<sup>4</sup>Laboratorio de Energía Solar, Instituto de Física, Facultad de Ingeniería, UdelAR

E-mail: nicolasrivera2297@gmail.com

**RESUMEN:** Este trabajo presenta un enfoque para la detección de muestras de cielo claro a partir del análisis de series temporales de Irradiancia Global Horizontal (GHI) y técnicas del tipo no supervisadas de machine learning. Además, propone un modelo local de cielo claro ajustado mediante regresión tipo potencia sobre la Irradiancia Horizontal en el tope de la atmósfera, sobre las muestras obtenidas. Se desarrolló un detector de muestras de cielo claro basado en umbrales de derivadas (primera y segunda), clustering no supervisado utilizando el modelo Gaussian Mixture Models y análisis de densidad de datos vecinos para ser aplicados sobre una serie de GHI. La aplicación de este detector se realizó sobre datos de GHI provenientes del sitio Desert Rock (Estados Unidos) a escala de 1 minuto, extraídos de la red Surface Radiation Budget Network (SURFRAD). Se contrastaron las muestras detectadas con el algoritmo de Reno y Hansen (2016), utilizado como referencia. Estas muestras mostraron más del 90% de coincidencia. El modelo de cielo claro obtenido presentó métricas menores a un 10% en rRMSE con el modelo McClear.

**Palabras clave:** irradiancia solar en plano horizontal, cielo claro, clústeres, modelos de cielo claro.

### INTRODUCCIÓN

La radiación solar que ingresa a los sistemas que aprovechan esta energía puede verse atenuada por su interacción con nubes o aerosoles en la atmósfera (Shen et al., 2018). Los modelos de cielo claro (CC) estiman la radiación máxima que alcanza la superficie terrestre en ausencia de obstrucciones meteorológicas, por lo que son esenciales en el diseño y dimensionamiento de sistemas solares (Gueymard, 2008).

Estos modelos se basan en la geometría solar del sistema Sol-Tierra (Gueymard, 2012) y consideran factores como latitud, época del año, hora del día y altitud. Dichos parámetros se emplean en funciones que incluyen la masa de aire relativa para una trayectoria específica y el ángulo de incidencia solar sobre un plano horizontal. Además, pueden incorporar variables como la transmitancia de los distintos componentes atmosféricos.

Entre los modelos de CC más utilizados se encuentran McClear (Lefevre et al., 2013), de naturaleza física y basado en información atmosférica procedente de reanálisis satelital: ESRA (Rigollier et al., 2000), combina parametrizaciones empíricas con datos de turbidez de Linke (Louche et al., 1986; Linke, 1992); REST2 (Gueymard, 2008), es un modelo físico que resuelve la ecuación de transferencia radiativa con alta precisión para condiciones de CC; y modelos como ARGP y ARGP-v2 (Ledesma et al., 2022), diseñados específicamente para sitios de altura en Argentina, con ajustes empíricos adaptados a condiciones regionales, a los que se les realizó una validación para Salta en Rivera et al. (2024). La elección del modelo depende del objetivo de estudio, la disponibilidad de datos de entrada y la necesidad



de representar condiciones atmosféricas específicas.

La versatilidad de los modelos de CC permite estimar de forma rápida la radiación solar sin nubosidad en un sitio concreto, incluso sin mediciones locales. Son útiles en la planificación de proyectos solares y como referencia para construir modelos en condiciones atmosféricas diversas (Gueymard, 2012).

Aunque su rendimiento puede variar según la ubicación, la validación requiere mediciones en tierra que correspondan a condiciones de CC. Una forma común de obtenerlas es inspeccionar visualmente series temporales de irradiancia global horizontal (GHI) medidas con piranómetros, descartando valores afectados por nubes procedentes del disco solar. Una alternativa más simple y de bajo costo computacional es el algoritmo RENO-2016 (Reno y Hansen, 2016), que detecta automáticamente muestras de CC comparando la GHI medida con un modelo de CC y aplicando métricas como desvíos estándar en ventanas temporales, entre otras. Pese a sus buenos resultados, su lógica al momento de realizar validaciones puede resultar sesgada si el modelo de CC que requiere de entrada no representa adecuadamente las condiciones locales, ya que las muestras obtenidas se usan en la validación de otros modelos.

Frente a esto, este artículo propone el siguiente enfoque: un detector de muestras de CC a escala de 1 minuto basado en herramientas de machine learning (ML) y el análisis de series temporales para un determinado sitio, que mantiene un bajo costo computacional y de tipo no supervisado. Se complementan con las muestras detectadas, un nuevo modelo empírico local utilizando un ajuste del tipo potencia a partir de las muestras. En este trabajo, se utiliza el modelo McClear (Lefevre et al., 2013) como referencia para la validación y comparación con el nuevo modelo, dado que es de fácil acceso, provee estimaciones de alta resolución temporal y espacial respaldadas por datos globales y fue validado en diferentes estudios como en Antonanzas-Torres et al. (2019); Engerer y Mills (2015); Gueymard (2012); Rivera et al., (2024); Laguarda y Abal (2017); Laguarda et al. (2020); Russo et al. (2022). En este contexto, adoptamos la definición de cielo claro como aquellas condiciones atmosféricas en las que el disco solar no se ve afectado por nubosidad ni sombreado directo. Esta definición, en línea con la utilizada por McClear, incluye la atenuación producida por aerosoles y otros constituyentes atmosféricos, por lo que días con elevada turbidez pueden ser clasificados igualmente como cielo claro en ausencia de nubes.

## **METODOLOGÍA**

El procedimiento propuesto para la detección de muestras de CC y el ajuste del modelo local se desarrolla en varias etapas secuenciales. La Figura 1 presenta un diagrama de flujo que resume de manera esquemática el procedimiento, desde la adquisición de los datos hasta las validaciones finales.

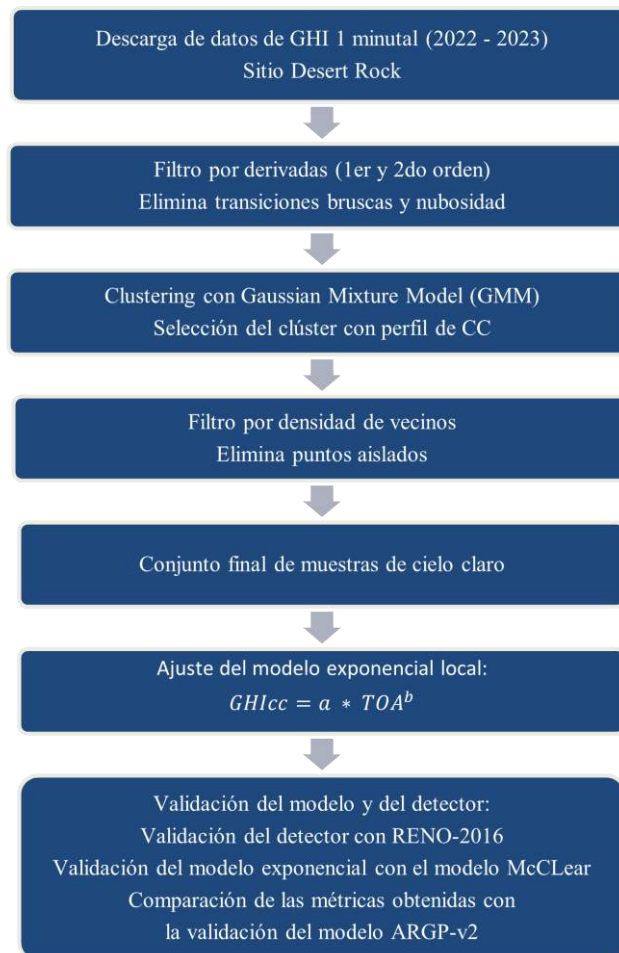


Figura 1: Diagrama de flujo del procedimiento propuesto

### Datos

Se descargaron dos años (2022 y 2023) de datos con frecuencia de 1 minuto de GHI ( $Wm^{-2}$ ) de la red SURFRAD (NOAA, 2025) para el sitio Desert Rock (DRA) (36,62373° N, 116,01947° O, 1007 m s. n. m.) ubicado en Nevada, Estados Unidos. Desert Rock se encuentra en una zona desértica como se observa en la Figura 2, con una clasificación climática BWh según Köppen-Geiger (Peel et al., 2007), que corresponde a un clima desértico cálido.



Figura 2: Estación SURFRAD, Desert Rock, Estados Unidos (Google Earth)

Tanto para obtener un modelo de CC como para la validación de los mismos, es imprescindible contar con muestras de mediciones que correspondan a momentos de cielo claro. Para detectar estas muestras, se trabajó con herramientas de ML y el análisis de series temporales.

#### **Algoritmo (Reno y Hansen, 2016)**

El algoritmo RENO-2016 es un algoritmo diseñado para identificar períodos de CC en series temporales de GHI. Toma como entrada la GHI medida y un modelo de CC de referencia, con el que compara las mediciones a través de cinco criterios calculados en ventanas temporales: (1) diferencia de medias, (2) diferencia de máximos, (3) longitud de línea, (4) variabilidad normalizada de la pendiente y (5) cambio máximo sucesivo. Solo los intervalos que cumplen simultáneamente todos los criterios se clasifican como muestras de CC.

La implementación de este algoritmo se realizó a través de la librería pvlib de Python con la función `detect_clearsky`, donde el algoritmo incluye una iteración que ajusta un factor de escala global ( $\alpha$ ) sobre el modelo de CC de entrada. Este factor se calcula con las muestras detectadas en la iteración previa para compensar sesgos multiplicativos y se aplica antes de volver a ejecutar los criterios. De esta manera, en cada iteración se actualiza tanto el valor de  $\alpha$  como el conjunto de muestras detectadas como CC, repitiendo el proceso hasta converger o alcanzar un número máximo de iteraciones.

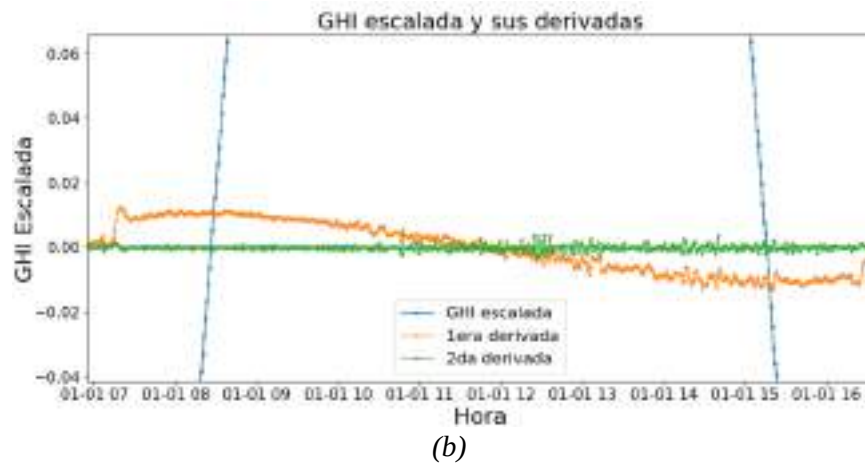
Cabe destacar que esta iteración solo ajusta el modelo de CC y no corrige errores en su forma o en cómo representa las condiciones locales. Por ello, las muestras detectadas pueden seguir reflejando ciertos sesgos del modelo original.

#### **Análisis de la derivada**

Mediante la inspección visual de un día característico y completo de CC sobre la serie temporal escalada (con una normalización estándar), se observó que la derivada discreta de primer orden toma valores dentro de un umbral acotado, aproximadamente entre -0,02 y 0,02. En el caso de la derivada de segundo orden, los valores típicos se ubican entre -0,003 y 0,003, como se muestra en la Figura 3. Estos umbrales se justifican porque, en condiciones de CC, la irradiancia solar presenta variaciones suaves y continuas a lo largo del día, determinadas principalmente por la geometría solar. En consecuencia, las derivadas de primer y segundo orden muestran valores bajos y estables, mientras que la presencia de nubes genera cambios abruptos que se traducen en derivadas de mayor magnitud. A partir de esta observación, se filtraron los valores que no se encontraban dentro de esos rangos.

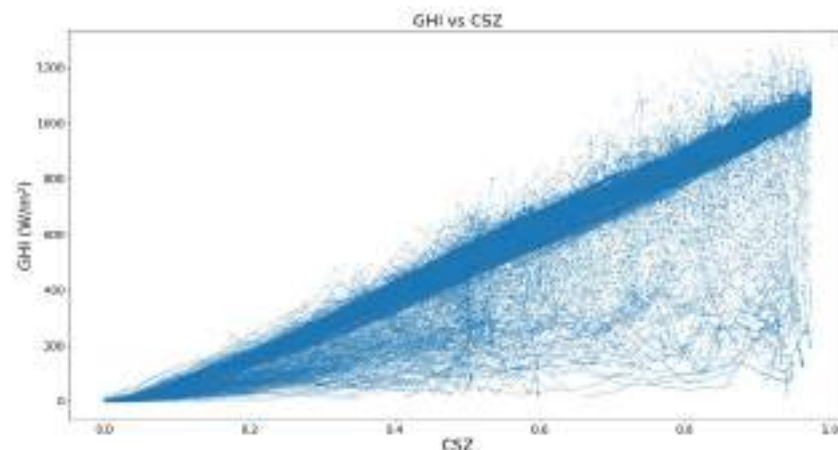


(a)

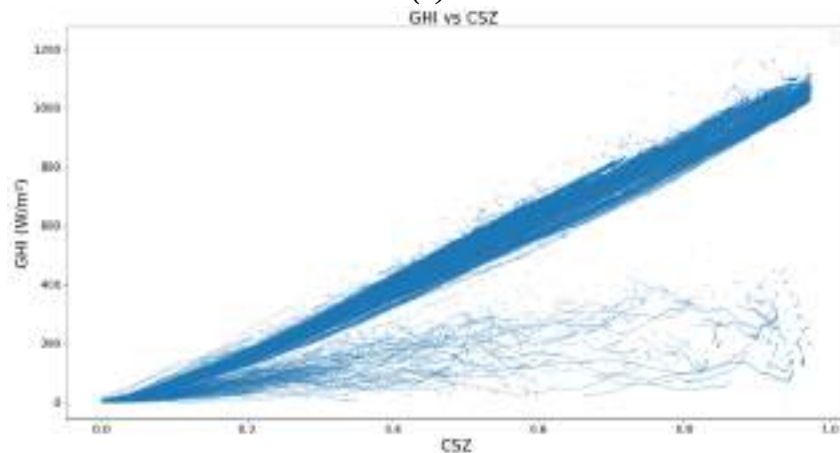


(b)  
Figura 3: Día de CC donde se observan los umbrales definidos para las derivadas, a) Día 1-01-2022, b) Mismo día con zoom

Este primer filtro permitió eliminar momentos del día afectados por picos de nubosidad o caídas abruptas de la GHI. En las Figuras 4a y 4b se muestra la GHI en función del coseno del ángulo cenital (CSZ), antes y después de aplicar este criterio. Se utilizó este tipo de gráfico ya que, en condiciones de cielo claro, la relación de GHI vs CSZ describe una envolvente superior que representa un límite o cota superior de irradiancia posible para una determinada posición solar (sin tener en cuenta fenómenos de sobreirradiación).



(a)



(b)

Figura 4: Comparación de datos de GHI en función del CSZ antes y después del primer filtro aplicado sobre derivadas para el año 2022. (a) Datos sin filtrar; (b) Datos filtrados aplicando el criterio de derivadas

### ***Separación de muestras I: Clasificación mediante Gaussian Mixture***

A los datos que superaron el primer filtro de derivadas se les aplicó un algoritmo de clustering basado en la clase Gaussian Mixture Models (GMM) de la librería `sklearn.mixture` (Pedregosa et al., 2011). Este algoritmo permite especificar la cantidad deseada de clústeres y se encarga de realizar distribuciones gaussianas a los datos y separarlos en grupos distintos. La Figura 5 muestra el resultado de la separación en dos clústeres.

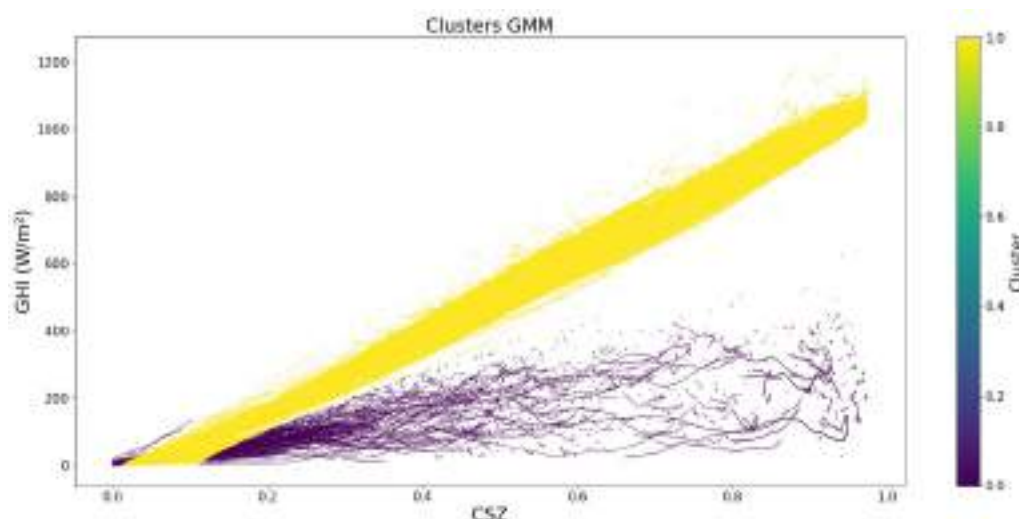


*Figura 5: Separación de dos clústeres de datos GHI utilizando Gaussian Mixture sobre la base de datos del año 2022*

De estos clústeres, se seleccionó el clúster correspondiente con la región superior, representada en color amarillo en la Figura 5, ya que se ajusta mejor a un perfil típico de cielo claro, actuando como cota superior para un determinado valor de GHI en función del ángulo cenital.

### ***Separación de muestras II: Filtrado por densidad de vecinos***

Luego de aplicar el segundo filtro, aún se observaban algunos subconjuntos de datos aislados que no representaban condiciones reales de CC. La mayoría de estos correspondían a situaciones de sobreirradiancia. Para realizar un tercer filtrado más minucioso se implementó un criterio basado en densidad de vecindad. Este método evaluó, sobre los datos previamente escalados y filtrados, cuántas muestras se encontraban dentro de un radio de 0.03 unidades normalizadas. Solo se conservaron aquellos puntos que tenían al menos 20 vecinos dentro de dicho radio, este criterio también fue realizado por inspección visual.

Este paso permitió eliminar subconjuntos de puntos aislados y mejorar la robustez del conjunto final de muestras representativas de CC. En la Figura 6 se muestran los resultados obtenidos.

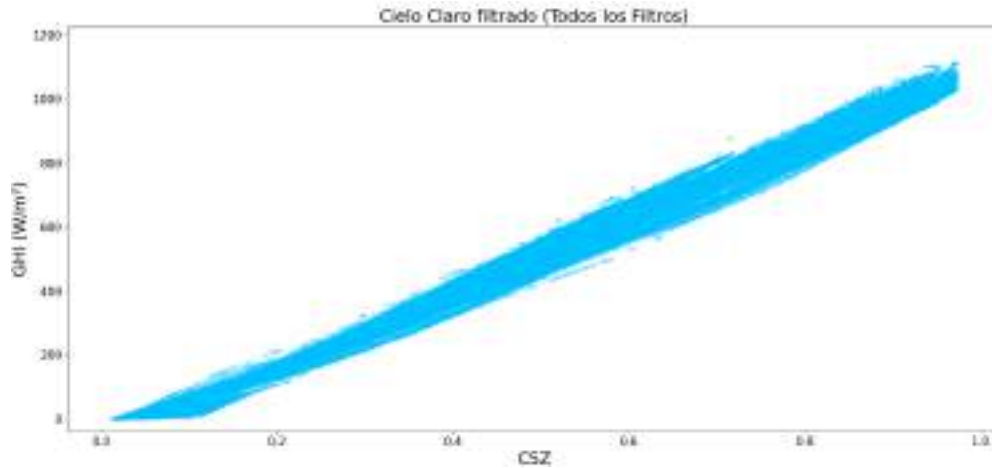


Figura 6: Conjunto final de muestras de cielo claro luego del filtrado basado en densidad de vecinos tomando un radio de 0.03 para el año 2022

### **Modelo de cielo claro local**

Una vez obtenido el detector de muestras de CC, se procedió al desarrollo e implantación de un modelo empírico de cielo claro ajustado mediante regresión no lineal univariada. El modelo representa la GHI bajo condiciones de cielo claro ( $GHI_{cc}$ ) como una función potencia de la GHI en el tope de la atmósfera (TOA), dado por la siguiente ecuación:

$$GHI_{cc} = a * (TOA)^b \quad (1)$$

donde  $a$  y  $b$  son parámetros ajustados a partir de las muestras clasificadas como cielo claro.

Se utilizó el año 2022 como conjunto de ajuste para obtener los parámetros  $a$  y  $b$  del modelo, mientras que el año 2023 se utilizó como conjunto de testeo. La validación se realizó de manera local mediante la comparación del modelo de potencia con el modelo McClear. De forma análoga, se validó también el modelo ARGP-v2 frente a McClear, y finalmente se compararon las métricas de ambas validaciones.

## **RESULTADOS**

### **Análisis del desempeño del detector de muestras de CC**

Las muestras de CC obtenidas fueron comparadas con las identificadas por el algoritmo RENO-2016 como referencia, alimentado con mediciones de GHI y el modelo McClear de CC.

La comparación entre ambos detectores se realizó mediante una matriz de confusión (agregando además un nuevo filtro de altura solar de  $7^\circ$  para no tener en cuenta la noche (o sombreamiento al amanecer o atardecer) como se muestra en la Figura 7.



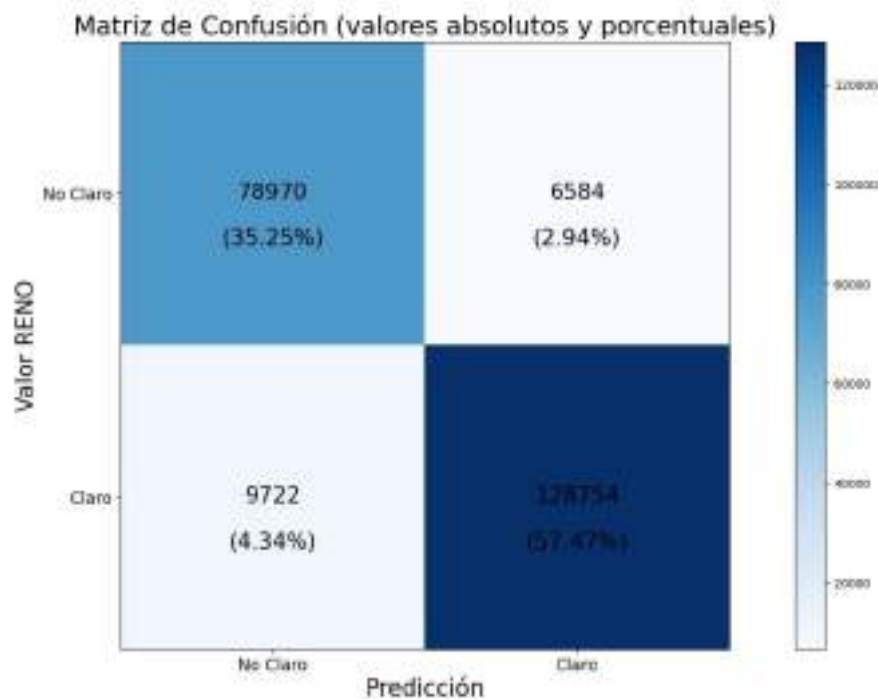


Figura 7: Matriz de confusión de la comparación entre las muestras de CC filtradas con el detector desarrollado y RENO-2016. La escala indica el número de datos

Se observa que el detector propuesto presenta una coincidencia superior al 90% respecto al algoritmo de RENO-2016, lo cual representa un buen indicador de desempeño y valida su utilidad como herramienta para la clasificación de muestras de CC. Además, ofrece posibilidades de mejoras y adaptación a otros contextos mediante el ajuste de sus parámetros.

En las Figuras 8a y 8b se muestran en azul los valores medidos de GHI en el sitio, mientras que en rojo se representan los valores que el detector clasifica como potenciales muestras de CC. En el caso de días nublados (Figura 8b), se aprecia que el detector filtra adecuadamente los datos atenuados por la presencia de nubosidad. En contraste, para un día representativo de CC (Figura 8a), el detector logra identificar la mayor parte de los valores como pertenecientes a condiciones de cielo claro.



(a)



(b)

Figura 8: Comportamiento del detector de muestras de CC en distintos tipos de nubosidades, (a) Día correspondiente a CC, (b) Días atenuados por nubosidad

### Modelo de cielo claro local

Las muestras de CC obtenidas para el año 2022 se utilizaron para ajustar el modelo de CC de la Ec. (1). Así, se determinaron los parámetros presentados en la Tabla 1.

Tabla 1: Parámetros que mejor ajustan al modelo de potencia para DRA

| Parámetros | Valor |
|------------|-------|
| $a$        | 0,208 |
| $b$        | 1,193 |

Se utilizó el modelo de cielo claro McClear como modelo patrón para validar este modelo tanto en el ajuste como en el testeo y además se comparó con las métricas obtenidas de las validaciones con el modelo ARGP-v2 en el mismo periodo de ajuste y testeo. Los resultados de estas métricas se muestran a continuación en la siguiente Tabla 2. Las métricas utilizadas son el error cuadrático medio porcentual (rRMSE), el coeficiente de Pearson (corr) y el sesgo medio porcentual (rMBD). La reducción del rRMSE en la validación del modelo de potencia respecto al ARGP-v2 implica una mejora en la precisión de las estimaciones de GHIcc.

Tabla 2: Métricas de los modelos de cielo claro a escala minutal con respecto al modelo McClear en periodos de 2022 y 2023

| Modelo             | Métrica   | Ajuste<br>(datos 2022) | Testeo<br>(datos 2023) |
|--------------------|-----------|------------------------|------------------------|
| Modelo de potencia | rRMSE (%) | 8,00                   | 6,54                   |
|                    | rMBD (%)  | 2,54                   | 1,91                   |
|                    | Corr      | 0,99                   | 0,99                   |
| ARGP-v2            | rRMSE (%) | 13,52                  | 12,03                  |
|                    | rMBD (%)  | 7,90                   | 7,24                   |
|                    | Corr      | 0,99                   | 0,99                   |

La Figura 9 muestra el comportamiento de los modelos, incluido McClear, frente a datos medidos. Se observa que los modelos se encuentran en fase y que el modelo de potencia (en la gráfica abreviado como modelo exp) ajusta mejor que el modelo ARGP-v2.

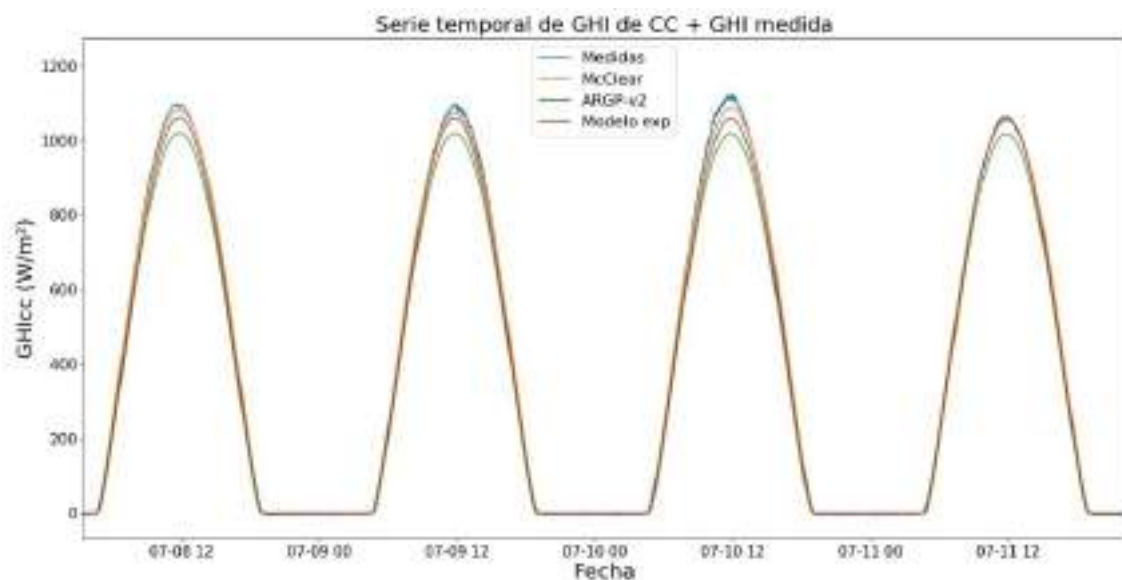


Figura 9: Comportamiento de los modelos de CC en la serie temporal para DRA 2023 (Testeo)

## CONCLUSIONES

Tomando el modelo RENO-2016 como referencia, se observa que el detector desarrollado para condición de CC presenta una coincidencia superior al 90% para DRA, utilizando datos del año 2022.

Se observa que las técnicas no supervisadas utilizadas permiten clasificar muestras de cielo claro con buen desempeño, sin requerir un modelo previo como referencia, reduciendo el riesgo de validaciones que puedan estar sesgadas si dicho modelo no representa las condiciones de CC del sitio.

El detector de muestras de CC, además, presenta la ventaja de ser optimizable, ya que cuenta con parámetros ajustables. Esto permite adaptarlo a otros sitios en caso de que se requiera una calibración más precisa.

Dado el bajo costo computacional y la ventaja de ser un algoritmo no supervisado y optimizable presenta una buena alternativa al algoritmo de RENO-2016 que necesita un modelo de CC como entrada para poder hacer la respectiva detección.

Se construyó un modelo de cielo claro local mediante regresión no lineal univariada de tipo potencia, ajustado a partir de las muestras de CC del año 2022. Este modelo resultó empírico y efectivo, mostrando métricas de desempeño (respecto a McClear) superiores a las del modelo ARGP-v2. Asimismo, en el año de testeo se observó que, independientemente del modelo considerado, las métricas fueron mejores.

Para investigaciones futuras se podría realizar un análisis de sensibilidad sobre los umbrales utilizados en las derivadas y sobre la cantidad de vecinos considerados en el filtro de densidad de vecindad. Asimismo, se plantearía incorporar una etapa de control iterativa: utilizar el modelo obtenido de CC para retomar el proceso desde el paso inicial y generar nuevas muestras de CC, tomando a este modelo como referencia y calculando dichas métricas a partir de comparaciones punto a punto o mediante ventanas temporales de la GHI. Adicionalmente, se podría aplicar tanto el detector como el modelo desarrollado en este trabajo en otros sitios, así como llevar a cabo validaciones en regiones con características climáticas diferentes o durante días en los que se cuenten con diferentes niveles de cargas de aerosoles.

## REFERENCIAS

- Antonanzas-Torres, F., Urraca, R., Polo, J., Perpiñan-Lamigueiro, O. y R, E. (2019). Clear sky solar irradiance models: A review of seventy models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 107, 374-387. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.02.032>.
- Developers. Gaussian mixture models en scikit-learn. Dirección URL: <<https://scikit-learn.org/stable/modules/mixture.html>> [consulta: agosto de 2025]
- Engerer, N. y Mills, F. (2015). Validating nine clear sky radiation models in Australia. *Solar Energy*, 120, 9-24. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.06.044>.
- Gueymard C. A (2008). REST2: High-performance solar radiation model for cloudless-sky irradiance, illuminance, and photosynthetically active radiation. Validation with a benchmark dataset. *Solar Energy* 82(3) 272-85.
- Gueymard, C. A. (2012). Clear-sky irradiance predictions for solar resource mapping and large-scale applications: Improved validation methodology and detailed performance analysis of 18 broadband radiative models. *Solar Energy*, 86(8), 2145–2169. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.11.011>
- Laguarda, A. y Abal, G. (2017). Clear-sky broadband irradiance: first model assessment in Uruguay. *Proceedings of Solar World Congress*, 29, 10-2.
- Laguarda, A., Giacosa, G., Alonso Suárez, R. y Abal, G. (2020). Performance of the site-adapted CAMS database and locally adjusted cloud index models for estimating global solar horizontal irradiation over the Pampa Húmeda. *Solar Energy*, 199, 295 - 307.
- Ledesma, R. D., Salazar, G. A., y Castro Vilela, O. d. (2022). ARGP-v2 un modelo práctico para la estimación de irradiancia global horizontal en condiciones de cielo claro para sitios de altura. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 26.
- Lefevre, M., Oumbe, A., Blanc, P., Espinar, B., Gschwind, B., Qu, Z., . . . Arola, A. (2013). McClear: a new model estimating downwelling solar radiation at ground level in clear-sky conditions. *Atmospheric Measurement Techniques*, 6, 2403-2418.
- National Oceanic and Atmospheric Administration. (2025). Surface Radiation Budget Network (SURFRAD). NOAA Global Monitoring Laboratory. Dirección URL: <<https://gml.noaa.gov/grad/surfrad/>> [consulta: julio de 2025].
- Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., . . . P. (2011). Scikit-learn: Machine Learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, 12, 2825-2830.
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., y McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System sciences*, 11, 1633-1644.
- Reno, M. J., y Hansen, C. W. (2016). Identification of periods of clear sky irradiance in time series of GHI measurements. *Renewable Energy*, 90, 520-531. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.12.031>.
- Rivera, N., Salazar, G., y Laguarda, A. (2024). Análisis de la calidad de mediciones de irradiancia solar en plano horizontal (GHI) y evaluación de los modelos de GHI en condiciones de cielo claro para dos sitios en la provincia de salta. (A. A. Ambiente, Ed.) *Actas del Congreso de ASADES 2024*, 249-260. Obtenido de <https://asades.org.ar/wp-content/uploads/2025/03/ACTAS-2024.pdf>.
- Russo, P., Laguarda, A., Abal, G. y Piccioli, I. (2022). Performance of the REST2 model for 1-minute clear-sky solar irradiance with MERRA-2 atmospheric inputs. *Anais Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS*, 1-9. doi:10.59627/cbens.2022.1100.

## IDENTIFICATION OF CLEAR-SKY GLOBAL HORIZONTAL IRRADIANCE SAMPLES USING UNSUPERVISED LEARNING

**ABSTRACT:** This work presents an approach for detecting clear-sky samples from the analysis of Global Horizontal Irradiance (GHI) time series using unsupervised machine learning techniques. In addition, it proposes a local clear-sky model fitted through a power-law regression on top-of-atmosphere (TOA) irradiance, using the detected samples. The detector was developed based on first- and second-order derivative thresholds, unsupervised clustering using the Gaussian Mixture Models (GMM) algorithm, and neighborhood density analysis, applied to a GHI time series. The method was tested on 1-minute GHI data from the Desert Rock site (USA), obtained from the SURFRAD network. The

detected samples were compared to those identified by the RENO-2016 algorithm, used as a reference, showing over 90% agreement. The resulting clear-sky model achieved relative RMSE values below 10% compared to the McClear model.

**Keywords:** global horizontal irradiance, clear-sky, clustering, clear-sky models

## EVALUACIÓN DE ALGORITMOS DE APRENDIZAJE AUTOMÁTICO PARA LA CLASIFICACIÓN DE DÍAS DE CIELO CLARO

**Pablo Cinco Reynaga<sup>1</sup>, Rubén Darío Ledesma<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de Salta (UNSa)

<sup>2</sup>Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO, UNSa – CONICET)

E-mail: pablo.cinco.reynaga@gmail.com, rdledesma@exa.unsa.edu.ar

**RESUMEN:** El siguiente trabajo busca aplicar y comparar diferentes algoritmos de aprendizaje automático al problema de identificar días de cielo claro en los conjuntos de datos de radiación solar, con el objetivo de evaluar su desempeño. Se utilizará un conjunto de datos de la localidad de Cerrillos, Salta, Argentina para entrenar diferentes algoritmos de aprendizaje supervisado (Perceptrón multicapa y K-vecinos más cercanos), implementando técnicas de reducción de dimensión (Análisis de componentes principales), estimación de hiperparámetros (gridsearch) y, por último, se contrastarán los resultados mediante una matriz de confusión utilizando la precisión como métrica de desempeño.

**Palabras clave:** Irradiancia solar, GHI, Aprendizaje Automático, MLP, KNN

### INTRODUCCIÓN

La medición de la irradiancia bajo condiciones de cielo despejado es fundamental para el análisis de los procesos radiativos en la atmósfera. Este tipo de datos permite eliminar la influencia de las nubes en el balance radiativo y evaluar con mayor precisión el impacto de gases y aerosoles. Analizar estos procesos en ausencia de nubosidad resulta clave para comprender su papel en el sistema climático. Sin embargo, esta tarea sigue siendo un desafío: no suele existir un sistema que registre de manera separada las observaciones en condiciones de cielo despejado, ni un método estandarizado para derivar dichas irradiancias a partir de mediciones realizadas bajo cielo total (Correa et al., 2022).

Uno de los principales obstáculos es la propia definición de lo que constituye un “día de cielo claro” o “día soleado”. En la comunidad científica dedicada a la radiación solar, no hay consenso: cada autor puede proponer criterios diferentes. Según (Gueymard et al., 2019), las metodologías para detectar cielo claro se dividen, en términos generales, en dos enfoques: la detección de días completamente libres de nubes y la detección de momentos con el sol despejado. El presente trabajo se enmarca en el primer enfoque, centrado en identificar días sin nubosidad.

En este contexto, se plantea evaluar el desempeño de algunos algoritmos de aprendizaje automático para clasificar si los datos correspondientes a un día determinado representan efectivamente un día de cielo claro. Los modelos seleccionados para esta tarea son el Perceptrón Multicapa (MLP, por sus siglas en inglés) y el algoritmo de k vecinos más cercanos (KNN).

Aunque una validación robusta requeriría datos provenientes de múltiples estaciones, en este estudio se utiliza la información de una sola. Esto es suficiente para obtener una primera aproximación al comportamiento de estos algoritmos frente a datos de irradiancia en condiciones de cielo claro.

### PRE-PROCESAMIENTO DE DATOS

#### *Descripción de los datos*



Esta obra está bajo Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Los datos utilizados corresponden a mediciones de radiación global en el plano horizontal (GHI, por sus siglas en inglés), expresadas en  $\text{W/m}^2$ , registradas a intervalos de un minuto. Las observaciones provienen de una estación meteorológica del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) enmarcadas en el proyecto ENARSOL (Moltoni et al., 2016), ubicada en la localidad de Cerrillos, provincia de Salta, Argentina, con coordenadas geográficas  $24.89^\circ$  S de latitud,  $65.82^\circ$  O de longitud, a una altitud de 1.235 m sobre el nivel del mar y se encuentra dentro de la clasificación climática Cwb (Beck et al., 2018).

La serie temporal está conformada por 1.875.636 puntos, desde 2016 hasta 2020. 945.791 son datos diurnos (50,4 %), de los cuales 209.023 (11,1 %) son datos faltantes. Se puede apreciar la distribución de los datos en la Figura 1.

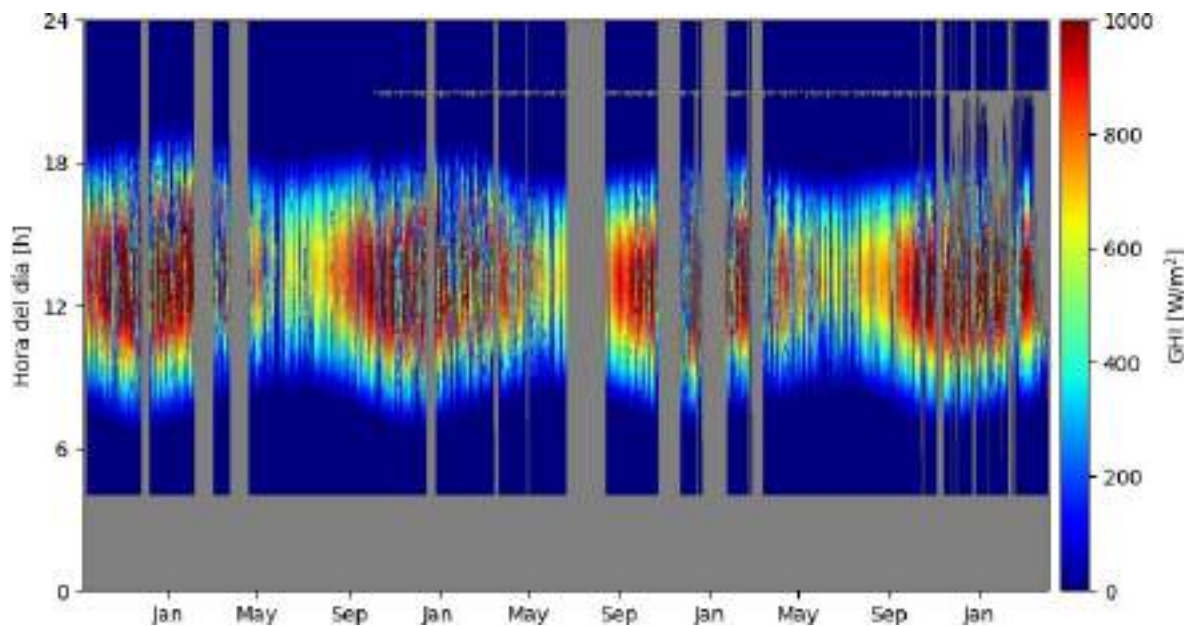


Figura 1: Datos de GHI. Cerrillos, Salta, Argentina. Periodo 2016-2020.

### **Evaluación de la calidad de los datos**

Los controles de calidad permiten tener una noción de la confiabilidad de las bases de datos. Se utilizaron los filtros recomendados por la Baseline Surface Radiation Network (BSRN), según como lo detallan en el trabajo de (Long y Dutton, 2010). Particularmente se utilizarán los filtros “físicamente posibles” y “extremadamente raros”. Como resultado 0 datos y 67 (<1 %) fueron filtrados por el primer y segundo filtro respectivamente.

### **Conjunto de entrenamiento**

Para el procesamiento de la información, cada día se considera como una instancia o registro, y cada uno de los 1.440 minutos que lo componen se emplea como un atributo, tal como se presenta en la Tabla 1. Se eligió mantener todos los datos del día, incluyendo los nocturnos, a los aspectos de mantener fija la arquitectura de la red neuronal. Adicionalmente se tiene la hipótesis que sea factible encontrar desplazamientos horarios en la serie temporal, de esta manera se puede identificar si la serie de medidas está desplazada.

### **Etiquetas**

Para generar las etiquetas de la base de datos, se determinó qué días correspondían a condiciones de cielo claro. Para ello, se solicitó a tres expertos en solarimetría que clasificaran cada día en una de tres categorías: “claro”, “no claro” o “dudoso”, mediante la inspección visual. Se le proporcionó gráficas de cada día con datos medidos de GHI y datos modelados de cielo claro de GHI como se puede ver los ejemplos de las Figuras 2 y 3, así como lineamientos para la inspección visual recomendados por (Abal et al., 2020). Los datos modelados fueron generados por el modelo ARGP (Ledesma et al., 2023).



Tabla 1: Ejemplo del conjunto de datos de entrenamiento. Cada fila contiene las mediciones de GHI de un día. Los valores están expresados en  $\text{W/m}^2$ .

|            | 00:00 | 00:01 | ... | 11:59  | 12:00  | 12:01  | ... | 23:58 | 23:59 |
|------------|-------|-------|-----|--------|--------|--------|-----|-------|-------|
| 2016-09-08 | nan   | nan   | ... | nan    | nan    | nan    | ... | nan   | nan   |
| 2016-09-09 | nan   | nan   | ... | 786,02 | 802,51 | 780,42 | ... | nan   | nan   |
| 2016-09-10 | 3,68  | 3,68  | ... | 850,36 | 854,86 | 854,12 | ... | 3,68  | 3,68  |
| 2016-09-11 | 3,68  | 3,68  | ... | 875,99 | 877,09 | 879,81 | ... | 3,68  | 3,68  |
| ...        | ...   | ...   | ... | ...    | ...    | ...    | ... | ...   | ...   |
| 2020-03-31 | 3,68  | 3,68  | ... | 474,88 | 500,65 | 526,41 | ... | 3,68  | 3,68  |
| 2020-04-01 | 3,68  | 3,68  | ... | 356,55 | nan    | nan    | ... | nan   | 3,68  |
| 2020-04-02 | nan   | 3,68  | ... | 890,86 | 887,03 | 883,50 | ... | 3,68  | 3,68  |
| 2020-04-03 | nan   | nan   | ... | nan    | nan    | nan    | ... | nan   | nan   |

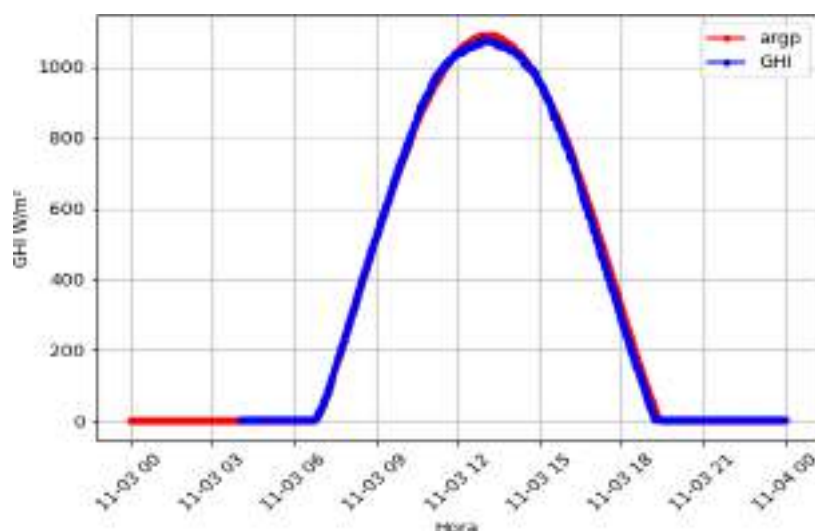


Figura 2: Ejemplo de gráfica de cielo claro usado para generar etiquetas. En azul se grafica las mediciones mientras que en rojo se grafica los datos modelados de cielo claro.

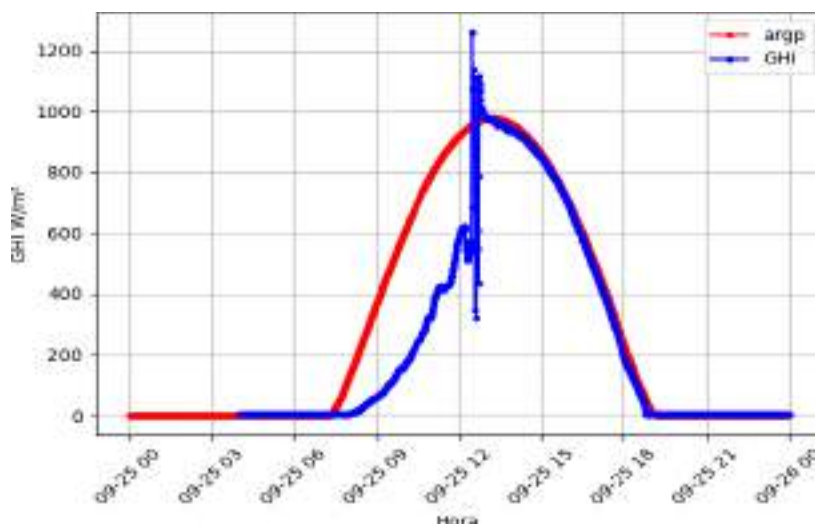


Figura 3: Ejemplo de gráfica de cielo no claro usado para generar etiquetas. En azul se grafica las mediciones mientras que en rojo se grafica los datos modelados de cielo claro.

Posteriormente, los conjuntos de etiquetas generados por los expertos se combinaron para formar un único conjunto de etiquetas siguiendo las siguientes reglas:

- El día se clasifica como “no claro” si al menos uno de los expertos lo calificó así.
- El día se clasifica como “claro” si todos los expertos indicaron “dudoso” excepto uno, que lo calificó

como “claro”.

- Si todos los expertos indicaron “dudoso”, el día se clasifica como “no claro”.

Aplicando este procedimiento, se generaron 1.304 etiquetas (una por cada día del periodo analizado), transformando el problema en una tarea de clasificación binaria.

### **Índice de claridad $k_t$**

A partir del conjunto de datos de GHI, se generará otro conjunto de Índice de Claridad ( $k_t$  en adelante), el cual se calcula dividiendo GHI sobre la radiación extraterrestre en el plano horizontal  $I_0$  (Duffie y Beckman, 2013), tal como se ve en la Ec (1).

$$k_t = GHI/I_0 \quad (1)$$

Se determinará el rendimiento de los algoritmos con este conjunto también.

### **Estandarización de datos**

Ya que todos los atributos de los conjuntos de datos representan medidas de un mismo instrumento, se considera que todas están dentro de un mismo rango de variación. Así que se considerará que no hace falta estandarizar los datos.

### **Métodos de reducción de dimensión**

Se aplicó el análisis de componentes principales (en adelante PCA) al conjunto de datos para reducir la cantidad de variables. Así, se redujeron de 1440 columnas a 53 para los datos de GHI y 56 para los datos de  $k_t$ . Estas columnas mantienen el 95 % de la variabilidad de los datos originales. Se puede ver una comparación entre los resultados con y sin el análisis en la Tabla 2.

Se puede apreciar que la mayoría de las métricas mejoran con la reducción de dimensiones.

*Tabla 2: Comparación de métricas con y sin PCA*

|         | GHI                                                                    |                                                                        | Kt                                                                     |                                                                        |
|---------|------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
|         | MLP                                                                    | KNN                                                                    | MLP                                                                    | KNN                                                                    |
| Sin PCA | Accuracy = 0.89<br>Recall = 0.52<br>Precisión = 0.50<br>F-Score = 0.51 | Accuracy = 0.79<br>Recall = 0.97<br>Precisión = 0.34<br>F-Score = 0.50 | Accuracy = 0.90<br>Recall = 0.86<br>Precisión = 0.53<br>F-Score = 0.66 | Accuracy = 0.84<br>Recall = 0.93<br>Precisión = 0.40<br>F-Score = 0.56 |
| Con PCA | Accuracy = 0.92<br>Recall = 0.86<br>Precisión = 0.60<br>F-Score = 0.70 | Accuracy = 0.87<br>Recall = 0.93<br>Precisión = 0.46<br>F-Score = 0.61 | Accuracy = 0.93<br>Recall = 0.76<br>Precisión = 0.68<br>F-Score = 0.73 | Accuracy = 0.89<br>Recall = 0.83<br>Precisión = 0.49<br>F-Score = 0.62 |

### **Conjunto de entrenamiento y validación**

Se separaron los datos en un conjunto de entrenamiento y en otro de validación con una relación del 80 % y 20 % del total de los datos respectivamente. La selección de los datos para cada conjunto fue aleatoria; si bien pueden existir relaciones en la estacionalidad de los días, se desestimó a los aspectos prácticos de simplificar el problema.

### **MODELOS**

Para este problema de clasificación, se seleccionaron los algoritmos de aprendizaje supervisado: Multi-layer Perceptron y K-Nearest Neighbors.

Un perceptrón multicapa (MLP) es una red neuronal artificial compuesta por varias capas de neuronas: una capa de entrada, donde se ingresan los datos, una o más capas ocultas y una capa de salida, de donde se obtiene la predicción. En este modelo, cada neurona de una capa está conectada con todas las neuronas de la capa siguiente. Los MLP se emplean en distintas aplicaciones de clasificación y regresión, y son perfectas para representar relaciones no lineales complejas entre los datos (Piccioni Costa et al., 2023).

El algoritmo K-Nearest Neighbors (KNN) es un método de aprendizaje supervisado utilizado tanto para clasificación como para regresión. Su funcionamiento se basa en la comparación de un punto de datos nuevo con los K ejemplos más cercanos en el conjunto de entrenamiento, según una métrica de distancia, comúnmente la distancia euclidiana. La predicción se realiza a partir de la clase mayoritaria (en clasificación) o del promedio de valores (en regresión) (Cunningham y Delany, 2007).

### ***Métrica de evaluación***

Ya que la salida de los algoritmos es binaria; “claro” o “no claro”, se utilizará una matriz de confusión para determinar el desempeño contrastando la salida de estos con datos reales. Dicha matriz clasifica los resultados en cuatro clases: verdadero positivo, verdadero negativo, falso positivo y falso negativo. Verdadero positivo significa que el algoritmo identificó correctamente un día de cielo “claro”, según los datos reales, mientras que un falso positivo quiere decir que identificó un cielo “claro” cuando en realidad era “no claro”. De la misma manera, verdadero negativo y falso negativo es cuando el algoritmo identificó un día de cielo “no claro” cuando los datos reales dictaban que era un día de cielo “no claro” y “claro” respectivamente.

Una posible aplicación para el modelo es la selección de días de cielo claro para usarse en procesos de validación, aquí es necesario tener conjuntos de datos compuestos únicamente por días despejados. Por lo tanto, nos interesa maximizar la cantidad de verdaderos positivos a la vez que se minimizan los falsos positivos. Así, la métrica de evaluación será la precisión, Eq 2, tal como se describe en (Olivas Soria, 2022).

$$\text{Precisión} = \frac{\text{Verdaderos Positivos}}{\text{Verdaderos Positivos} + \text{Falsos Positivos}} \quad (2)$$

Esta métrica varía entre 0 y 1, donde un valor cercano a 1 nos dice que la mayor parte de los resultados arrojados por el algoritmo fueron verdaderos positivos.

### ***Ajuste de hiperparámetros***

Se utilizó una técnica llamada Búsqueda en Rejilla (o Grid Search) para buscar la mejor combinación de hiperparámetros. La misma consiste en explorar sistemáticamente las diferentes combinaciones de valores para los hiperparámetros. Luego, cada combinación es evaluada respecto a nuestra métrica de interés, en este caso, la precisión, utilizando el método de la validación cruzada. La misma consiste en, para cada combinación de hiperparámetros, dividir el conjunto de datos en 5 subconjuntos, donde 4 se usaban para entrenar el algoritmo y 1 para validar, el proceso se itera 5 veces cambiando el conjunto de validación. La aplicación de este método arrojó los resultados que se pueden ver en las Tablas 3, 4, 5 y 6.

*Tabla 3: Resultados de gridsearch. Modelo: KNN. Datos: GHI*

| Parámetros                                                 | split0_<br>score | split1_<br>score | split2_<br>score | split3_<br>score | split4_<br>score | mean_<br>score | std_<br>score | rank |
|------------------------------------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|----------------|---------------|------|
| metric: euclidean<br>n_neighbors: 100<br>weights: distance | 0.684            | 0.545            | 0.458            | 0.478            | 0.846            | 0.602          | 0.145         | 1    |
| metric: minkowski<br>n_neighbors: 100<br>weights: distance | 0.684            | 0.545            | 0.458            | 0.478            | 0.846            | 0.602          | 0.145         | 2    |

|                                                           |     |       |       |       |       |       |       |   |
|-----------------------------------------------------------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---|
| metric: minkowski<br>n_neighbors: 50<br>weights: distance | 0.5 | 0.432 | 0.325 | 0.307 | 0.592 | 0.431 | 0.106 | 3 |
|-----------------------------------------------------------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---|

Tabla 4: Resultados de gridsearch. Modelo: KNN. Datos: Kt

| Parámetros                                               | split0_<br>score | split1_<br>score | split2_<br>score | split3_<br>score | split4_<br>score | mean_<br>score | std_<br>score | rank |
|----------------------------------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|----------------|---------------|------|
| metric: euclidean<br>n_neighbors: 3<br>weights: distance | 0.993            | 0.976            | 0.976            | 0.964            | 1.0              | 0.982          | 0.012         | 1    |
| metric: minkowski<br>n_neighbors: 3<br>weights: distance | 0.993            | 0.976            | 0.976            | 0.964            | 1.0              | 0.982          | 0.012         | 2    |
| metric: minkowski<br>n_neighbors: 5<br>weights: distance | 0.987            | 0.976            | 0.981            | 0.965            | 0.993            | 0.981          | 0.009         | 3    |

Tabla 5: Resultados. Modelo: MLP. Datos: GHI

| Parámetros                                                                                                           | split0_<br>score | split1_<br>score | split2_<br>score | split3_<br>score | split4_<br>score | mean_<br>score | std_<br>score | rank |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|----------------|---------------|------|
| activation: logistic<br>alpha: 0.1<br>hidden_layer_sizes: (50,)<br>learning_rate: constant solver:<br>adam           | 0.75             | 0.818            | 1.0              | 0.7              | 1.0              | 0.853          | 0.125         | 1    |
| activation: logistic<br>alpha: 0.01<br>hidden_layer_sizes: (50,)<br>learning_rate: invscaling solver:<br>adam        | 0.6              | 1.0              | 0.666            | 0.777            | 1.0              | 0.808          | 0.166         | 2    |
| activation: logistic<br>alpha: 0.0001<br>hidden_layer_sizes: (100, 50)<br>learning_rate: invscaling<br>solver: lbfgs | 0.666            | 0.722            | 0.625            | 0.769            | 1.0              | 0.756          | 0.131         | 3    |

Tabla 6: Resultados. Modelo: MLP. Datos:Kt

| Parámetros                                                                                                  | split0_<br>score | split1_<br>score | split2_<br>score | split3_<br>score | split4_<br>score | mean_<br>score | std_<br>score | rank |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|----------------|---------------|------|
| activation: logistic<br>alpha: 0.1<br>hidden_layer_sizes: (50,)<br>learning_rate: adaptive<br>solver: lbfgs | 0.988            | 0.972            | 0.988            | 0.994            | 0.994            | 0.987          | 0.007         | 1    |
| activation: relu<br>alpha: 0.1<br>hidden_layer_sizes: (100,)<br>learning_rate: constant<br>solver: lbfgs    | 0.988            | 0.983            | 0.983            | 0.988            | 0.988            | 0.986          | 0.002         | 2    |

|                                                                                                                |     |       |       |       |       |       |       |   |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---|
| activation: logistic<br>alpha: 0.001<br>hidden_layer_sizes: (100,)<br>learning_rate: adaptive<br>solver: lbfgs | 1.0 | 0.978 | 0.983 | 0.983 | 0.983 | 0.985 | 0.007 | 3 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---|

## RESULTADOS

Utilizando los mejores parámetros determinados en la sección anterior, se utilizó el conjunto de prueba para determinar las métricas finales que se pueden ver en el cuadro 7.

Se denota una mejora sustancial con el uso de datos de  $k_t$  para modelos de KNN, logrando una precisión del 98,1%. Con el uso de datos de GHI, esta mejora no es tan marcada para los modelos de MLP; sin embargo, sus resultados tienen una variabilidad considerablemente menor.

Se determina que el mejor algoritmo para trabajar es el K-Vecinos más Cercanos, entrenado con datos de Índice de Claridad ( $k_t$ ) con los siguientes hiperparámetros.

- métrica de distancia: euclidiana
- n de vecinos = 3
- pesos: en relación a la distancia

Hay que considerar que, debido a que el entrenamiento se realizó con un conjunto de datos perteneciente a una localización en particular, el algoritmo está adaptado a ese sitio en particular.

Por otro lado, hay que tener en cuenta que solo se usaron datos de GHI para el etiquetado de los datos. En algunos casos, las mediciones de GHI se pueden parecer mucho a las que habría en condiciones de cielo despejado si hay una cubierta de nubes que aumente la radiación difusa lo suficiente.

*Tabla 7: Resultados de los modelos con el conjunto de prueba*

|     | GHI   | Kt    |
|-----|-------|-------|
| MLP | 0.720 | 0.972 |
| KNN | 0.458 | 0.981 |

## CONCLUSIONES

Tras aplicar los mejores hiperparámetros obtenidos mediante la búsqueda en rejilla, se evaluó el desempeño final de los modelos utilizando el conjunto de prueba. Los resultados muestran que el uso de  $K_t$  como variable de entrada mejora significativamente el rendimiento, especialmente en el algoritmo KNN, que alcanzó una precisión del 98,1 %. En comparación, con datos de GHI, la mejora en el MLP no fue tan pronunciada, aunque el modelo presentó una menor variabilidad en sus resultados.

El análisis permite concluir que el modelo con mejor desempeño para esta tarea es el KNN entrenado con datos de  $K_t$ , configurado con métrica de distancia euclidiana,  $k=3$  vecinos y pesos inversamente proporcionales a la distancia. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que el entrenamiento se realizó con datos de una única ubicación, lo que hace que el modelo esté adaptado específicamente a las condiciones locales de Cerrillos, Salta.

Asimismo, se debe considerar que el etiquetado de los datos se basó únicamente en mediciones de GHI. En ciertos casos, condiciones de nubosidad pueden generar valores de GHI similares a los de cielo despejado, debido al aumento de la radiación difusa, lo que podría inducir a errores en la clasificación.

En síntesis, los resultados evidencian el potencial de los modelos de aprendizaje supervisado para la identificación de días de cielo claro, destacando la importancia de la selección de variables y el ajuste de hiperparámetros en la optimización del rendimiento.

## REFERENCIAS

- Abal, G., Alonso-Suárez, R., y Laguarda, A. (2020). *Radiación Solar: Notas del curso Fundamentos del Recurso Solar*. Laboratorio de Energía Solar, Uruguay, versión 4.0 edición.
- Beck, H. E., Zimmermann, N. E., McVicar, T. R., Vergopolan, N., Berg, A., y Wood, E. F. (2018). Present and future köppen-geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific Data*, 5(1):180214.
- Correa, L., Folini, D., Chtirkova, B., y Wild, M. (2022). A method for clear sky identification and long term trends assessment using daily surface solar radiation records. *Earth and Space Science*, 9.
- Cunningham, P. y Delany, S. (2007). k-nearest neighbour classifiers. *Mult Classif Syst*, 54.
- Duffie, J. y Beckman, W. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*. Ingeniería de la Energía. Wiley.
- Gueymard, C. A., Bright, J. M., Lingfors, D., Habte, A., y Sengupta, M. (2019). A posteriori clear-sky identification methods in solar irradiance time series: Review and preliminary validation using sky imagers. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 109:412–427.
- Ledesma, R. D., Salazar, G. A., y de Castro Vilela, O. (2023). Argp-v2 un modelo práctico para la estimación de irradiancia global horizontal en condiciones de cielo claro para sitios de altura. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente - AVERMA*, 26:283–289.
- Long, C. N. y Dutton, E. G. (2010). Bsrn global network recommended qc tests, v2. x.
- Moltoni, A., Clemares, N., Gorandi, E., y Moltoni, L. (2016). Enarsol. red de medición de radiación solar interconectada. En *III Congreso Argentino de Ingeniería y IX Congreso Argentino de la Enseñanza en Ingeniería*, Resistencia, Argentina.
- Olivas Soria, E. (2022). *Inteligencia artificial: Casos prácticos con aprendizaje profundo*. Ediciones de la U.
- Piccioni Costa, L., Guerreiro, M., Puchta, E., Tadano, Y., Antonini Alves, T., Kaster, M., y Siqueira, H. (2023). *Multilayer Perceptron*, p. 105.

## **ASSESSMENT OF MACHINE LEARNING ALGORITHMS FOR CLASSIFICATION OF CLEAR SKY DAYS**

**ABSTRACT:** The following work seeks to apply and compare different machine learning algorithms to the problem of identifying clear-sky days in solar radiation datasets, with the aim of evaluating their performance. A dataset from the town of Cerrillos, Salta, Argentina will be used to train different supervised learning algorithms (Multilayer Perceptron and K-Nearest Neighbors), implementing dimension reduction techniques (Principal Component Analysis), hyperparameter estimation (GridSearch), and finally, the results will be contrasted using a confusion matrix using precision as a performance metric.

**Keywords:** Solar Irradiance, GHI, Machine Learning, MLP, KNN



## **EL BIOGÁS COMO ESTRATEGIA DE TRANSICIÓN JUSTA EN COMUNIDADES RURALES VULNERABLES: ESTUDIO DE CASO EN LOS PINOS, ARGENTINA**

**Pablo Sánchez Macchioli**

Instituto de Estudios sobre la Ciencia y la Tecnología – Universidad Nacional de Quilmes.  
Roque Sáenz Peña 352, B1876 Bernal, Provincia de Buenos Aires. Tel.: 011 4365-7101  
psanchezmacchioli@uvq.edu.ar

**RESUMEN:** Este estudio analiza la implementación de una planta de biogás en Los Pinos, una comunidad rural de la Provincia de Buenos Aires afectada por problemas socioambientales. La localidad carece de acceso estable a gas y electricidad, además de sufrir contaminación por residuos agroindustriales, lo que configura un territorio en situación de vulnerabilidad. La investigación tuvo como objetivo principal evaluar cómo esta Planta Demostrativa de Biogás transforma un pasivo ambiental en una oportunidad para la autonomía energética comunitaria. Asimismo, se exploró su potencial para fomentar la integración social y contribuir a una transición energética justa. Mediante un enfoque cualitativo basado en un estudio de caso, se realizaron entrevistas a actores clave, observación participante y análisis documental. El proyecto, iniciado en 2015, derivó en la formación de la cooperativa responsable de gestionar la planta. Construido entre 2017 y 2022, el biodigestor procesa residuos agroindustriales para generar biogás, utilizado para abastecer a una bomba de agua potable comunitaria. En conclusión, la planta de biogás funciona como un nicho de innovación que trasciende lo tecnológico al impulsar una transición justa mediante: la participación activa de la comunidad, la conversión de pasivos ambientales en recursos y el desarrollo de capacidades locales.

**Palabras clave:** biogás, transición energética, vulnerabilidad, comunidad

### **INTRODUCCIÓN**

Los Pinos, un pueblo rural de 369 habitantes en el sudeste de la provincia de Buenos Aires (Partido de Balcarce), presenta un paisaje fragmentado y disperso, donde las viviendas se intercalan con terrenos baldíos y actividades de subsistencia, como la cría de cerdos y aves de corral. Paradójicamente, en las áreas circundantes predomina una relevante actividad agroindustrial, especialmente porcina y avícola, que constituye uno de los escasos motores económicos y fuentes de empleo en la zona. El pueblo surgió alrededor de 1900 gracias a la cercanía a una cantera y una estación de ferrocarril; el cierre de estas actividades precipitó su declive, sumiéndose en un proceso de desconexión y despoblamiento. Este fenómeno se agudizó por la falta de acceso a servicios esenciales como transporte, gas natural y recolección de residuos. Adicionalmente, la comunidad enfrenta serios problemas de contaminación derivados de la producción porcina y avícola local, los cuales impactan significativamente la salud de sus habitantes.

En este trabajo se analiza cómo la instalación de una Planta Demostrativa de Biogás, impulsada por la Universidad Nacional de Mar del Plata (UNMDP), CONICET, el INTA y una institución internacional de fomento, buscó transformar el problema ambiental de los residuos agroindustriales de Los Pinos en una oportunidad para la autonomía energética de carácter comunitario (Scheer, 2012). Este análisis se enmarca en debates críticos sobre transiciones justas, donde la energía no solo es un insumo, sino un vector de transformación territorial que articula actores diversos en la resolución de problemáticas sociales complejas. En este sentido, el concepto de "transición justa" (Jakob y Steckel, 2016) plantea la necesidad de armonizar dos dimensiones clave: por un lado, la adopción de regímenes sociotécnicos sostenibles (bajos en emisiones de gases de efecto invernadero) y, por otro, la equidad social,



garantizando que estos cambios reduzcan desigualdades y mejoren las condiciones de vida de las poblaciones en situación de vulnerabilidad.

Para comprender las dinámicas presentes en esta iniciativa, incorporamos la Perspectiva Multinivel (MLP) propuesta por Geels (2011). Este marco nos permite analizar cómo las innovaciones sostenibles emergen y se desarrollan en sistemas socio-técnicos complejos (Thomas, 2011). El éxito de este nicho, y su potencial para impulsar una transición energética más amplia, dependerá fundamentalmente de su capacidad para generar capacidades y aprendizajes, construir sólidas redes de apoyo, alinear nuevos actores y demostrar su viabilidad frente a las presiones del contexto macro. Esto incluye factores como la política macroeconómica, las regulaciones económicas o ambientales, y la comprensión social sobre el cambio climático como problema. La interacción entre los nichos, los regímenes dominantes y los contextos más amplios (Geels, 2011) es, por lo tanto, crucial para su desarrollo y eventual impacto transformador. Es importante destacar que las transiciones están intrínsecamente ligadas a combinaciones únicas de habilidades, capacidades, instituciones, normativas, actores y mercados presentes en un lugar o región particular (Boschma et al., 2017; Hidalgo et al., 2018). Por ello, cualquier análisis de estas dinámicas debe integrar necesariamente las especificidades locales, ya que solo así se podrá comprender plenamente su funcionamiento.

A través de este estudio de caso, el trabajo busca analizar las tensiones entre un modelo teórico de transición energética y las complejidades de un territorio afectado por el abandono estatal, el aislamiento geográfico y la debilidad de las estructuras comunitarias para resolver problemas locales. Específicamente, se propone explorar si una tecnología como la de una planta de biogás en una comunidad rural puede convertirse en un instrumento catalizador de integración social que simultáneamente resuelva problemáticas socioespaciales.

### ***Desafíos del Régimen Socio-técnico: Implicancias para el desarrollo del biogás***

Para el análisis de sistemas como el modelo agropecuario que predomina en la Región Pampeana, y que da marco a la problemática que se aborda a lo largo de este trabajo, se utiliza el concepto de régimen sociotécnico, que deriva de conceptualizaciones llevadas adelante principalmente por Geels (2002) a partir de los trabajos de Nelson y Winter (1982) y del constructivismo social de la tecnología propuesto por Bijker (1995). Un régimen socio-técnico se define como el conjunto estable de reglas, instituciones (formales e informales), valores culturales, y prácticas sociales y cognitivas que orientan y reproducen un sistema técnico determinado<sup>1</sup>.

En términos estilizados, un régimen socio-técnico está conformado por siete dimensiones interrelacionadas: tecnología, conocimientos científicos y tecnológico, prácticas de los usuarios, sentidos simbólicos, infraestructuras, estructura industrial, y políticas (Schot, 1998). En este sentido el término "socio-técnico" evita distinciones artificiales entre lo puramente social, lo tecnológico y lo económico, asumiendo que todos los elementos de un sistema están entrelazados, y se caracterizan por su estabilidad y resistencia al cambio (fenómeno conocido como *lock-in*), lo que explica por qué las transiciones hacia nuevos sistemas suelen ser lentas y de cierta dificultad.

El déficit en el suministro eléctrico que enfrentan muchos pueblos rurales de la provincia de Buenos Aires se inscribe en el régimen socio-técnico agropecuario dominante de la Región Pampeana. Este modelo se distingue por la producción extensiva, la centralidad de la explotación agroindustrial a gran escala y una acentuada concentración de la tierra, configurando un sistema primariamente orientado a la exportación de commodities agrícolas.

A partir de la década de 1990, la región pampeana fue testigo de una creciente concentración de la propiedad rural, lo que ha generado una notoria fragmentación intrarregional. Aunque el número de explotaciones agropecuarias disminuyó, su tamaño promedio en hectáreas se ha incrementado,

---

<sup>1</sup> Se utiliza el concepto socio-técnico con un guion en el medio, tal cual lo utiliza Thomas (2011), dado que a través del guion se enfatiza la relación de mutua constitución e igualdad jerárquica entre lo social y lo técnico, evitando que uno quede subordinado al otro.

dificultando significativamente el acceso a la tierra y la subsistencia para vastos segmentos de la población rural (Pengue, 2021). Si bien este modelo elevó la productividad, impulsando la producción bruta y los volúmenes de exportación, también fue responsable de un aumento considerable de las problemáticas ambientales (Lema, 2015; Pengue, 2020). Estas derivan, en gran medida, de la externalización social de los pasivos ambientales inherentes a las actividades agropecuarias, sobre la cual el régimen construye parte de su tasa de rentabilidad (TEEB, 2018).

Si bien este modelo genera actividad económica y divisas que son centrales para el país, también provoca disparidades regionales profundas en los territorios. Pueblos rurales como Los Pinos, que hasta hace unas décadas estuvieron integrados plenamente en las cadenas productivas regionales, quedaron cada vez más marginados de los beneficios de este régimen, padeciendo procesos significativos de despoblamiento y desinversión en infraestructuras sociales básicas, lo cual genera desafíos importantes en el acceso a servicios públicos y a oportunidades de desarrollo socioeconómico local.

Frente a las limitaciones que tiene el modelo agropecuario hegemónico, emergen y se consolidan alternativas productivas que buscan remediar las problemáticas que genera (Anderson, et al. 2021). Proyectos como el de Los Pinos, que impulsan la producción de biogás a partir de biodigestores de pequeña escala, representan una intención por demostrar que hay alternativas social y económicamente sustentables a la producción extensiva (Martí Herrero et al., 2016). Estas iniciativas no solo ofrecen soluciones energéticas descentralizadas, sino que también promueven la valorización de los subproductos agrícolas y ganaderos (en este caso la biomasa que generan los residuos de los establecimientos agropecuarios), a la vez que da cuenta de una problemática sanitario-ambiental (Nogar et al., 2019).

El biogás es una fuente de energía renovable cuya producción se basa en la digestión anaeróbica controlada. Este proceso ocurre en biodigestores, contenedores herméticamente cerrados donde microorganismos degradan materia orgánica en condiciones anóxicas (Decunto y Caballero, 2022). La actividad microbiana sobre diversas biomásas (como excrementos de aves y ganado, o restos de cultivos) genera un gas con elevado contenido de metano y dióxido de carbono. Dicho gas puede emplearse directamente para producir calor y electricidad, o someterse a un proceso de mejora para transformarse en biometano, apto para ser inyectado en redes de gas natural o para la síntesis de productos químicos de valor (Barasa Kabeyi y Olanrewaju, 2022; Bres et al., 2021).

La relevancia del biogás reside en su significativa capacidad para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero, lo que lo convierte en un elemento clave en la transición energética mundial hacia sistemas eléctricos de bajo impacto ambiental y en el avance de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente en la provisión de energía limpia (Barasa Kabeyi y Olanrewaju, 2022; Cristiano y Buitrago, 2020; Di Paola, 2013, Tobares, 2013). Más allá de la generación energética, la digestión anaeróbica ofrece como resultado y valor añadido de tratar la materia orgánica un líquido (que se denomina digerido) que funciona como fertilizante orgánico. Esto no solo impulsa una economía circular y una gestión más eficiente de los residuos, sino que también ofrece beneficios técnicos concretos: aunque su poder calorífico fluctúa según la concentración de metano, un metro cúbico de biogás equivale aproximadamente a 0.5-0.6 litros de diésel o 6 kWh de electricidad. Su transformación en electricidad, frecuentemente mediante motores de combustión interna, es económicamente viable, consolidando al biogás como un recurso fundamental para la integración de las comunidades rurales e industrias en la transformación del panorama energético (Barasa Kabeyi y Olanrewaju, 2022).

Al utilizar residuos orgánicos generados por actividades productivas locales, se reduce la dependencia de fuentes energéticas centralizadas, al mismo tiempo que se minimiza el impacto ambiental de los residuos orgánicos (Tobares, 2013). Más allá de la generación eléctrica, la implementación de tecnologías basadas en biogás tiene el potencial de revitalizar economías de pueblos rurales, promover la generación de empleo y mejorar la calidad de vida de las comunidades. Este tipo de proyectos no solo apuntan a abordar las dinámicas de pobreza energética presentes, sino que también contribuyen a la sustentabilidad de los sistemas productivos rurales, a diversificar los ingresos, promover el empleo y la autonomía tecnológica frente a las dinámicas excluyentes que plantea, de forma casi exclusiva, el modelo agropecuario dominante (García Ochoa, 2014).

La implementación de biodigestores emerge como una opción particularmente viable para comunidades rurales aisladas y de bajos ingresos. Esto constituye una de las principales soluciones promovidas por diversos organismos internacionales en su lucha contra la pobreza energética y en línea con el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 7: Energía Asequible y No Contaminante. Sin embargo, la sostenibilidad de estos proyectos no solo depende del financiamiento inicial y las condiciones técnicas locales, como el tipo de residuos disponibles y las temperaturas de operación, sino también de una presunción que resulta crítica: la disponibilidad gratuita de la materia prima. Este supuesto se ve desafiado cuando productores de gran escala reconocen que sus residuos tienen valorización en el mercado, lo que puede generar presiones sobre el acceso y uso de estos subproductos. La viabilidad a largo plazo de los biodigestores en estos contextos obliga a plantear interrogantes sobre el costo de la materia prima y la logística de transporte si las condiciones iniciales de gratuidad cambian, exigiendo una evaluación continua de su sostenibilidad frente a dinámicas productivas cambiantes.

En este escenario, el régimen socio-técnico existente presenta desafíos significativos, ya que sus relaciones, instituciones y prácticas refuerzan interdependencias y generan mecanismos de bloqueo (lock-in) que obstaculizan el desarrollo de innovaciones, como el caso del biogás. Para la expansión de los biodigestores, estos obstáculos se manifiestan principalmente en: altos costos iniciales (que abarcan desde estudios de viabilidad y diseño hasta la construcción, operación y mantenimiento), barreras de financiamiento para proyectos no exclusivamente lucrativos, y marcos regulatorios cambiantes que, en contextos como el de Argentina, no siempre favorecen el desarrollo de este tipo de iniciativas.

## **METODOLOGÍA**

La presente investigación emplea un abordaje cualitativo, estructurado en torno a un estudio de caso centrado en la planta de biogás de Los Pinos. Este diseño se justifica por la necesidad de una comprensión profunda de las dinámicas y procesos inherentes a una transición energética sostenible a nivel local. La flexibilidad inherente al diseño cualitativo, o "diseño interactivo" (Maxwell, 1996), permitió adaptar las estrategias de recolección de datos a las particularidades del fenómeno, optimizando la captura de información relevante a lo largo del trabajo de campo.

La selección de la planta de biogás en Los Pinos como caso de estudio se fundamentó en su relevancia para comprender los desafíos y oportunidades de la transición energética en un contexto local específico. Si bien la accesibilidad al sitio y a los actores clave fue un factor relevante, la elección principal radicó en la posibilidad de analizar una iniciativa concreta de generación de energía renovable y su interacción con la comunidad y el entorno productivo. La planta de biogás de Los Pinos se constituyó en un caso pertinente al involucrar la gestión de residuos agroindustriales y la generación de energía con un potencial impacto positivo en la comunidad y el ambiente local.

Para una comprensión integral del caso y la aplicación de los marcos analíticos, se empleó una estrategia de triangulación intrametodológica, combinando diversas técnicas cualitativas de recolección de datos: entrevistas, observación participante y análisis de documentos. Esta combinación permitió confrontar la información obtenida desde múltiples perspectivas, logrando una visión más acabada del fenómeno.

Se realizaron un total de diez entrevistas a diversos actores clave involucrados en el proyecto de la planta de biogás. El muestreo se llevó a cabo bajo el criterio de muestreo teórico (Glaser y Strauss, 1967), donde el número de entrevistas se determinó por la saturación de la información, es decir, cuando la realización de entrevistas adicionales ya no aportaba una mayor comprensión del fenómeno. Los grupos de entrevistados incluyeron a funcionarios de gestión de la Universidad Nacional de Mar del Plata (UNMDP), directora de grupo de investigación, investigadores y extensionistas de la UNMDP/INTA, así como a vecinos-interlocutores y cooperativistas de Los Pinos.

Finalmente, se recopiló y analizó una amplia gama de documentos, para complementar con las entrevistas y la observación participante. Estos incluyeron artículos de investigación y presentaciones en congresos desarrollados por los investigadores involucrados y documentos institucionales. Asimismo, se consultaron sitios web institucionales de la UNMDP, de empresas de provisión de

servicios públicos, y de organismos vinculados al caso, junto con artículos periodísticos y sitios web de noticias. El grueso de las entrevistas fue realizado en el año 2019 (en el marco de mi tesis doctoral que fue publicada en 2024), y el trabajo se complementó con una nueva entrevista realizada en el año 2025 con la directora del proyecto, y con la consulta con fuentes de información actualizadas del mismo año.

## **PRESENTACIÓN DEL CASO LOS PINOS**

El pueblo de Los Pinos se encuentra ubicado en el Partido de Balcarce, Provincia de Buenos Aires, a 15 km de la ciudad de Balcarce. El pueblo surgió en el año 1900 al iniciarse la actividad productiva en dos canteras ubicadas en el Cerro San Agustín que producían minerales para la construcción. A partir de ese momento se comenzaron a lotear terrenos para la radicación de viviendas en las inmediaciones del cerro. En el año 1907 se inauguró una estación de ferrocarril en Los Pinos, que se utilizaba para el transporte de cereales, ganado y pasajeros, lo cual ayudó a dinamizar la economía y demografía del pueblo. Para mediados del siglo XX Los Pinos contaba con cerca de 5000 habitantes.

A partir del cierre de la cantera, que era la principal fuente de trabajo de la región, y del levantamiento del ferrocarril en los años 1990, comenzó un proceso de despoblamiento muy significativo. En la actualidad, Los Pinos cuenta con una población de tan solo 369 habitantes (INDEC, 2022). Esta localidad enfrenta un contexto socio-ambiental complejo: su tejido urbano se caracteriza por la coexistencia de viviendas dispersas y terrenos baldíos donde algunos residentes practican actividades de subsistencia, principalmente cría de cerdos y aves de corral. La inadecuada disposición final de los residuos orgánicos que generan provoca la acumulación de desechos, lo que a su vez causa malos olores y una marcada proliferación de moscas que afectan a todos los vecinos (Agrofy News, 2022; Portal web 0223, 2014).

En contraste, la dinámica actividad agroindustrial circundante (dominada por la producción porcina, tampera, bovina y avícola) genera significativos problemas sanitarios y ambientales. Como comenta una de las vecinas y cooperativistas de Los Pinos: “el intendente había elegido llevar adelante el proyecto en Los Pinos por el problema ecológico de la cría de animales domésticos en malas condiciones que provocan la invasión de moscas, malos olores, acumulación de basura, suciedad, faenamiento casero, entre otras cuestiones. Conviven en sus casas las familias con niños, perros, chanchos, gallinas, vacas, corderos, no juntan la bosta ni la suciedad, no los sacan a pastar, conviven todos en malas condiciones” (Entrevista N.º 6, comunicación personal, 20 de enero de 2019).

En el Partido de Balcarce, el sector agropecuario constituye el 38,2% del Producto Bruto Geográfico (Dirección Provincial de Estadística, 2024), lo que subraya la importancia de esta actividad en la región. En Los Pinos, la actividad agroindustrial resulta dominante, aunque es importante destacar que, dado que las estadísticas provinciales presentan datos desagregados solamente a nivel de Partido, no se dispone de información oficial sobre la distribución de las actividades económicas dentro de cada localidad o pueblo. De acuerdo con la directora del proyecto de la Planta de Biogás, la principal actividad económica de la zona en la actualidad son los tambos y los feedlot (Entrevista N.º 9, comunicación personal, 15 de agosto de 2025).

Paradójicamente, estos mismos residuos, ricos en materia orgánica, representan una abundante fuente de biomasa con un valioso potencial para la generación de bioenergía. Sin embargo, Los Pinos sufre de intermitencia en la provisión de electricidad y carece de acceso a la red de gas natural. La obtención de este último servicio ha sido un anhelo histórico para sus habitantes, como lo expresa un vecino: “El problema que tenemos es el problema del gas, que no tenemos. Tenemos tubos, garrafas y leña... si pudiéramos empezar con el biogás por lo menos para calefacción sería lo ideal” (Entrevista N.º 5, comunicación personal, 15 de enero de 2019).

Estas deficiencias en la provisión de servicios básicos, comunes en gran parte de los pueblos rurales del país, impactan negativamente en diversos indicadores socioambientales, configurando lo que denominamos un territorio vulnerable. Esta noción se refiere a un espacio social con recursos económicos, políticos, cognitivos y simbólicos muy limitados para enfrentar problemas de gran escala y complejidad. La vulnerabilidad, en estos espacios, adquiere una apariencia de “territorio en

insularización” (Soldano, 2011), el cual cuenta con características peculiares. Sus habitantes tienen problemas extendidos de acceso a empleos de calidad, y por ende a la generación de ingresos. Además, poseen una capacidad disminuida para acceder a bienes básicos y cuentan con problemáticas para movilizarse a otros barrios o sectores de la ciudad, aspecto que les da esta característica de estar insularizados, o aislados. Estos espacios con carácter de insularización, a su vez, generan en sus habitantes fuertes condicionamientos en sus formas de sociabilidad, y por ende en la circulación de conocimiento y la capacidad de generar nuevas disposiciones de uso del espacio.

Las condiciones sociohistóricas de la localidad han operado como un factor limitante para el desarrollo de acciones colectivas. A pesar de haber logrado elegir un delegado en la Municipalidad de Balcarce en 2016, Los Pinos presentaba una marcada ausencia de organizaciones de base o espacios de articulación locales que dificultaba la canalización de esfuerzos comunitarios. En un contexto de crisis económica, falta de empleo, desinversión en infraestructura y un significativo despoblamiento (la población disminuyó un 93% desde la década de 1950, INDEC, 2022), el pueblo atraviesa un proceso de aislamiento sostenido, profundizada a partir de la suspensión del servicio ferroviario que lo conectaba regionalmente.

### ***Gestación del proyecto de una Planta Demostrativa de Biogás***

El proyecto de la Planta Demostrativa de Biogás se originó en el año 2015, cuando un grupo de investigación de INTA y la UNMDP (perteneciente al Laboratorio de Biomasa y Bioenergía del Instituto de Innovación para la Producción Agropecuaria y el Desarrollo Sostenible, IPADS) obtuvo un subsidio internacional que habilitó su desarrollo. Este financiamiento fue otorgado por el Instituto Wuppertal a través de su programa “Biogas Demonstration Unit for the sustainable rural energy development in humid Pampas of Argentina”, destinado a fomentar la aplicación de energías renovables en países con escaso desarrollo relativo.

El objetivo principal del financiamiento no se limita a la implementación de proyectos, sino que abarca también la evaluación de la viabilidad de la diseminación del biogás en América Latina. Como señala la directora del proyecto, la meta es: “Al fin del camino, saber si es viable la diseminación de biogás en América Latina. Si no es viable por qué, por qué fracasan, cómo hacer para que esos proyectos no fracasen. Tienen seria voluntad de que las cosas funcionen, pero lo que están haciendo es evaluar si funcionan, ellos persiguen su propio objetivo” (Entrevista N.º 1, comunicación personal, 9 de enero de 2019).

Esta aproximación se alinea con la visión del Instituto Wuppertal, una institución destacada en el ámbito de la transición energética, que concibe la sostenibilidad no solo desde la innovación tecnológica, sino también desde las innovaciones sociales que dan sostén a los procesos de cambio tecnológico que impulsan. En este sentido es que financian el establecimiento de nichos de innovación que puedan demostrar si los proyectos, más allá de las dimensiones tecnológico-productivas, pueden sostenerse socialmente al fomentar procesos de apropiación social del conocimiento, y la creación de redes de aprendizaje conjunto en distintas escalas.

Es importante destacar que la localización efectiva del proyecto no había sido determinada previamente; la decisión de implementarlo en Los Pinos surgió a partir de una articulación institucional con el Municipio de Balcarce una vez que se consiguieron los fondos. La sugerencia del intendente fue decisiva, de acuerdo con la directora: “El intendente me dijo: el lugar es Los Pinos, la gente se siente abandonada, tenemos unos problemas de contaminación, el ingreso per cápita es mucho menor, andá a Los Pinos, yo te banco en Los Pinos” (Entrevista N.º 1, comunicación personal, 9 de enero de 2019).

Esta “sensación de abandono” entre los residentes se fundamentaba en la ausencia de respuestas políticas efectivas a problemáticas socio-ambientales críticas. Particularmente, la falta de control sobre la cría de cerdo en algunos domicilios, que resultaba en la acumulación de excrementos animales dentro del ejido urbano. A ello se sumaba la inexistencia de sistemas de tratamiento de efluentes y residuos por parte de las actividades agroindustriales predominantes en la zona, las cuales volcaban sus desechos al aire libre.

Esta práctica generaba una significativa proliferación de moscas, malos olores y una contaminación generalizada que afectaba directamente la calidad de vida y la salud de la población local. En relación con esto una vecina de Los Pinos señalaba: “Ahora estamos armando una carta desde la cooperativa para la municipalidad, que ya no podemos vivir así, porque cada vez hay más producción de animales para el autoconsumo. Como no hay reglamento ni orden acá unos vecinos trajeron 60 ovejas por allá, 15 cerdos por allá y esto va creciendo... pronto vamos a ser más animales que personas, no puede ser. Acá enfrente hay un criadero de cerdos y cuando el viento sopla para este lado, viene todo el olor a nuestra vereda. Pedimos que lo saquen, pero vas a hablar con el dueño y te dice que la pensión no le alcanza y se tiene que dedicar a eso” (Entrevista N° 4, Comunicación personal, 16 de enero de 2019).

El inicio del proyecto de construcción del biodigestor en Los Pinos fue precedido por un proceso de interacción entre los investigadores del INTA y vecinos del pueblo, para promover la sensibilización y creación de consensos con los pobladores. Fue así cómo se gestaron distintos encuentros para presentar el proyecto con una participación inicial limitada, pero el interés comunitario creció progresivamente. Este incremento en la adhesión fue facilitado a partir de la participación de investigadores del área de Sociales de la UNMDP, especializados en cooperativismo, quienes colaboraron con los técnicos del INTA aportando su experiencia en herramientas de transferencia y comunicación comunitaria (Echarte y Ischia, 2022).

Un requisito marcado por el Instituto Wuppertal para el financiamiento y la operación de la unidad demostrativa era la necesidad de desarrollar o fortalecer las capacidades locales, particularmente en lo que respecta a la gestión y el mantenimiento de la planta. Esta exigencia motivó a los investigadores a promover la creación de una cooperativa en el pueblo, concebida como un dispositivo de gestión innovador. Este modelo permitiría fomentar el aprendizaje técnico, la construcción colectiva de soluciones y la autogestión ante problemáticas locales. En un contexto como el de Los Pinos, sin una tradición extendida de organización local, la cooperativa se presentó como un mecanismo atractivo para institucionalizar los espacios de vinculación entre los vecinos y despertar el interés comunitario.

La cooperativa fue concebida conjuntamente por los investigadores y los vecinos como un espacio de interacción destinado a convertirse en un interlocutor legítimo entre la comunidad y las instituciones participantes. Esta posición le permitiría movilizar la participación comunitaria y facilitar la articulación institucional con la universidad, así como con otros actores estatales y privados. Fue así como en septiembre de 2017 se constituyó entre los vecinos de Los Pinos la Cooperativa de Producción, Servicios y Consumos de Los Pinos Ltda., con 25 socios fundadores, entre ellos el delegado municipal. Esta entidad estaba pensada para asumir la responsabilidad del suministro de biogás y/o electricidad, la comercialización de los subproductos del proceso y, fundamentalmente, la operación, mantenimiento y administración de la Unidad de Biogás, una vez que la misma pudiera ser puesta en funcionamiento, consolidando así un modelo de gestión asociativa y comunitaria. Al respecto de esto comenta uno de los miembros de la cooperativa: “Ellos nos dicen: acá la cosa es que esto sea administrado por la misma comunidad, por un grupo de vecinos. Nunca va a ser ni estatal ni privado, va a ser de ustedes. Se tienen que organizar de una manera para poder administrarlo y que funcione (Entrevista N°6, comunicación personal, 16 de enero de 2019).

A partir de una serie de talleres y encuentros entre el Grupo de Investigación y los vecinos, se decidió que la cooperativa incluiría también actividades no vinculadas estrictamente a la operación de la planta de biogás. Estas acciones abarcaron desde la educación ambiental hasta la recaudación de fondos para autofinanciar la cooperativa hasta que la planta estuviera operativa. Para ello, se articularon diversas estrategias e intervenciones, como propiciar el involucramiento de otros proyectos de extensión de la UNMDP, particularmente de la Facultad de Ciencias Económicas y Sociales, con el objetivo de colaborar en la gestión cooperativa y en la formación de sus integrantes en temáticas relacionadas a emprendimientos sociales y ambientales.

Desde la universidad, entonces, se percibió la necesidad de realizar un proceso de mediación y construcción de lazos para convencer a la comunidad de la idoneidad de la propuesta. Estas acciones tenían por objetivo garantizar que el proyecto pudiera llevarse a cabo con un alto grado de legitimidad por parte de los futuros usuarios de la intervención. En palabras de la directora del proyecto: “Había conflictos transversales, estaba la pelea entre nuevos y viejos vecinos, pero dentro de la cooperativa eso



no existe más. Estaba la pelea entre los pros y los contras animales, mucha gente cría animales en el fondo de la casa. Hay gente que quiere terminar con eso y otros que dicen, toda la vida Los Pinos fue un pueblo donde la gente tenía un gallinero, el chiquero en el patio. Tenés pro y contra en todo, pero en la cooperativa todo eso se zanjó, el nuevo y el viejo vecino son amigos, porque venimos laburando y encontraron que en algunas cosas están de acuerdo y en otras en desacuerdo, pero reman todos para el mismo lado (Entrevista n°5, comunicación personal, 9 de enero de 2019).

Para esto, es crucial destacar que la adopción o apropiación del conocimiento científico depende directamente de la credibilidad y confianza que generan los científicos o investigadores en el medio donde se desenvuelven. El grado de esta confianza no es un valor dado, sino que es contingente a las relaciones sociales y espaciales presentes en el territorio (Wynne, 1992). De esta forma, se evidencia hasta qué punto los esquemas interpretativos de quienes participan en las interacciones se nutren de elementos normativos, materiales y también simbólicos, lo que les permite adoptar nuevas disposiciones y encontrar nuevos sentidos para la acción. Como comentaba una de las cooperativistas: "Tenemos mucho para trabajar en Los Pinos, la idea de la cooperativa no es solamente lo del biogás, hay que poner en orden muchas cosas, hay que ver que la gente se interese en arreglar problemas" (Entrevista N° 4, comunicación personal, 15 de febrero de 2019).

### ***Construcción de la unidad demostrativa de biogás***

El comienzo de este proyecto impulsó una compleja red de interacciones entre actores de distintas esferas y escalas. Por un lado, el sistema científico desempeñó un rol fundamental, abarcando instituciones como el INTA, CONICET, la Universidad Nacional de Mar del Plata y el INTI; a nivel provincial aparece la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires; por otro lado, el Instituto Wuppertal de Alemania. Otro actor de centralidad lo constituyó la comunidad rural de Los Pinos, incluyendo tanto a los vecinos miembros de la Cooperativa, como a productores porcinos y avícolas locales (Decunto, 2019; Echarte y Ischia, 2022).

Desde un principio existieron ciertas reticencias en varios vecinos que participaron de las reuniones iniciales donde se presentó el proyecto. En relación con esto una cooperativista comentaba: "la desconfianza de los vecinos hacia el proyecto de biogás tuvo que ver al principio por la baja asistencia a las primeras reuniones informativas, ya que la comunicación a través de afiches no era clara, y la participación en un sistema de cooperativa era algo completamente nuevo para nosotros. Más tarde aparecieron algunos conflictos con los vecinos que participaban: por un lado, la deuda en las cuotas sociales llevó a algunos socios a dejar de asistir a las reuniones. Y después otras cosas que por ahí ya te digo, por esto de no conocernos te empezás a tratar ahí en la reunión, te empezás a conocer y había una persona que no nos gustaba tanto, por el tema violencia. Nos empezamos a dar cuenta que la forma de hablar de él no nos gustaba. Si la cooperativa está dentro del pueblo tenemos que hacer todo en paz y tranquilo pero este muchacho como que quería hacer todo, abarcar todo, y a veces hablaba en forma violenta. A la hora de votar no lo votamos, y dejó de participar" (Entrevista N° 3, comunicación personal, 16 de enero de 2019). Otra de las participantes de la cooperativa señalaba: "Que en Los Pinos haya una cooperativa formada por vecinos cuando no teníamos ni idea lo que era una cooperativa, no teníamos ni idea de lo que teníamos que hacer. Cada reunión era mirarnos sin saber cuál era el paso siguiente porque no teníamos ni idea. Pero así todo, paso a paso. Porque no sabemos mañana para dónde salimos" (Entrevista N° 7, comunicación personal, 20 de enero de 2019).

Desde el ámbito gubernamental participaron la Delegación Municipal de Los Pinos y el Municipio de Balcarce, además de organismos nacionales como la AABE y la empresa Ferrosur Roca, que cedieron un terreno de 750 m<sup>2</sup> para la instalación de la Unidad Demostrativa. Finalmente, el sector privado estuvo representado por empresas como Wemar S.R.L., que llevó adelante la obra civil, y BAGSA S.A., que fue responsable del diseño de la red de gas y de la normativa correspondiente (aunque luego no se terminara construyendo); y también la empresa McCain Argentina S.A., que proveyó financiamiento esencial para la finalización de la construcción del biodigestor, a partir de un convenio de colaboración con el INTA (Entrevista N° 9, comunicación personal, 15 de agosto de 2025).

Frente a las reticencias iniciales en el pueblo, el grupo de investigación tomó decisiones estratégicas respecto al diseño tecnológico de la planta de biogás. Se prestó especial atención a la escala del proyecto al seleccionar la tecnología más adecuada. Una de las opciones consideradas fue la construcción de un biodigestor de plástico (conocido popularmente como biodigestor "salchicha"). No obstante, para fomentar el involucramiento de la comunidad local, la directora comentaba que se optó por una solución constructivamente más costosa, pero que era percibida como más "robusta y confiable" (Entrevista N°1, comunicación personal, 9 de enero de 2019). Este enfoque priorizó la percepción de solidez constructiva por sobre la reducción de costos, buscando así generar mayor impacto y participación de los vecinos.

La elección de una tecnología más "vistosa" por parte del grupo de investigación buscaba asociar la construcción del biodigestor a la creación de un emblema visible en el espacio local. Este componente sería clave para generar un impacto simbólico que trascendiera su materialidad concreta. De este modo, se pretendía que la planta de biogás proyectara una imagen de mayor credibilidad, con el fin de movilizar la voluntad de participación de los vecinos y propiciar así la apropiación social del proyecto.

La construcción del biodigestor comenzó en el año 2017 y se finalizó en el año 2022. La planta de biogás en cuestión se caracteriza por ser un biodigestor de concreto de tipo "tanque agitado" con una capacidad de 100 metros cúbicos. Su diseño permite la digestión anaeróbica de materia orgánica, principalmente de los residuos provenientes de una granja avícola ubicada a menos de 800 metros de la planta, sumada a descartes de papa de que provienen de la planta de McCain, ubicada en la Ruta 226, a la altura del Km. 61 (cercana a uno de los accesos a la ciudad de Balcarce). Dado que se trata de una planta demostrativa, la capacidad de procesamiento de residuos es reducida: para el caso de la granja avícola, el biodigestor tiene la capacidad de procesar un décimo de sus residuos diarios (Entrevista N° 9, comunicación personal, 15 de agosto de 2025).



*Imagen N° 1: Fotografía del biodigestor instalado en Los Pinos, Partido de Balcarce.*

*Fuente: Infocielo.com (2022). La historia de la planta de biogás que dará energía a un pueblo bonaerense.*

El biodigestor tiene unas dimensiones de 6 metros de diámetro y 3,60 metros de altura, y está concebido para operar en un rango de temperatura de 30 a 35°C. Como resultado de este proceso se genera biogás, compuesto principalmente por metano y dióxido de carbono, con una capacidad de producción potencial de entre 50 y 60 m<sup>3</sup>/día o hasta 25 kWh de potencia. Además de la energía, la digestión produce un subproducto líquido denominado biofertilizante (o "digerido"), cuya comercialización podrá generar recursos económicos destinados al desarrollo de iniciativas comunitarias, fortaleciendo así la gestión local y la sustentabilidad económica del proyecto (infocielo.com, 2023).

La operación exitosa del biodigestor en Los Pinos depende de la constancia en la provisión y la calidad de la materia prima. Inicialmente, uno de los primeros proveedores fue una granja porcina ubicada a 800

metros. Sin embargo, esta fuente presentó problemas, ya que gran parte de los residuos generados no eran aptos para la digestión anaeróbica debido a las impurezas que contenían los excrementos al ser manejados en suelo. Tras el cierre de esta granja, el proyecto debió incorporar a McCain (empresa que colaboró financieramente en 2022 para la finalización de la Planta de Biogás) como proveedor de descartes de papa. Este residuo agroindustrial constituye en la actualidad más del 90% de la materia prima que se procesa en la planta (Entrevista N° 9, comunicación personal, 15 de agosto de 2025).

Este aporte se complementa con aproximadamente 150 kg diarios de gallinaza de una unidad avícola próxima, lo que representa solo el 1% de las 15 toneladas que esta produce diariamente (Decunto, 2019). Para asegurar el suministro continuo, la Cooperativa generó un acuerdo de provisión informal con ambos productores. Asimismo, el INTA mantiene una comunicación periódica y brinda asistencia técnica para garantizar la estabilidad en la composición de los sustratos, solicitando a los productores que informen sobre el uso de antibióticos o cambios en la dieta animal, aspectos cruciales para el óptimo funcionamiento del biodigestor (Decunto, 2019).

Desde su puesta en marcha en 2022, la Unidad Demostrativa de Biogás en Los Pinos ha avanzado en la estabilización del proceso de biodigestión y el tratamiento de residuos agropecuarios, una fase crítica operada por un personal técnico del INTA para optimizar la producción. Paralelamente a la generación de biogás (en el orden de los 30 o 40 m<sup>3</sup>/día), que actualmente se gestiona mediante quema controlada por antorcha, la cooperativa se enfoca en completar los requisitos burocráticos y técnicos pendientes, como la aprobación de normativa de la empresa Aguas de la Ciudad, que provee el servicio de agua potable de Balcarce, necesarios para integrar la energía eléctrica del biodigestor a la bomba de agua potable comunitaria (Entrevista N°9, comunicación personal, 15 de agosto de 2025).

Este período de ajuste logístico no detiene la producción del digerido (subproducto líquido), el cual representa un recurso de gran potencial económico para la cooperativa, cuya explotación comercial es una prioridad estratégica (Echarte e Ischia, 2022). A diferencia del biogás, cuya utilización principal es meramente local para la generación de electricidad (o para un futuro uso domiciliario, de aumentar su escala) el digerido, si es acondicionado y transformado en fertilizante, puede ser envasado y comercializado más allá de los límites locales de Los Pinos, convirtiéndose así en un producto comercializable que tiene el potencial de generar ingresos adicionales para la comunidad.

## CONCLUSIONES

El biodigestor fue concebido como una unidad demostrativa de producción comunitaria para ser gestionado cooperativamente. Esta configuración lo posiciona, desde su origen, como un proyecto que se aparta del régimen socio-técnico agropecuario dominante al proponer una forma alternativa de producción y gestión. Estas características lo sitúan como un nicho de innovación: un entorno protegido que permite la experimentación y el desarrollo de prácticas y tecnologías novedosas, libre de las presiones del régimen establecido, y con el potencial de transformar las trayectorias socio-técnicas predominantes en el sector agropecuario. Es crucial destacar su componente demostrativo: dada su escala, esta planta de biogás no busca remediar de manera sustantiva los problemas ambientales o de empleo locales. Su función principal reside en verificar la viabilidad de esta tecnología en el medio rural pampeano. Además, su modularidad permite escalar el proyecto a futuro, en la medida que se consiga el financiamiento adecuado.

La gestión comunitaria inherente a este proyecto es, en sí misma, una parte integral de la innovación del nicho, lo que lo diferencia de otras iniciativas meramente tecnológicas y fortalece su potencial de replicabilidad en otros contextos. El caso permite observar la importancia de conformar espacios de interacción sostenida entre las instituciones científicas, las agencias de financiamiento, el sector productivo, los actores estatales y los vecinos. Estos espacios de colaboración son indispensables para sostener los procesos de aprendizaje mutuo que garantizan la consolidación del proyecto en el tiempo. La transformación principal, tal como la concibieron los investigadores que gestaron el proyecto, se centró en dos ejes: por un lado, la revalorización de la participación comunitaria en la gestión de unidades productivas complejas; por otro, la utilización, transformación y valorización de pasivos ambientales. Esto contribuye a solucionar problemas ambientales y sanitarios, además de generar

empleo y mejorar la provisión de servicios públicos. En este sentido, el proyecto se alinea con la conceptualización de "transición justa", ya que incorpora tanto la sostenibilidad (al reducir las emisiones de carbono) como la equidad social (al promover el empleo local y la creación de capacidades comunitarias).

En este contexto, la planta de biogás no representa una innovación tecnológica en términos productivos o técnicos, dado que es una tecnología conocida e implementada ampliamente. Sin embargo, su relevancia radica en funcionar como el disparador de situaciones de interacción e intercambio de conocimientos que involucran a actores locales, regionales, nacionales e internacionales. El objetivo, en definitiva, es avanzar en un proyecto que plantea la transición energética sostenible como un horizonte de posibilidad en un escenario de fragmentación y vulnerabilidad territorial, para lo cual es indispensable el involucramiento de los vecinos y la configuración de nuevas relaciones sociales dentro de la comunidad.

La creación de una cooperativa en una localidad que experimenta significativos niveles de desigualdad espacial y procesos de insularización sostenida (consecuencia directa del despliegue del régimen agropecuario dominante) representa una iniciativa fundamental para revertir estas dinámicas. Este modelo asociativo no solo busca mitigar el aislamiento o resolver problemáticas ambientales y productivas, sino que genera un espacio de aprendizaje para sus habitantes, impulsando el desarrollo de nuevas habilidades técnicas y disposiciones cognitivas indispensables para fomentar procesos de autogestión comunitaria.

Este modelo de innovación basado en la gestión cooperativa podría inspirar o ser adaptado en otros contextos rurales que enfrentan desafíos similares. Sin embargo, su éxito para una difusión más amplia dependerá de la capacidad de mantener ciertas condiciones de protección que permitieron su emergencia, así como de identificar y adaptar los elementos clave de su gestión cooperativa comunitaria y su enfoque en la valorización integral de recursos. Explorar cómo este tipo de nichos puede "salir" de su entorno inicial para influir en el régimen más amplio constituye un aporte fundamental para la agenda de investigación en transiciones hacia la sostenibilidad.

La replicabilidad de estas iniciativas, más allá de la experticia técnica y la participación activa de los actores intervinientes, depende de contar con mecanismos de financiamiento significativos y flexibles que se alineen con la naturaleza no lineal de los procesos de aprendizaje colectivos. Este apoyo financiero debe ser capaz de integrar elementos emergentes, absorber los costos operativos derivados de problemáticas imprevistas, y adaptarse a contextos cambiantes. Dicha adaptabilidad es especialmente crítica en territorios de alta vulnerabilidad social, donde las exigencias contextuales generan presiones operativas y sobrecargas inesperadas para los equipos de investigación y gestión.

Finalmente, la experiencia de la Planta Demostrativa de Biogás en Los Pinos, más allá de su propósito de configurarse en solución energética y ambiental local, debe entenderse como un nicho para la generación de conocimiento comunitario. Este proyecto no solo demostró la viabilidad técnica de la unidad y las posibilidades de provisión de energía en un contexto de vulnerabilidad social, sino que operó como un laboratorio de desarrollo de habilidades y competencias para todos los actores involucrados. Los conocimientos adquiridos sobre la gestión de residuos en entornos rurales, la articulación efectiva entre académicos, vecinos, organizaciones y funcionarios, así como la adaptación a las particularidades locales, constituyen un insumo fundamental para replicar y escalar iniciativas similares en otros lugares con problemáticas análogas, destacando que el verdadero potencial de estos nichos reside en su capacidad para fomentar procesos de aprendizaje y así impulsar futuras transiciones hacia la sostenibilidad.

## REFERENCIAS

Agrofy News (2022, 6 de octubre). Los Pinos: el pueblo que apostó por la energía renovable e instaló un biodigestor comunitario. Agrofy News. <https://news.agrofy.com.ar/noticia/201740/pinos-pueblo-que-aposto-energia-renovable-e-instalo-biodigestor-comunitario>

- Anderson, K.; Bruil, J.; Jahi Chappell, M.; Kiss, C. y Pimbert, M. P. (2021). *Agroecology Now! Transformations towards More Just and Sustainable Food Systems*. ISBN 978-3-030-61314-3 ISBN 978-3-030-61315-0 (eBook).
- Barasa Kabeyi, M. J. y Olanrewaju, O. A. (2022). Biogas Production and Applications in the Sustainable Energy Transition. *Journal of Energy*, <https://doi.org/10.1155/2022/8750221>
- Bijker, Wiebe (1995). *Of Bicycles, Bakelites, and Bulbs. Toward a Theory of Sociotechnical Change*, The MIT Press, Cambridge.
- Boschma, R., Coenen, L., Frenken, K., y Truffer, B. (2017). Towards a theory of regional diversification: combining insights from Evolutionary Economic Geography and Transition Studies. *Regional Studies*, 51(1), pp. 31–45. <https://doi.org/10.1080/00343404.2016.1258460>
- Bres, P. A., Branzini, A., Beily, M. E., Escartín, C., Hilbert, J. A., y Almada, M. (2021). Relevamiento de Producción de Digeridos de Plantas de Biogás en Argentina. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca
- Cristiano, G. y Buitrago, C. (2020). ¿Puede el biogás generado a partir de residuos de ganado reducir las externalidades negativas? Un caso de estudio en Argentina. *Semestre Económico*, 23(54), pp. 129–144. <https://doi.org/10.22395/seec.v23n54a7>
- Decunto, V. (2019). Producción de biogás en Los Pinos: un proyecto construido desde la sinergia entre la Academia, la Comunidad y el Estado [Tesis de grado, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires]. RIDAa - Repositorio Institucional de Datos Académicos y de Investigación. <https://www.ridaa.unicen.edu.ar/handle/123456789/2287>
- Decunto, E. V. y Caballero, G. L. (2022). Proyectos de producción de biogás en la Región Pampeana y su contribución a los desafíos energéticos del Siglo XXI. *Revista Huellas*, 26(2), Instituto de Geografía, EdUNLPam: Santa Rosa. Recuperado a partir de: <http://cerac.unlpam.edu.ar/index.php/huellas>
- Di Paola, M.M. (2013). La producción de biocombustibles en Argentina. En: Fundación Ambiente y Recursos Naturales.
- Dirección Provincial de Estadística (DPE). (2024). Producto Bruto Geográfico por Partido 2023
- Echarte, M., y Ischia, C. (2022). Un proyecto inspirador en el marco de la economía circular para el desarrollo territorial rural. *Visión Rural*, 29(144), pp. 49-52. <http://hdl.handle.net/20.500.12123/13542>
- García Ochoa, R. (2014). Pobreza energética en América Latina.
- Geels, Frank W. (2002): Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes. A multi-level perspective and a case-study. In *Research Policy* 31 (8-9), pp. 1257–1274. DOI: 10.1016/S00487333(02)00062-8.
- Geels, F. W. (2011). The multi-level perspective on sustainability transitions: Responses to seven criticisms. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 1(1), pp. 24–40. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2011.02.002>
- Glaser, B. G. y Strauss, A. L. (1967). *The discovery of grounded theory: strategies for qualitative research*. Hawthorne, N.Y.: Aldine de Gruyter.
- Hidalgo, C. A., Balland, P. A., Boschma, R., Delgado, M., Goswami, G., Hausmann, R., ... y Zitt, M. (2018). The principle of relatedness. *Research Policy*, 47(9), pp. 1643-1652.
- INDEC (2022), Censo Nacional De Población, Hogares y Viviendas 2022. Recuperado el 11 de mayo de 2025.
- Infocielo.com (2023, 21 de septiembre). La historia de la planta de biogás que dará energía a un pueblo bonaerense, <https://infocielo.com/municipios/la-historia-la-planta-biogas-que-dara-energia-un-pueblo-bonaerense-n748067>
- Jakob, M., y Steckel, J. C. (2016). *The Just Energy Transition*. WWF International.
- Lema, D. (2015). Crecimiento y Productividad Total de Factores en la Agricultura Argentina y Países del Cono Sur. Documentos de trabajo Banco Mundial, Buenos Aires, Argentina.
- Martí Herrero, J., Pino Donoso, M., Mendoza, G., Pedraza, G. X., Rodríguez Jiménez, L., y Viquez Arias, J. (2016). Oportunidades para el desarrollo de un sector sostenible de biogestores de pequeña y mediana escala en LACRed de biogestores para Latinoamérica y el Caribe, REDBIOLAC (No. P06 17). RedBioLAC.
- Maxwell, J. A. (1996). *Qualitative Research Design: An Interactive Approach*. Sage Publications.
- Nelson, R. y Winter, S. (1982). *An Evolutionary Theory of Economic Change*. The Belknap Press of Harvard University Press. Cambridge.

- Nogar, G.; Chomicki, A. y Berdolini, J. (2019). Bioenergía a partir de residuos ganaderos. Estado de situación en la provincia de Buenos Aires. *Mundo agrario*, 20(43), <https://dx.doi.org/https://doi.org/10.24215/15155994e110>
- Pengue, W. (2020). Capítulo 2. Mi conocimiento: Los costos de la agricultura industrial y la emergencia de la agroecología y los saberes campesinos como una nueva agronomía, pp. 70-81. En *Agroecología: ciencia, práctica y movimiento para alcanzar la Soberanía Alimentaria*. SOCLA. EDEC. Empresa del Desarrollo de Cuenca. Ecuador. ISBN: 978-9942-8822-4-0.
- Scheer, H. (2012). *Energy autonomy: The economic, social and technological case for renewable energy*. Nueva York: Routledge.
- Schot, J. (1998). The usefulness of evolutionary models for explaining innovation. The case of the Netherlands in the nineteenth century. *History and Technology, an International Journal*, 14(3), 173-200
- Soldano, D. (2011). Vivir en territorios desmembrados. Un estudio sobre la fragmentación socio-espacial y las políticas sociales en el Área Metropolitana de Buenos Aires (1990-2005). En: *Procesos de urbanización de la pobreza y nuevas formas de exclusión social. Los retos de las políticas sociales de las ciudades latinoamericanas del siglo XXI*, Alicia Ziccardi (Comp.), pp. 37-59. Bogotá: Siglo del Hombre Editores.
- TEEB (2018). *TEEB for Agriculture & Food: Scientific and Economic Foundations*. Ginebra: UN Environment.
- Thomas, H. (2011). Tecnologías sociales y ciudadanía socio-técnica: Notas para la construcción de la matriz material de un futuro viable; Universidade de Brasília; *Ciência & Tecnologia Social*; 1; 1; 9-2011; 1-22
- Tobares, L. (2013). La importancia y el futuro del biogás en Argentina. *Petrotecnia*.
- Wynne, B. (1992). Misunderstood misunderstanding: social identities and public uptake of science. *Public Understanding of Science*, 1(3), pp. 281-304. <https://doi.org/10.1088/0963-6>

## **BIOGAS AS A JUST TRANSITION STRATEGY IN VULNERABLE RURAL COMMUNITIES: A CASE STUDY IN LOS PINOS, ARGENTINA**

**ABSTRACT:** This study analyzes the implementation of a biogas plant in Los Pinos, a rural community in Buenos Aires Province affected by socio-environmental problems. The town lacks stable access to gas and electricity and suffers from contamination by agro-industrial waste, positioning the area as a vulnerable territory. The main objective of the research was to evaluate how this Demonstration Biogas Plant transforms an environmental liability into an opportunity for community energy autonomy. Additionally, its potential to foster social integration and contribute to a just energy transition was explored. Using a qualitative approach based on a case study, key actors were interviewed, participant observation was conducted, and document analysis was performed. The project, initiated in 2015, led to the formation of the cooperative responsible for managing the plant. Constructed between 2017 and 2022, the biodigester processes agro-industrial waste to generate biogas, which is used to supply a community potable water pump. In conclusion, the biogas plant functions as an innovation niche that transcends the technological by driving a just transition through: active community participation, the conversion of environmental liabilities into resources, and the development of local capacities.

**Keywords:** biogas, energy transition, vulnerability, community

## **PROPUESTA Y ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE UNA COMUNIDAD ENERGÉTICA EN EL PARTIDO DE SAN MARTIN, PROVINCIA DE BUENOS AIRES**

**Mayra Agustina Ramirez<sup>1</sup>, Mariana Tamasi<sup>1,2,3</sup>, Cirilo Francisco Espain<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> Escuela de Ciencia y Tecnología, Universidad Nacional de San Martín.

<sup>2</sup> Departamento Energía Solar, Gerencia Investigación y Aplicaciones, CNEA

<sup>3</sup> Instituto de Nanociencia y Nanotecnología (CNEA-CONICET)

<sup>4</sup> Gerente Técnico USICOM SA

E-mail: mayraamirez@gmail.com

**RESUMEN:** Se analiza la viabilidad de crear comunidades energéticas en Argentina, en el marco de la Ley de Generación Distribuida N° 27424 y las metas nacionales de energías renovables y clima, proponiendo una comunidad energética basada en energía solar fotovoltaica. Se evalúan la normativa nacional y provincial y los desafíos de implementación, apoyándose en experiencias locales e internacionales. Se explora la posibilidad de establecer una comunidad energética en el partido industrial de San Martín, que cuenta con grandes techos en naves fabriles y ausencia de edificios altos, favoreciendo la radiación solar. Como caso de referencia, se toma a Tikvatex, empresa de la zona con 300 termotanques solares operando desde 2018. El entorno fabril facilita la creación de entidades como nuevo modelo de negocio y gestión de generación distribuida, permitiendo múltiples configuraciones que combinan diversos sectores. Se propone el desarrollo de tres industrias locales con un esquema de aportes para ilustrar la factibilidad y los retos ante la normativa vigente, destacando la posible complejidad del caso. Además de la viabilidad técnica y económica, el estudio subraya el valor social: integración, enfoque colectivo y reducción de consumo y emisiones. Las comunidades energéticas permiten a consumidores convertirse en productores, promoviendo renovables, reduciendo costos y fortaleciendo la cohesión comunitaria.

**Palabras clave:** energía solar, comunidades energéticas, generación distribuida, industrias.

### **INTRODUCCIÓN**

Actualmente se observa un contexto donde existe un marco normativo, un sistema financiero alineado con prácticas sostenibles y la necesidad de una transición energética. Lo que permite comenzar a delinear un panorama para el desarrollo de estas comunidades, generando múltiples beneficios a nivel local y nacional.

Una comunidad energética (CE) es la asociación de diferentes personas o empresas, para lograr la construcción de un sistema de generación de energía para autoconsumo y venta. El mismo puede ser de diferentes fuentes de energías renovables (ER), pudiendo generar tanto energía térmica, como energía eléctrica. La conformación de la comunidad permite disminuir los costos asociados, poder generar conciencia de eficiencia energética, y disminuir o hasta eliminar la dependencia con la energía proveniente de la distribuidora, complementando con almacenamiento, y también disminuir costos por economía de escala. Además, al buscar que la generación se encuentre en zonas cercanas a la comunidad, no depende de las redes de transmisión que escasean y limitan la introducción de energías renovables. Esto genera múltiples beneficios para:

- La comunidad: conciencia energética, capacitaciones, nuevos puestos de trabajo e independencia energética.



Esta obra está bajo Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>



- La generación de energía: beneficia aliviando la demanda y las redes como también generando nuevos centros de generación.
- El medio ambiente y el cambio climático: el uso de energías no contaminantes y la conciencia energética implementando medidas de eficiencia energética. La reducción de emisiones relacionadas con el consumo de energía proveniente de fuentes no renovables.

Desde la implementación de la Ley de Generación Distribuida N° 27424 en el 2018, se han instalado más de 42 MW de potencia, con 1.892 usuarios en 15 provincias del territorio nacional (Sub. Transp. y Plan. Energ., 2024). Este marco normativo permite delinear la estrategia para el desarrollo de una comunidad, desde entonces la Ley ha tenido modificaciones que benefician y aumentan la posibilidad de generar comunidades, como en el 2023 se incorporaron dentro de la misma los conceptos de Usuarios Generadores Comunitarios y Usuarios Generadores Comunitarios Virtuales en la Resolución 608/23, y durante el 2024 bajo la Resolución N° 235/24, se amplió el tope de Potencia disponible para generación distribuida (GD). Conceptos similares se habían definido anteriormente en las provincias de Santa Fe y Córdoba, y fueron la fuente de información para desarrollar un marco regulatorio común. Cabe recordar que además una de las metas impuestas en el anexo perteneciente al Decreto 986/2018 que reglamenta la Ley de GD, es lograr una potencia instalada de 1000 MW para el 2030. La provincia de Mendoza también posterior a la sanción de la Ley se adhirió y sancionó su propia Ley nro. 9084, donde enfatiza sobre la modernización del servicio de distribución de energía eléctrica y promueve una red eléctrica inteligente en la provincia (Chemes et al., 2024). Caso similar es en el caso de la provincia de Río Negro a partir de sancionar la Ley provincial 5617. Los marcos legales mencionados generan una base propicia para avanzar en iniciativas innovadoras.

Por ello, el objetivo de este estudio es analizar la viabilidad de crear comunidades energéticas en Argentina, en el marco de la Ley de GD, proponiendo un modelo de comunidad energética basada en energía solar fotovoltaica en el partido industrial de San Martín. Buscando identificar los desafíos técnicos, económicos y normativos para su implementación, para desarrollar un modelo general que pueda aplicarse en futuros proyectos relacionados con comunidades energéticas.

## **ELECCIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LOS PARTICIPANTES DE LA CE**

Para formar la CE se han considerado 3 empresas dentro del partido de San Martín. Se analizó el consumo anual de las empresas y a partir del espacio disponible para la instalación de los módulos fotovoltaicos se simuló su generación con el software PVsyst y posteriormente se evaluó el costo del sistema. Se han seleccionado las industrias de las cuales se contaba la información sobre su consumo, teniendo en cuenta que se encuentran dentro de la misma distribuidora y en un radio acotado. Aunque la normativa vigente no establece un límite de distancia, sí requiere que los participantes pertenezcan a una misma distribuidora, condición que cumplen las empresas seleccionadas, representadas en violeta en la Figura 1. Se marcó un radio de 2 km partiendo de una ellas, para mostrar la cantidad de hogares e industrias que se encuentran dentro de ese rango. Si bien la legislación nacional actual no hace hincapié en rangos de proximidad, en la experiencia internacional en algunos de los ejemplos presentados se considera relevante.

Para este análisis no se ahondó en el tipo de industria ni en la eficiencia energética, que son temas en los que se recomienda profundizar en caso de decidir avanzar con la propuesta del proyecto.

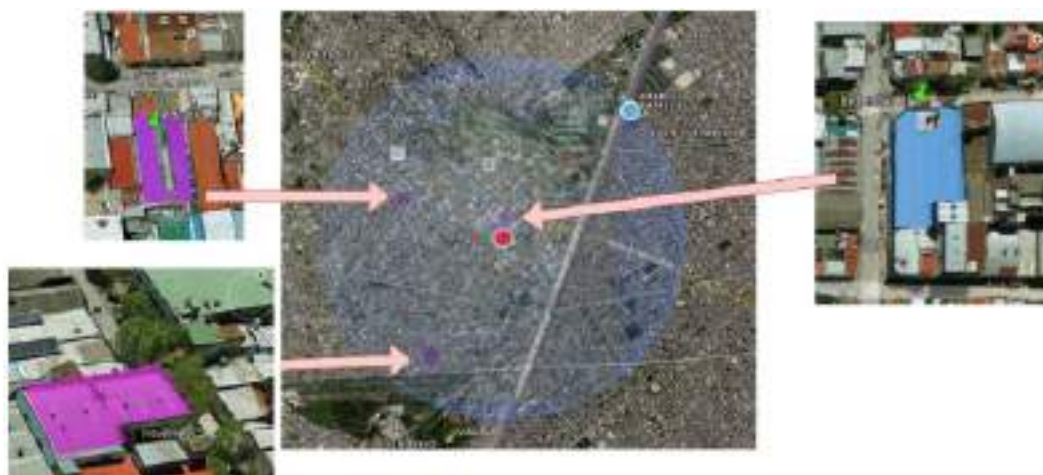


Figura 1. Ubicación de las empresas seleccionadas en el partido de San Martín.

## ANÁLISIS DE NECESIDADES, GENERACIÓN Y UBICACIONES DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO

El enfoque se centró en los consumos eléctricos mensuales entre marzo 2022 a marzo 2023, para las 3 empresas, analizando el tipo de tarifa según su consumo, la potencia contratada y registrada, considerando los horarios, según la clasificación horaria (Tabla 1) y cuándo mejor podría aprovecharse la radiación solar para generar y consumir la energía.

Tabla 1: Clasificación horaria de consumo según cuadro tarifario

| Clasificación | Horario    |
|---------------|------------|
| <b>VALLE</b>  | 23 a 5 hs  |
| <b>RESTO</b>  | 5 a 18 hs  |
| <b>PICO</b>   | 18 a 23 hs |

A nivel general las industrias tienen su consumo de lunes a viernes, mediodía los sábados y en promedio más del 90% del consumo está concentrado en la franja horaria de 5 a 18 hs (Resto), coincidiendo con el período donde se dispone de radiación solar, pudiendo generar ahorros significativos a la hora de producir su energía a través de paneles fotovoltaicos.

A la hora de realizar las estimaciones en el software, se consideró también para el horario de producción ajustar el horario en el programa debido al huso horario de Argentina, para estimar la producción solar. Estableciendo el horario solar de 8 a 18 hs, y no de 7 a 19 hs como viene preestablecido en el diagrama solar, ajustando de esta manera la suposición solar a lo largo del día y el año. Para todas las simulaciones realizadas en el software se descartaron las orientaciones menos favorables y a la vez se buscó definir sistemas que permitan maximizar la generación durante las horas de mayor producción (alrededor del mediodía) teniendo siempre como objetivo maximizar la generación de energía total y minimizar los costos. Con las características de cada caso se simuló en PVsyst el sistema que podía llegar a instalarse en cada techo. En la Tabla 2 se resumen las características mencionadas en los párrafos anteriores para cada Industria (denominadas Industria I, II y III), el sistema FV, sus consumos y el sistema propuesto.

Tabla 2: Características de las industrias y sistema FV.

| CARACTERÍSTICAS                | INDUSTRIA I        | INDUSTRIA II        | INDUSTRIA III      |
|--------------------------------|--------------------|---------------------|--------------------|
| <b>Categoría</b>               | T2                 | T3                  | T3                 |
| <b>Potencia Contratada</b>     | 40 kW              | 200 kW              | 115kW              |
| <b>Potencia promedio</b>       | 104 kW             | 296 kW.             | 93kW               |
| <b>Consumo EE Total</b>        | 242 MWh/año        | 718 MWh/año         | 197 MWh/año        |
| <b>Área disponible</b>         | 325 m <sup>2</sup> | 1170 m <sup>2</sup> | 520 m <sup>2</sup> |
| <b>Área paneles</b>            | 271 m <sup>2</sup> | 465 m <sup>2</sup>  | 380 m <sup>2</sup> |
| <b>Inversores</b>              | 2                  | 2                   | 3                  |
| <b>Paneles</b>                 | 105                | 180                 | 147                |
| <b>Producción del sistema</b>  | 85.000 kWh/año     | 137.000 kWh/año     | 122.000 kWh/año    |
| <b>Consumo / generación FV</b> | 35%                | 19%                 | 62%                |
| <b>Capacidad instalada</b>     | 58 kWp             | 100 kWp             | 82 kWp             |

## ANÁLISIS DE VIABILIDAD DE LA COMUNIDAD ENERGÉTICA PROPUESTA

Dado el contexto legislativo y tecnológico actual se propone establecer una CE entre las industrias participantes, se considera el supuesto de que la Ley, hoy limitada obligatoriamente a grandes usuarios, aplicaría también a usuarios generales, con el fin de alcanzar el objetivo del 20 % de consumo cubierto por ER. Según lo que muestra la Tabla 3.2, una de las industrias no lograría completar su 20%, por la disponibilidad de techo y su consumo. Una situación que puede presentarse en diferentes ocasiones, ya que en estas zonas industriales la disponibilidad de superficie techada aprovechable para instalar paneles está limitada. Es en este punto donde radica la justificación de la asociación de industrias para lograr el objetivo propuesto.

Basándonos en la definición de Usuario Comunitario Virtual (UGCv) que permitiría a partir de la declaración del grupo perteneciente a la comunidad a la distribuidora, inyectar lo generado y repartirlo en el porcentaje definido y declarado (Chemes, 2024). Por otra parte, al distribuir la generación total de los sistemas instalados en cada industria, habría un sobrante de energía que podría incluir a un nuevo participante o inversor (denominado Consumidor X). Para este caso, situación frecuente que a pesar de tener la disposición de generar su energía con ER no disponen de techo o su orientación o edificación hace poco propicio la instalación de paneles FV. Existen numerosas combinaciones posibles para conformar una comunidad. Podría darse el caso inverso de aportar techo y disponibilidad solar, y no capital, o la necesidad de una instalación sobredimensionada para realizar *peak shaving* o reducción de picos de la demanda, buscando incluir otros actores, pero no son los casos analizados. En esta propuesta existe un sobrante de energía y no es necesario complementarlo con otro usuario-generador.

Para este análisis el perfil de este nuevo socio podría ser una industria con características de consumo similares a las industrias I y III. También podrían participar edificaciones de carácter gubernamental o municipal. Dentro del radio considerado existen diversos tipos de construcciones, como la Universidad de San Martín, que podrían sumarse a este tipo de iniciativas. También viviendas o un conjunto de viviendas, pero para todo ello implicaría una categoría de segmentación tarifaria diferente, que no es el objetivo de este trabajo. El esquema de facturación propuesto es el más simple, ya que no incluye diferenciación de precios ni considera las particularidades de los distintos usuarios. Se aplica la misma categoría para la energía consumida como inyectada (T3 – Baja tensión), basada en las bandas de consumo, sin distinción entre los usuarios. Además, en esta categoría, el Valor Agregado de Distribución (VAD) se encuentra mayormente vinculado a la potencia contratada, lo que podría facilitar la adopción de GD, ya que la distribuidora no perdería ingresos por la energía renovable generada.

La meta de lograr el 20% con ER es inmediata porque debería cumplirse según lo estipulado a fin del año 2025, es por ello mirando a futuro, se plantea y analiza además un objetivo complementario: el abastecimiento del 25% de la energía consumida para las Industrias I, II y III. Se propone, para el desarrollo de esta comunidad, la implementación del sistema de UGCv, que operan mediante equipos con medición y monitoreo en tiempo real, permitiendo realizar un cálculo dinámico entre las curvas de consumo y generación, facilitando una distribución equitativa de los beneficios entre los participantes. El funcionamiento de la comunidad se ilustra en la Figura 1. En este sistema, a partir de la generación

total de los sistemas FV registrados a nombre de la comunidad, se inyecta energía a la red, y la distribuidora analiza mensualmente las curvas de consumo individual de los participantes y la curva de generación total, información acumulada y disponible en tiempo real. Posteriormente, distribuye la energía según los porcentajes previamente pactados entre los participantes de la comunidad y declarados ante el organismo correspondiente. Los medidores inteligentes permiten registrar los consumos individuales, y por el otro lado los medidores bidireccionales permiten registrar la energía inyectada a la red. Además, la distribuidora ajusta estas curvas para generar la compensación correspondiente y aplica, un sistema combinado de balance neto de facturación y balance neto de energía para determinar los costos del servicio correspondiente al período de medición considerado en cada facturación.

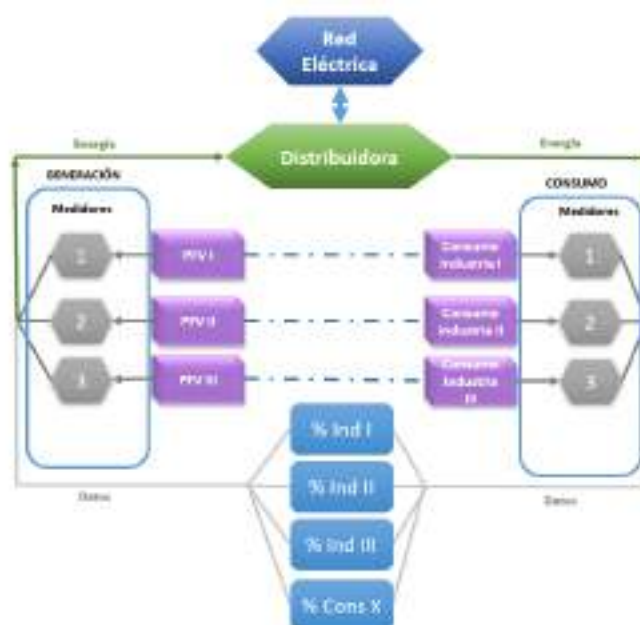


Figura 2: Dinámica de funcionamiento de Comunidad virtual.

De esta manera se busca que, la energía consumida en horarios de producción solar se compense con la energía generada. El consumo que no sea compensado se facturará de forma habitual, como también en caso de haber sobrante, como podría ser durante los fines de semana, los kWh inyectados y no consumidos se pagarán según el balance neto de facturación. Considerando que en general, las industrias operan cinco días a la semana y medio día los sábados, esto representa aproximadamente 5,5 días de funcionamiento sobre un total de 7 días semanales. Bajo este régimen, se estima que el 78 % de la energía generada será para autoabastecimiento a lo largo del año, mientras que el 22 % restante corresponderá a excedentes que serán inyectados a la red. Esto correspondería sobre el porcentaje de participación de cada integrante, que en los casos evaluados corresponde al 20 % y 25 %.

En total la comunidad presenta una potencia total de 0,2 MW, abarcando 3 techos industriales. Es interesante considerar la escalabilidad que presentan este tipo de proyectos, a la hora de tener en cuenta la totalidad del parque industrial de la zona y las diferentes oportunidades que pueden surgir. Se hace por ello a continuación una primera evaluación para dar una idea macro de las diferentes combinaciones y potencialidades de las comunidades energéticas en la zona.

### **Caso 1: Abastecimiento del 20% con ER**

En este caso las Industrias aportantes de los techos deberían cubrir el 20% de su consumo. En la Tabla 3. se puede ver cómo la producción de energía FV instalada en la Industria II no cubriría el 20% del total de su energía anual como plantea la Ley. Dado que pertenece a la comunidad ese porcentaje sería abastecido con la generación de las demás instalaciones FV. Al distribuir la generación total de los parques en los porcentajes mencionados, habría un sobrante que sería utilizado por el Consumidor X como participante inversor.

*Tabla 3: Comunidad cubriendo 20% del total del consumo energético.*

| Comunidad con 20% | Producción solar individual (kWh/año) | Consumo total de energía (kWh/año) | Consumo 20% de energía (kWh/año) | Diferencia (kWh) |
|-------------------|---------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|------------------|
| Ind I             | 85.000                                | 242.000                            | 48.400                           | <b>36.600</b>    |
| Ind II            | 137.000                               | 718.000                            | 143.600                          | <b>-6.600</b>    |
| Ind III           | 122.000                               | 197.000                            | 39.400                           | <b>82.600</b>    |
| Totales           | <b>344.000</b>                        | <b>1.157.000</b>                   | <b>231.400</b>                   | <b>112.600</b>   |

En la comunidad propuesta se distribuirán los pagos de los parques según el consumo necesario para cubrir el 20% de su energía total a partir de renovables y habría un sobrante para un consumidor X de más de 113 MWh anuales.

A partir de la propuesta de la comunidad y la distribución de la producción de un 20% para cada industria, los porcentajes de cada una de ellas sobre el total de la energía generada en el parque varían, de manera que los costos sobre la instalación asociada a cada industria también. Además, se consideró una disminución del costo del sistema fotovoltaico en el precio al considerar la compra en conjunto. De esta manera la inversión inicial necesaria por las industrias disminuye, sumado a que se agregaría un cuarto participante que aportaría capital. Por otra parte, las industrias I y III tendrían una inversión mucho menor y necesaria para cubrir el 20%. La industria II es la que en mayor inversión incurriría debido al consumo asociado a la misma, ya que su disponibilidad de techo no le alcanza para cubrir el porcentaje asociado a su consumo (Tabla 4).

*Tabla 4.: Participación con 20% en comunidad.*

| Comunidad con 20% | Consumo total de energía (kWh/año) | Producción individual (kWh/año) | Consumo de ER (kWh/año) | Consumo ER/ Producción total (kWh/año) |
|-------------------|------------------------------------|---------------------------------|-------------------------|----------------------------------------|
| Ind I             | 242.000                            | 85.000                          | 48.000                  | 14%                                    |
| Ind II            | 718.000                            | 137.000                         | 144.000                 | 42%                                    |
| Ind III           | 197.000                            | 122.000                         | 39.000                  | 11%                                    |
| Consumidor X      | -                                  | -                               | 113000                  | 33%                                    |
| Totales           | <b>1.157.401</b>                   | <b>344.000</b>                  | <b>344.000</b>          | <b>100%</b>                            |

Con la distribución de porcentajes sobre el total propuesto en la Tabla 4, se puede ver que el Consumidor X podría ser una industria sin disponibilidad en su techo, por ejemplo, de consumo similar a la industria I/III. Lo que permitiría más participantes de esta comunidad, que podrían solo aportar capital y aun así obtener un beneficio en su factura eléctrica.

### **Caso 2: Abastecimiento del 25% con ER**

Viendo la disponibilidad de energía y el sobrante significativo para sumar a esta comunidad, si bien existen varias combinaciones posibles se analiza un segundo escenario. A partir del análisis realizado para el 20%, puede ser más ambiciosa la propuesta y que las industrias participantes cubran un 25% de su consumo total de energía con renovables, a partir de la disponibilidad de techos de las tres y los consumos asociados a cada una. De esta manera lo dimensionado en los techos puede cubrir el 25%, y al mismo tiempo tener un restante para sumar otro participante en la comunidad. Nuevamente podría ser una industria que no tengan disponibilidad de techo, que le interese ingresar en la participación (Tabla 5).

Tabla 5: Participación del 25% en comunidad.

| Comunidad con 25% | Consumo total de energía (kWh/año) | Producción individual (kWh/año) | Consumo de ER (kWh/año) | Consumo ER/ Producción total (kWh/año) |
|-------------------|------------------------------------|---------------------------------|-------------------------|----------------------------------------|
| Ind I             | 242.000                            | 85.000                          | 60.500                  | 18%                                    |
| Ind II            | 718.000                            | 137.000                         | 180.000                 | 52%                                    |
| Ind III           | 197.000                            | 122.000                         | 50.000                  | 15%                                    |
| Consumidor X      | -                                  | -                               | 53.500                  | 16%                                    |
| Totales           | <b>1.157.401</b>                   | <b>344.000</b>                  | <b>344.000</b>          | <b>100%</b>                            |

Como se mencionó anteriormente, la propuesta de esta comunidad se basa en el repago con una combinación de Balance Neto de Facturación y Balance Neto de Energía. Al final del periodo de facturación la distribuidora obtendrá curvas de Energía Consumida y de Generación Distribuida inyectada colaborativa total y realizará las curvas para la facturación, según la cuota parte pactada entre los miembros.

Por medio de la integración de ambas curvas, se obtendrán los datos de energía virtual destinada a consumo de red, autoconsumo e inyección, necesarios para la facturación (Prov. Santa Fe, 2021). De esta manera para el análisis económico, la energía eléctrica destinada a autoconsumo es equivalente al costo evitado del precio de energía más los impuestos porque se asume que son kWh que no se consumieron, es decir, la tarifa del servicio eléctrico correspondiente a la cantidad de energía que dejó de tomarse de la red (Balance de energía Neto). Además, la inyección de energía de la comunidad (22%) que se inyecta a la red cuando no hay consumo, es reconocida por la Distribuidora a su Precio Mayorista de Energía (Balance neto de Facturación).

Las reglas que definan a la comunidad serán los pactos que permitirán su correcto desarrollo y desenvolvimiento a lo largo de la vida útil del proyecto común. Por ejemplo, existen diferentes acuerdos que podrían generar vínculos duraderos y constructivos, detallados algunos a continuación. Los factores de repartición de la comunidad, en este caso establecidos en un 25 %, podrían modificarse, ya que no necesariamente deben permanecer estáticos; de acuerdo con diversas experiencias, dichos factores pueden modificarse periódicamente, por ejemplo, en intervalos anuales. También, se podrían establecer acuerdos de prioridades según las necesidades de cada industria, si alguna de ellas entrara en parada técnica o mantenimiento planificado, podrían coordinarse para una nueva forma de distribución de la generación de las instalaciones FV. Si bien los porcentajes acordados entre los participantes son fijos (en este caso del 25%), otra opción sería dar prioridad de despacho a la hora de consumir la energía. Por ejemplo, si una industria consume más energía por la mañana o sabe que en ciertos días de la semana consume más por el tipo de proceso asociado, puede tener esa consideración y priorizar la repartición de energía, pero que al final del año se cumpla con los porcentajes establecidos del 25% de la generación total de la comunidad. Se puede ver una simulación realizada con el PVSyst y a partir de un medidor inteligente instalado (Figura 3) que muestra cómo una de las industrias podría acceder cada día al porcentaje de generación total del sistema fotovoltaico, con el fin de compensar su consumo mediante fuentes de ER. Además, se puede ver claramente cómo el consumo coincide con la generación debido a los horarios de trabajo y disponibilidad de radiación solar, demostrando lo beneficioso de este tipo de proyectos para las industrias.

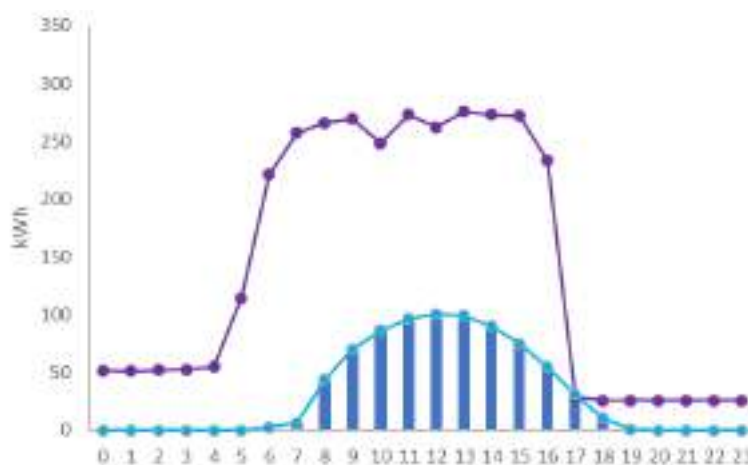


*Figura 3: Consumo diario Industria II (violeta) y generación FV 25% (azul) a partir de simulación realizada con PVsyst y medidor inteligente instalado.*

Otro beneficio común y que podría significar un ahorro económico, es tener un mismo servicio de mantenimiento para toda la comunidad (considerado en la evaluación económica realizada más adelante) y capacitaciones en materia de eficiencia energética y uso racional de la energía, como es el caso de una de las empresas analizadas, no tiene contratada correctamente la potencia, y se consideró el aumento de la misma para poder instalar el parque FV simulado, lo cual demuestra la necesidad de capacitaciones en términos de consumo y uso de energía para el aprovechamiento máximo de renovables y aplicar eficiencia energética.

En este tipo de asociación ya se pueden ver dos beneficios, como el ahorro por comprar en cantidad, 436 módulos, y por otro lado el ahorro en el mantenimiento. Por lo cual disminuyen el CAPEX y el OPEX al realizar el análisis en su conjunto y no de manera individual. Sumado a esto, dadas las características geográficas de la zona, la posibilidad de un parque común se ve limitada por los espacios disponibles, pensar la comunidad en varios techos, pero con un mismo fin común son elementos por considerar para aprovechar en los polos industriales y edificaciones que pueden verse más limitados a la hora de pensar en un parque con la potencia necesaria para abastecer los requisitos industriales.

La experiencia en el análisis de redes sociotécnicas aporta lecciones que pueden aplicarse a la construcción de comunidades energéticas con múltiples actores. Se destaca la necesidad de establecer acuerdos claros desde el principio sobre objetivos, plazos y prioridades, considerando la multiplicidad de actores que pueden participar en una comunidad, que a la vez le agregan valor y aportan a los desafíos que conllevan este tipo de desarrollos. Los proyectos multidisciplinarios integran ciclos de revisión y aprendizaje colectivo, fomentando la transferencia de conocimientos entre técnicos, académicos y miembros de la comunidad (Padawer y Ramírez, 2021). En un entorno diverso, fomentar la interacción iterativa y el aprendizaje continuo puede fortalecer la colaboración y el desarrollo de estas comunidades. En este sentido, al iniciar este tipo de proyectos se recomienda incorporar herramientas metodológicas como diagnósticos participativos, mapeos de actores y talleres de co-diseño, que permitan identificar roles, intereses y capacidades dentro de la comunidad, favoreciendo la toma de decisiones colectivas y la equidad en la distribución de beneficios. El mapeo de los participantes contribuye a definir mejor los roles y a construir consensos en torno a objetivos comunes. Estas herramientas no solo fortalecen la planificación social y técnica del proyecto, sino que también garantizan su sostenibilidad y apropiación comunitaria a largo plazo. Por ejemplo, talleres periódicos y revisiones colectivas pueden optimizar el diseño y operación de los sistemas energéticos. Estos son algunos de los aspectos claves de pensar en comunidad y no en proyectos individuales.

Desde el lado ambiental, según el Primer Informe Bienal de Transparencia de la República Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (IBT), las emisiones asociadas a la demanda industrial de electricidad (MWh), basadas en los datos de CAMMESA equivalen a 0,273 tCO<sub>2</sub>/MWh (Sub. Amb., 2024). Por lo que la conformación de la comunidad propuesta, a partir de la instalación de los diferentes sistemas fotovoltaicos, representa un ahorro en emisiones de 2136 tCO<sub>2</sub>



durante toda la vida útil del proyecto. Esta reducción se calcula considerando la generación efectiva de energía, incluidas las pérdidas asociadas al rendimiento de los paneles, y se debe al reemplazo del consumo esperado convencional por la energía proveniente de la generación solar.

EVALUACIÓN ECONÓMICA

Para la evaluación económica de la comunidad se tomó de referencia el escenario más desafiante, optando por cubrir el 25% con EERR de las industrias participantes. Se consideraron para la operación y mantenimiento (OPEX) unos 7 USD/kW por año (IRENA, 2024), para la inversión individual y el precio se redujo a 3 USD/kW para la evaluación comunitaria. Se detallan en la Tabla 6 todas las variables tenidas en cuenta para las evaluaciones individuales y comunitarias, las tarifas son a octubre de 2024 (ENRE, 2024) y un dólar a ARS1300.

Tabla 6: Variables tenidas en cuenta para el repago de los proyectos.

|                                   |               |
|-----------------------------------|---------------|
| Tarifa venta energía              | 0,059 USD/kWh |
| Tarifa de electricidad inicial T3 | 0,058 USD/kWh |
| OPEX Individual                   | 7 USD/MWh     |
| OPEX Comunitario                  | 3 USD/MWh     |
| Tasa de descuento: 5 %            |               |

Se partió de la inversión inicial como la suma de las inversiones individuales, considerando un costo estimado de 1000 USD/kW para cada instalación, siendo un valor conservador. En el esquema comunitario propuesto, este valor se redujo a aproximadamente 800 USD/kW. Para la evaluación con los nuevos CAPEX se asumió además un ahorro de algo más del 50 % sobre la operación y mantenimiento suponiendo que, al ser una comunidad, con acuerdos preestablecidos, permitirá lograr estos ahorros. La evaluación económica brinda nuevamente VAN positivo y una tasa interna de retorno atractiva (Tabla 7).

Tabla 7: Evaluación económica ind. Vs comunitaria.

|                       | Ind I    | Ind II    | Ind III  | Comunidad |
|-----------------------|----------|-----------|----------|-----------|
| Porcentaje de energía | 35%      | 19%       | 62%      | 25%       |
| CAPEX (USD)           | - 58.000 | - 100.000 | - 82.000 | - 192.000 |
| VAN (USD)             | 13.223   | 25.321    | 27.716   | 158.504   |
| TIR                   | 7%       | 8%        | 8%       | 13%       |
| Repago                | 10 años  | 10 años   | 10 años  | 7 años    |

Acceder a financiación es clave para que las industrias puedan hacer más eficientes sus consumos e implementar ER, como es en este caso, financiar proyectos de energías renovables. Las posibilidades de financiación y el impulso por parte de la banca resultan una herramienta clave para posibilitar el financiamiento a la hora de desarrollar las propuestas de mejora, facilitando el acceso a nuevas tecnologías y/o asesoramiento.

Otra evaluación económica realizada para la comunidad fue el Costo Nivelado de Energía (LCOE por sus siglas en inglés (Levelized Cost of Energy)) para realizar una comparación de la competitividad y rentabilidad a lo largo del periodo analizado. Es una medida relevante a la hora de invertir en energías renovables, y puede ser útil para evaluar el costo de la generación FV para la GD. Se realiza a partir de la fórmula simplificada graficada en la Ecuación 1.

$$LCOE = \frac{\text{Costo total durante la vida útil del proyecto}}{\text{Generación total en la vida útil del proyecto}}$$

(1)

Además, el resultado obtenido es comparado con el precio monómico de CAMMESA. El cual representa el costo medio de la energía en el mercado eléctrico mayorista (MEM), el mismo varía con los precios estacionales, ya que depende del consumo de combustibles, sumado a la disponibilidad de recursos y otras variables. A la fecha el mismo se encuentra en 0,07 USD/kWh (CAMMESA, 2024). El precio obtenido del LCOE para la comunidad propuesta fue de 0,03 USD/kWh, siendo un valor por debajo del

50 % del cual se vende la energía en el MEM. Al estar por debajo del precio monómico, habla de la viabilidad y rentabilidad del proyecto y sirve de referencia para comparar con otro tipo de proyectos e inversiones en energía.



*Figura 4. Sistema eléctrico con aporte comunitario.*

En la Figura 4 se muestra cómo funcionaría la comunidad y el papel de la distribuidora. Uno de los grandes desafíos de este nuevo modelo es el rol de las distribuidoras, clave para lo desarrollado en este trabajo y para que no se vean afectadas ni reticentes a la GD. En particular uno de los principales ingresos de estas y que permite la operación y mantenimiento de las redes, es el VAD, que está conformado por los costos económicos, de operación y mantenimiento de las redes, los gastos asociados a la comercialización, y su valor depende de la tarifa según el segmento y está ligado al consumo, es decir dentro de los costos fijos y variables de los usuarios. Existen alternativas de manera que se vuelvan actores participativos en las comunidades energéticas. Como en el modelo propuesto el VAD para usuarios generales categorizados como T2 y T3 se encuentra en más de un 90% en la contratación de potencia, no afectaría significativamente su recaudación, pero es algo a tener en cuenta cuando se quieren incluir usuarios generales residenciales, ya que el VAD en estas categorías se encuentra mayormente en los costos variables. Garantizar el ingreso y participación de las distribuidoras, es crucial para poder desarrollar el modelo propuesto.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se demostró con un grupo homogéneo que es factible formar una comunidad. Sería enriquecedor integrar distintos tipos de estructuras con usos y funciones diferenciales, cada uno con perfiles horarios de consumo eléctrico variados, en el marco de comunidades energéticas basadas en el autoconsumo compartido, lo que permitiría optimizar el uso de la energía generada. A mayor heterogeneidad de las comunidades, mayor puede ser la optimización del consumo generado a partir de GD.

En diferentes aspectos, Argentina cuenta con los elementos necesarios para conformar las CE, pero no están del todo alineadas y configuradas para su máximo aprovechamiento, como los medidores inteligentes, el concepto de generador comunitario virtual y la Ley de GD. Desde lo económico, se demostró que al valor de las tarifas actuales y las proyecciones realizadas el proyecto se repaga y es económicamente rentable. Si bien no presenta grandes diferencias frente a la inversión total, sí permite acceder con montos menores a energías renovables, que podrían disminuir aún más con la escalabilidad del proyecto.

Para este análisis no se trabajó en el tipo de industria ni en la eficiencia energética, que son temas en los que se recomienda profundizar en caso de decidir avanzar con la propuesta de proyecto. Además, el valor de las tarifas que se abonen en el Balance Neto de Energía y Facturación es crucial en el análisis realizado para la amortización. Como se mencionó, no es la ecuación económica lo que genera valor en estas comunidades, sino la posibilidad de integración. Se deben ponderar beneficios en reducción de emisiones, pérdidas en la red de distribución, incremento en la capacidad de la red y ahorro de

combustible en la generación. También los beneficios que otorga a la comunidad la capacitación en temas ambientales, eficiencia energética y uso racional de la energía.

El éxito de las comunidades energéticas dependerá de factores sociales, vínculos que se generen, incentivos y beneficios que se visualicen. Existen muchas combinaciones posibles para los pactos acordados, por ejemplo en función de la potencia contratada, el porcentaje de participación en los costes de la instalación o en la comunidad de propietarios. Su desarrollo demandará el desafío de “traducción” entre equipos universitarios, técnicos y prosumidores, siendo necesarias capacitaciones. La integración de herramientas tecnológicas accesibles, la negociación de objetivos, el diseño adaptativo y la creación de espacios colaborativos garantizarán proyectos inclusivos y sostenibles. Aunque no es un proyecto sencillo por la diversidad de actores y la falta de normativa asociada, la experiencia internacional demuestra que son viables y una alternativa clave para la transformación energética y el cumplimiento de las metas climáticas.

## REFERENCIAS

- Chemes, J. (2024). III Jornadas de investigación y extensión. Universidad Nacional de Río Negro. Bariloche, Argentina.
- Chemes, J., Garrido, S., Aguiar, D. S., Rullo, P. (2024). Comunidades energéticas en Argentina: Relevamiento de normativas y proyectos. *Avances en Energía y Medio Ambiente*, 28, 369–380. ISSN 2796-8111.
- Ente Nacional Regulador de la Electricidad (ENRE). (2024). Resolución ENRE N° 697/2024. Aprobación de tarifas vigentes a partir del 1 de octubre de 2024. Boletín Oficial de la República Argentina.
- IRENA. (2024). Renewable power generation costs in 2023. International Renewable Energy Agency. Recuperado de [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Sep/IRENA\\_Renewable\\_power\\_generation\\_costs\\_in\\_2023.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Sep/IRENA_Renewable_power_generation_costs_in_2023.pdf)
- Padawer, A., Ramirez, M. A. (2021). Redes sociotécnicas para la agricultura familiar en Misiones Argentina: análisis de un proceso de co-diseño de objetos térmicos en ingeniería. *Ucronías* (4). <https://doi.org/10.5281/zenodo.5809513>
- Provincia de Santa Fe. (2021). Decreto 1098/2020 - Programa ERA Colaborativo.
- PVsyst SA. (2023). PVsyst (Versión 7.4.7). <https://www.pvsyst.com>
- Subsecretaría de Ambiente. (2024). Primer Informe Bienal de Transparencia de la República Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Recuperado el 5/5/2024 de <https://unfccc.int/documents/645001>.

## PROPOSAL AND FEASIBILITY STUDY OF AN ENERGY COMMUNITY IN THE SAN MARTÍN DISTRICT, PROVINCE OF BUENOS AIRES

**ABSTRACT:** This paper analyses the feasibility of establishing energy communities (ECs) in Argentina, considering national and provincial regulations, implementation challenges, and lessons from local and international experiences. It focuses on the industrial district of San Martín, where large industrial roofs and the absence of high-rise buildings create favourable conditions for solar energy use. The study emphasises the potential of ECs as both a clean energy solution and a new business and governance model for distributed generation, adaptable to different sectoral combinations. As a case study, a framework involving three local industries with shared contributions is proposed, representing one of the more challenging scenarios under current regulations. Photovoltaic generation was selected, and its technical and economic viability was assessed based on electricity consumption patterns, available installation space, and industrial locations. The results show the project to be profitable and feasible, with scope for improvement through scalability and various financing options. Beyond financial returns, the initiative’s main value lies in fostering social integration, encouraging collective action, and reducing both energy consumption and greenhouse gas emissions. By enabling consumers to become producers, this type of project promotes the adoption of renewable energy, lowers costs, and fosters community cohesion.

**Keywords:** solar energy, energy communities, distributed generation, industries.

## TRANSICION PARA QUIEN? ENERGIA, RIESGO Y EXPECTATIVAS EN COMUNIDADES PUNEÑAS FRENTE A LOS MEGAPROYECTOS SOLARES

**Sofía Govetto<sup>1</sup>, Facundo D. González<sup>2</sup>, Facundo E. Corro Tosoni<sup>3</sup>, Maximiliano Vilca<sup>4</sup>,  
Verónica López<sup>5</sup>**

<sup>1,2</sup>Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO, UNSa – CONICET)  
Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta. Av. Bolivia 5150, Salta Capital,  
CP 4400, Argentina. Tel. 3875809428. Correo: [sofiagovetto@gmail.com](mailto:sofiagovetto@gmail.com)

<sup>3,4,5</sup>Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta. Av. Bolivia 5150, Salta Capital,  
CP 4400, Argentina

**RESUMEN:** El estudio analiza el acceso y las condiciones de uso de la energía en Olacapato, comunidad indígena Kolla Quewar de la Puna salteña, ubicada cerca de dos grandes parques solares. Su objetivo es evaluar, a partir del Censo Energético 2024, cómo se desarrolla la transición energética en un territorio que, pese a su proximidad con estas infraestructuras, permanece fuera de la red nacional y depende de un grupo electrógeno a gasoil. La metodología combina un cuestionario estructurado a 51 personas mayores de 17 años, entrevistas a referentes comunitarios y análisis estadístico-descriptivo con interpretación cualitativa. Se abordaron cuatro ejes: condiciones de acceso, riesgos eléctricos, percepciones sobre la justicia energética y expectativas frente a las plantas solares. Los resultados muestran cortes diarios para más del 70 % de quienes reportan interrupciones, costos que superan el 20 % de los ingresos en numerosos hogares, uso persistente de leña y carbón, y riesgos eléctricos domésticos subestimados. La mayoría desconoce o no percibe beneficios de las plantas y demanda de forma casi unánime su conexión directa, invocando proximidad, ahorro y justicia territorial. Se concluye que la transición energética requiere cerrar la brecha entre generación y acceso, garantizando tarifas justas, infraestructura segura y participación comunitaria para lograr un suministro equitativo y continuo.

**Palabras clave:** transición energética, justicia energética, pobreza energética, Puna salteña, megaproyectos solares.

### INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el despliegue global de tecnologías renovables, enmarcado en la transición energética, ha sido presentado como necesario desde la perspectiva ambiental, aunque no siempre contempla las desigualdades territoriales y socioculturales que condicionan su apropiación. En el Noroeste argentino, la instalación de megaproyectos solares en territorios indígenas y rurales genera tensiones entre objetivos macro de descarbonización, condiciones locales de acceso a la energía y formas de habitar el territorio. El objetivo de este trabajo es evaluar, a partir del Censo Energético 2024, cómo se desarrolla la transición energética en un territorio que, pese a su proximidad con estas infraestructuras, permanece fuera de la red nacional y depende de un grupo electrógeno a gasoil. Es decir, se retoma Censo Energético 2024 realizado en Olacapato (departamento de Los Andes, Salta), a menos de diez kilómetros del Parque Solar Cauchari, comunidad de altura mayoritariamente Kolla Quewar. Ya que históricamente esta ha sido atravesada por proyectos de modernización vinculados al ferrocarril, la minería y, más recientemente, las energías renovables.

El relevamiento censal de 51 hogares de 181 registró condiciones de acceso, usos y percepciones sobre la energía, así como expectativas frente a la planta solar. Los datos permiten identificar pobreza energética estructural, riesgos domésticos y una apropiación selectiva de políticas públicas, así como expectativas comunitarias que resignifican la transición energética desde claves territoriales. El análisis se sitúa en un marco que combina la categoría de hábitat infra/supra (González, 2020) con la justicia



energética (Gonza et al., 2022; Svampa y Bertinat, 2022), el mismo permite problematizar cómo se produce social y políticamente el acceso a la energía, y cómo las grandes infraestructuras solares pueden reforzar dinámicas centralizadas (supra hábitat) frente a prácticas y demandas locales (infra hábitat). El caso de Olacapato evidencia las contradicciones de la transición en territorios periféricos, cercanía física a la producción de energía limpia y lejanía estructural respecto de sus beneficios. La problemática energética de la Puna se inscribe en tensiones globales entre la expansión de modelos dominantes y la necesidad de garantizar acceso equitativo en zonas rurales y aisladas. El Censo Energético 2023 ya había mostrado déficits persistentes; la actualización 2024 permite comparar y profundizar estos diagnósticos. En poblaciones rurales como Olacapato, el consumo energético no cubre necesidades básicas, limitando actividades esenciales como bombear agua, cocinar, conservar alimentos, iluminar o utilizar medios de comunicación (Ottavianelli et al., 2021). Cuando no se alcanza ese umbral, y los costos no son asequibles frente a las alternativas disponibles, se configura pobreza energética (Ibáñez, 2021). En el NOA, estas condiciones se acentúan, como señalan Svampa y Bertinat (2022), frente a un mapa desigual donde algunas regiones consumen en exceso y otras no alcanzan el mínimo requerido para confort y desarrollo. Olacapato, a 4.100 m s. n. m., es el poblado más alto de Argentina, con menos de 300 habitantes (INDEC, 2024). Se caracteriza por ser el poblado más alto de Argentina, con menos de 300 habitantes, en su mayoría pertenecientes a la comunidad indígena Kolla Quewar (Figura N°1). Su geografía puneña, caracterizada por mesetas áridas, escasa vegetación y amplitud térmica, ha moldeado históricamente las formas de habitar y producir. La economía local se asocia principalmente a la minería y a actividades de subsistencia como la cría de llamas y ovejas. Aunque cuenta con servicios básicos como agua corriente, gas e internet, su acceso a la electricidad depende de un grupo electrógeno a gasoil, lo que genera interrupciones frecuentes y condiciones de pobreza energética (Govetto, et al 2024; González et al., 2024).



*Imagen N°1: Mapa de Olacapato Fuente: Instituto Geográfico Argentino (IGA).*

En Olacapato, el acceso a la electricidad depende de grupos electrógenos a gasoil, ya que la localidad no está conectada a la red de distribución nacional. La proximidad a dos de los parques solares más grandes del país y su ubicación en el “triángulo del litio” generan expectativas y reclamos sobre las condiciones de vida.

El Parque Solar Cauchari se inauguró el 2 de octubre de 2019 y comenzó sus operaciones comerciales el 25 de septiembre de 2020. Fue construido entre 2018 y 2020, y es el parque solar más grande de Sudamérica y el más alto del mundo, ubicado en la provincia de Jujuy, Argentina. Este parque se ubica en Susques, Jujuy y tiene 315 MW de capacidad instalada en tres unidades de 105 MW, distribuidas en unas 800 hectáreas con 1,2 millones de paneles, y es uno de los complejos fotovoltaicos más grandes de América Latina. Mientras el Parque Solar Fotovoltaico Altiplano 200 fue inaugurado y puesto en marcha en Salta el 16 de diciembre de 2021. Su puesta en funcionamiento ubicó a la provincia de Salta como líder en la generación de energías renovables. Esta ubicado en Olacapato, y alcanza los 200 MW y 554.580 paneles en 350 hectáreas. Ambos proyectos, desarrollados bajo el Programa RenovAr, están conectados al Sistema Argentino de Interconexión (SADI) e inyectan allí toda su producción.

La comunidad, sin embargo, permanece fuera de esa red y depende de un sistema aislado y limitado, lo que revela una paradoja estructural: la generación de energía limpia a gran escala convive con el suministro precario en su entorno inmediato. Esta desconexión no obedece a imposibilidades técnicas



sino a decisiones político-financieras que postergan la inversión necesaria. Desde este contraste, se vuelve indispensable integrar principios de justicia social y ecológica, respecto a la autonomía territorial para repensar las políticas energéticas y problematizar la apropiación social de los megaproyectos en contextos de desigualdad estructural.

## METODOLOGIA

Este trabajo adopta un enfoque cualitativo–interpretativo para comprender los sentidos, prácticas y expectativas que los habitantes de Olacapato construyen en torno al acceso a la energía y la producción social del hábitat, apoyándose en la noción de infra y supra hábitat (González, 2020) para analizar tensiones entre modelos institucionales de provisión y formas locales de habitar el territorio. La investigación, realizada en esta localidad de la Puna salteña a más de 4.100 m, combinó tres técnicas: cuestionario estructurado a 51 personas mayores de 17 años, entrevistas con referentes comunitarios y revisión de testimonios difundidos en medios. La muestra, no probabilística y estratégica, consideró variables como tipo de conexión, género, ocupación y vínculo con los parques solares. El análisis integró estadística descriptiva (univariado y bivariado) e interpretación cualitativa organizada en cuatro ejes — condiciones de acceso, riesgos eléctricos, justicia energética y expectativas frente al parque Cauchari—, de modo que los cruces de variables permitieron vincular aspectos materiales (frecuencia de cortes, costos, disponibilidad de equipamiento) con dimensiones simbólicas y políticas (percepción de derechos, identidad indígena, demandas de conexión), articulando información cuantitativa y experiencias comunitarias para producir una lectura situada de las desigualdades y tensiones que atraviesan la transición energética en contextos de vulnerabilidad estructural.

## RESULTADOS

### *Condiciones de acceso y calidad del servicio energético.*

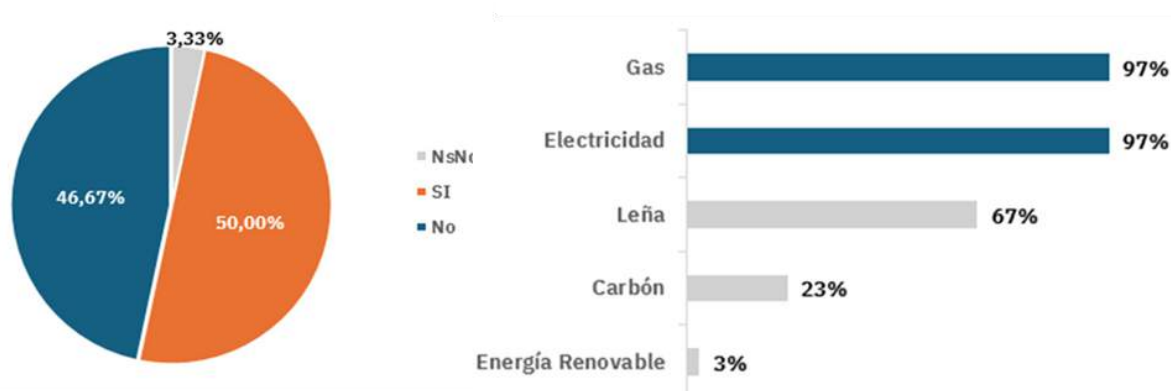


Figura 2: Comparación de interrupciones en el servicio eléctrico en relación al tipo de fuente energética principal Fuente: Informe Técnico Olacapato 2024

El cruce presentado en la figura N°2, pretende dar cuenta de la relación entre los cortes e interrupciones en el servicio eléctrico que sufren los integrantes de la comunidad y la principal fuente de acceso a la energía que tienen en su hogar. En esta comparación, se puede observar, por la experiencia cotidiana con el suministro eléctrico, el 50 % de las personas encuestadas manifestó atravesar interrupciones o problemas en el servicio, mientras que un 46,67 % indicó no registrar dificultades. Un pequeño grupo (3,33 %) optó por la categoría “No sabe / No contesta”, lo que podría interpretarse como una dificultad para evaluar la calidad del servicio o, incluso, como una forma de silenciamiento frente a un problema tan naturalizado como estructural. Si bien la electricidad y el gas son utilizados por el 97 % de los hogares, esta aparente cobertura se ve desmentida por la persistencia de estrategias adaptativas: el 67 % de los encuestados declaró utilizar también leña, y un 23 % mencionó el uso de carbón. Esta matriz energética híbrida, donde conviven tecnologías modernas con fuentes tradicionales, pone en evidencia una situación de precariedad energética persistente, donde la continuidad del servicio está lejos de estar garantizada.

Este uso combinado de fuentes no puede ser leído únicamente como una práctica cultural o económica, sino como una forma de resistencia y resiliencia frente a un sistema deficiente. En efecto, del total que reporta interrupciones en el suministro, el 73,33 % lo experimenta diariamente, lo que sugiere un patrón

de corte sistemático y naturalizado. La instalación de parques solares en las cercanías no ha tenido al menos hasta el momento un impacto directo en la comunidad, lo que contrasta fuertemente con los discursos institucionales sobre desarrollo y transición energética. Así, mientras la promesa de modernización circula en los niveles macro, la vida cotidiana se organiza en torno a restricciones materiales que refuerzan la dependencia de fuentes menos eficientes y más contaminantes. Esta brecha entre expectativas y realidades deja entrever un problema de justicia energética aún no resuelto.

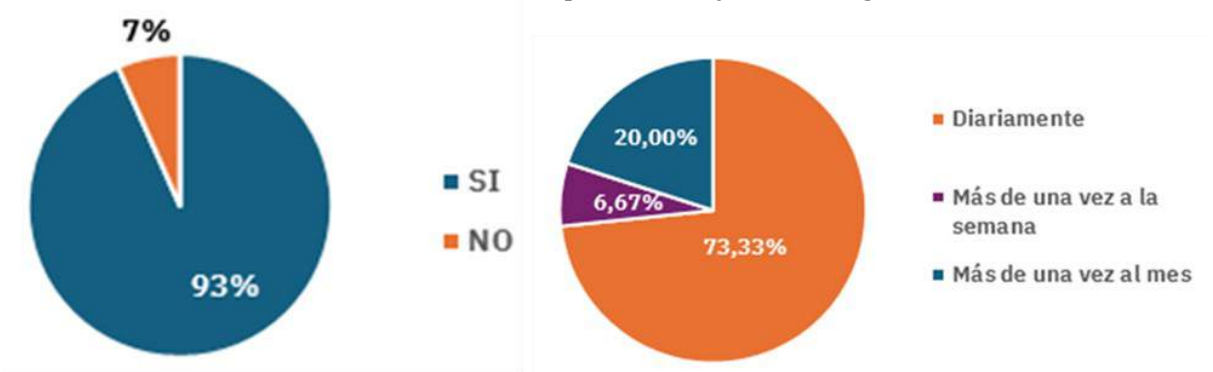


Figura 3: Presencia de medidor de luz en relación con la frecuencia en las interrupciones que tiene el servicio. Fuente: Informe Técnico Olacapato 2024.

La Figura N°3 tiene como objetivo analizar la relación entre la percepción de la calidad del servicio eléctrico y la frecuencia de interrupciones, considerando la variable de posesión o no de medidor. Dicho análisis se plantea debido a que el medidor puede representar una modalidad de acceso seguro a la energía. El cruce presentado revela que el 93 % de las personas encuestadas dispone de medidor eléctrico en su vivienda, mientras que un 7 % no cuenta con este dispositivo. Esta aparente formalización casi total del acceso al servicio eléctrico no impide identificar zonas grises donde persisten conexiones informales, compartidas o sin control estatal, que pueden derivar en prácticas de facturación arbitraria o en limitaciones para ejercer reclamos. La existencia de hogares sin medición del consumo formaliza, en términos estructurales, una doble vulnerabilidad: por un lado, la exposición a condiciones precarias de suministro; por otro, la dificultad de ingresar plenamente al sistema regulado. Este dato interpela los criterios tradicionales de inclusión energética, y obliga a repensar la categoría de “acceso” más allá de su dimensión técnica.

Ahora bien, contar con un medidor no garantiza condiciones dignas de suministro. Entre quienes señalaron haber sufrido fallas, el 73,33 % reportó cortes diarios, cifra que visibiliza una precariedad estructural e interroga la efectividad real del servicio prestado. A esto se suma un 20 % que indicó interrupciones mensuales y un 6,67 % que las sufre semanalmente. Este panorama refuerza una percepción de injusticia energética, donde la regularidad del pago no se corresponde con la calidad del servicio. La relación entre formalización (presencia de medidor) y garantía de derechos (suministro seguro y continuo) aparece desarticulada, generando frustración, desgaste y desconfianza. En este contexto, la energía deja de ser un derecho garantizado y se convierte en un recurso desigual, cuya distribución refleja y reproduce condiciones estructurales de marginalidad.

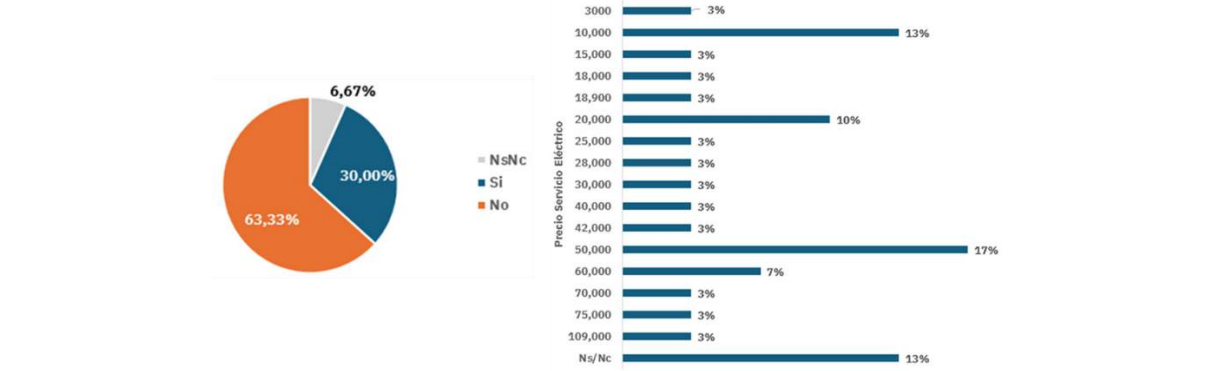


Figura N°4: Costo mensual del servicio eléctrico por Suficiencia de ingresos del hogar. Fuente: Informe técnico Olacapato 2024



La Figura N°4 muestra la relación entre el costo mensual del servicio y la cobertura de los servicios básicos respecto al ingreso del hogar. Esto da cuenta de un diagnóstico económico que condiciona de manera directa el acceso a la energía: el 63,33 % de las personas encuestadas manifestó que sus ingresos no alcanzan para cubrir lo necesario, frente a un 30 % que afirma lo contrario. Esta percepción se vuelve particularmente crítica cuando se la cruza con el dato más frecuente sobre el costo mensual del servicio eléctrico, que alcanza los \$50.000. Considerando los niveles de informalidad laboral y vulnerabilidad económica presentes en la comunidad, dicho monto representa entre un 20 % y un 40 % del ingreso mensual en muchos hogares, superando ampliamente el umbral del 10 % que organismos internacionales como la ONU o la CEPAL utilizan para definir situaciones de pobreza energética. Esto implica que, aún en presencia de conexión formal, los hogares enfrentan una forma de exclusión silenciosa: el costo de mantener el acceso deviene, en sí mismo, una forma de privación.

Más aún, la dispersión en los montos declarados que incluyen cifras elevadas como \$75.000 o incluso \$109.000 revela no sólo desigualdades internas, sino también falencias estructurales en la provisión del servicio. Estos valores extremos podrían vincularse con el uso de sistemas de generación autónomos, como grupos electrógenos a gasoil, en ausencia de redes interconectadas o subsidios diferenciales. En este escenario, el esfuerzo económico desproporcionado por sostener un servicio inestable, interrumpido y costoso no sólo profundiza la precariedad material, sino que erosiona las bases simbólicas del proceso de transición energética.

Aunque los discursos oficiales destacan el respeto a los derechos indígenas y la justicia territorial, incluidos el derecho a consulta, participación y propiedad comunitaria, persisten desafíos. El Foro Internacional de los Pueblos Indígenas sobre el Cambio Climático (2024) para la COP28 enfatiza que la transición a energías sostenibles debe respetar los derechos humanos y conocimientos indígenas. Además, el Marco de Planificación para Pueblos Indígenas (2023) establece principios y procedimientos para gestionar los riesgos e impactos ambientales y sociales en las actividades del proyecto. Pero en la experiencia cotidiana de los pobladores atravesada por restricciones presupuestarias, cortes diarios y tarifas elevadas desafía estas narrativas y resignifica el sentido del acceso a la energía. En consecuencia, lo que en el plano institucional se presenta como inclusión, en la práctica reproduce formas históricas de desigualdad e injusticia energética.

#### **Riesgos eléctricos e infraestructura doméstica**



*Figura N° 5: Percepción de riesgo eléctrico por Accidentes eléctricos reportados. Fuente: Informe técnico Olacapató 2024*

La figura N°5, evidencia la relación entre la variable percepción del riesgo eléctrico y los accidentes reportados por la comunidad. Lo que da cuenta que el 70 % de las personas encuestadas en Olacapató no percibe riesgos eléctricos en sus viviendas, mientras que un 30 % sí los identifica. Esta diferencia en la percepción interpela la dimensión infra hábitat, que refiere a las condiciones materiales y simbólicas cotidianas del habitar. El dato cobra mayor relevancia al considerar que, entre quienes reconocen riesgos, se reportaron situaciones concretas como instalaciones antiguas, conexiones inseguras, cortocircuitos, sobrecargas y electrificación de objetos. La existencia de estas condiciones materiales indica que el riesgo eléctrico no sólo está presente, sino que puede estar subestimado por una parte de la población, lo cual evidencia una brecha entre percepción subjetiva y realidad técnica. En este sentido, la falta de reconocimiento del riesgo podría responder más a la naturalización de la precariedad que a la ausencia de problemas, lo que demanda políticas orientadas a la prevención, el mantenimiento y la adecuación normativa de las instalaciones domiciliarias.

Este hallazgo permite cuestionar la desconexión entre el infra hábitat configurado por prácticas cotidianas, saberes situados y condiciones infraestructurales locales y el supra hábitat, representado por

grandes proyectos energéticos que promueven la transición energética desde una lógica centralizada y tecnocrática. Mientras se erigen plantas solares de escala industrial en nombre del desarrollo sustentable, los hogares colindantes enfrentan sistemas eléctricos inseguros, con redes sobre demandadas y sin dispositivos de protección adecuados. Así, la instalación de infraestructura de generación, sin intervención sobre la distribución y el uso doméstico de la energía, contribuye a profundizar desigualdades existentes. La transición energética, para ser justa, no puede limitarse a métricas de capacidad instalada o descarbonización global: debe partir de un enfoque territorial y participativo que reconozca los riesgos locales y garantice un acceso seguro, continuo y equitativo a la energía.

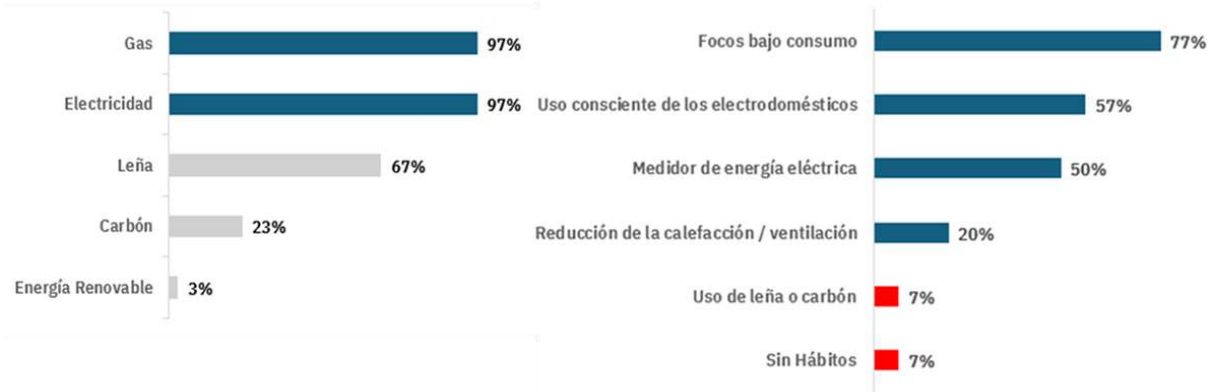


Figura N°6: Tipo de fuente usada para el acceso a la energía en relacion con los hábitos de consumo.  
Fuente: Informe técnico Olacapato 2024

La figura N°6 muestra cómo la comunidad accede a la energía y su relación con las prácticas de cuidado en los hábitos de consumo. El relevamiento sobre fuentes energéticas en los hogares de Olacapato muestra un claro predominio de la electricidad y el gas, presentes en la casi totalidad de los casos, lo que podría asociarse a una cierta formalidad en el acceso, más propia de contextos urbanos o semiurbanos. Sin embargo, la persistencia de un uso significativo de leña (67 %) y, en menor medida, de carbón (23 %), evidencia que un número considerable de hogares debe recurrir a fuentes tradicionales para cubrir necesidades básicas de calefacción o cocción. La baja incorporación de energías renovables (apenas un caso) sugiere, además, la existencia de barreras económicas, técnicas y de acceso a la información que dificultan la adopción de tecnologías más limpias.

Desde la perspectiva del infra-hábitat, estos hogares, aun contando con algún grado de acceso formal a electricidad o gas, deben ajustar sus prácticas a un marco de precariedad, ya sea reduciendo el uso de calefacción (20 %), modificando la cocina hacia sistemas más primarios (7 %) o sosteniendo consumos mínimos como estrategia de supervivencia más que de cuidado del medio ambiente. En contraposición, el supra-hábitat se reconoce, aunque de forma parcial, en aquellos hogares que implementan tecnologías y prácticas de optimización —como el uso de focos de bajo consumo (77 %), la gestión consciente de electrodomésticos (57 %) o la disposición de medidores (50 %)— que permiten un control más racional de la energía. Esta coexistencia de realidades contrapuestas refleja una transición energética fragmentada, en la que las promesas macro de desarrollo y sustentabilidad —como la instalación de grandes plantas solares— no logran traducirse en mejoras sustantivas para la seguridad, continuidad y equidad del acceso energético en la vida cotidiana de la comunidad. Para superar esta fragmentación de la transición energética, es clave adoptar estrategias integrales que incluyan lo institucional, técnico y social. Es fundamental fortalecer la participación comunitaria en la gestión de sistemas, promover tecnologías adecuadas al contexto local e incentivar el uso productivo de la energía. Además, integrar la planificación energética con políticas rurales, educación técnica y equidad de género favorece una transición más justa e inclusiva.

Justicia energética, gasto y programas sociales

La figura N°7 muestra el valor del servicio eléctrico y su relación con la variable donde se indaga si los usuarios reciben una tarifa social. Por lo que se puede observar el valor más frecuente abonado por el servicio eléctrico en Olacapato es de \$50.000 mensuales (17 casos), seguido por \$10.000 y la opción “No sabe/No contesta” (13 casos cada uno). Otros montos relevantes incluyen \$20.000 (10 menciones) y \$60.000 (7 menciones), mientras que cifras extremas, como \$75.000 o \$109.000, aparecen de forma minoritaria pero significativa. Estos datos reflejan un esfuerzo económico considerable en un contexto caracterizado por alta informalidad laboral, ingresos bajos y condiciones climáticas que exigen un consumo energético elevado. Así, el precio del servicio no sólo representa una carga financiera desproporcionada en relación con los ingresos locales, sino que también se inserta en un escenario de precariedad energética donde la continuidad y calidad del suministro no están garantizadas.

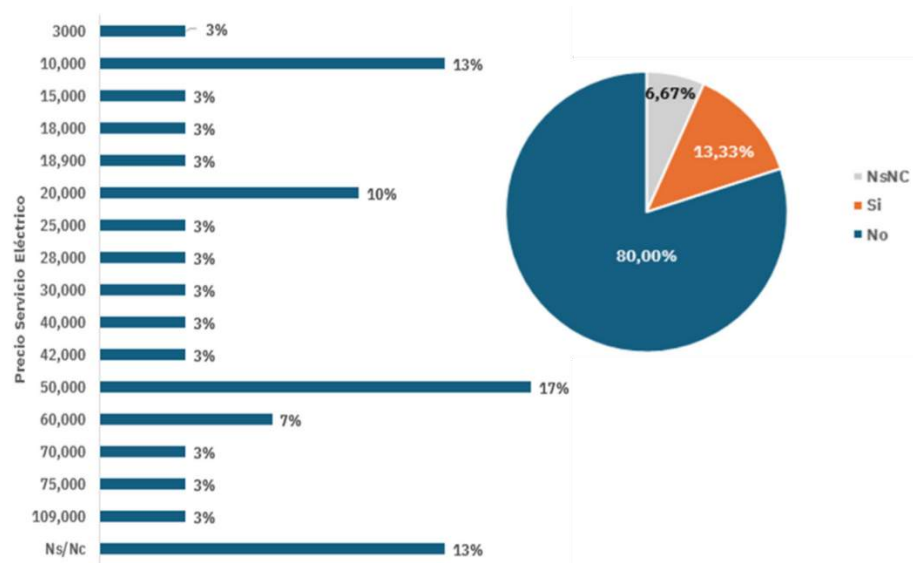


Figura N°7: Percepción del precio como “excesivo” por Presencia de subsidios a tarifa social. Fuente: Informe técnico Olacapato 2024

La indagación sobre la presencia del Estado en los hogares revela que sólo el 13,33 % de las personas encuestadas recibe algún tipo de ayuda social, frente a un 80 % que declara no contar con esta asistencia. Esta brecha evidencia una cobertura limitada de las políticas públicas de subsidio y contención social, lo que agrava la percepción de injusticia tarifaria. La ausencia de mecanismos de compensación o tarifas diferenciales para territorios de alta vulnerabilidad y demanda energética refuerza la sensación de desprotección y desigualdad. En este marco, la justicia energética no puede evaluarse únicamente por el acceso formal al servicio, sino por la relación entre el costo, la calidad del suministro y la capacidad real de pago, variables que en Olacapato se encuentran desarticuladas y que tensionan las promesas de la transición energética con la experiencia cotidiana de la comunidad.

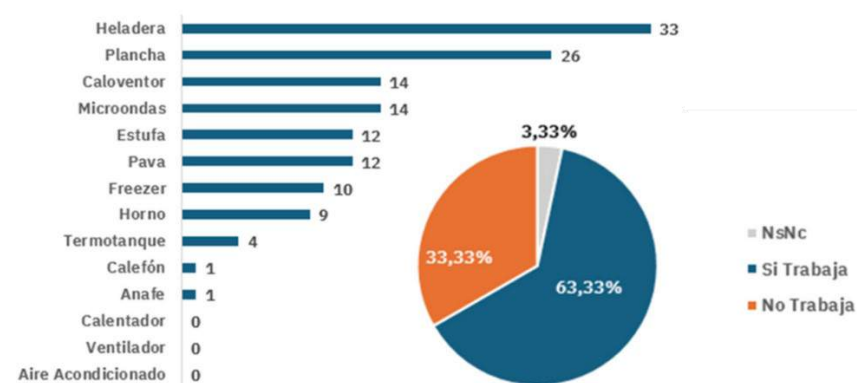


Figura N°8: Ingresos del hogar por Número de electrodomésticos disponibles. Fuente: Informe técnico Olacapato 2024

Aunque no se dispone de un registro explícito de los ingresos brutos de los hogares, la figura “Situación laboral” permite aproximarse a este dato a partir de la inserción ocupacional. El relevamiento muestra que el 63,33 % de las personas encuestadas declaró estar trabajando, frente a un 33,33 % que manifestó no tener empleo, lo que indica una proporción relevante de la población en situación de desempleo o inactividad, lo que hace que no tengan ingresos económicos. Entre quienes están ocupados, la mayoría se desempeña en relación de dependencia en el sector privado (58 %), mientras que un 21 % trabaja de manera independiente, pero sin registro formal. Este panorama refleja un mercado laboral segmentado, donde la estabilidad de ingresos es desigual y, en muchos casos, insuficiente para sostener un acceso pleno al confort energético, especialmente en un contexto de alta informalidad y demanda térmica elevada por las condiciones climáticas.

En cuanto a los electrodomésticos, el equipamiento se concentra en aparatos esenciales para la conservación de alimentos y el confort básico. La heladera, presente en 33 hogares, es prácticamente universal, mientras que la plancha (26), el microondas y el calientador (14 cada uno) y la pava eléctrica o la estufa (12) muestran un uso relevante, vinculado tanto a prácticas culturales como a necesidades térmicas. Equipos de mayor consumo o destinados a un confort más avanzado, como el freezer (10), el horno eléctrico (9), el termotanque (4), el calefón eléctrico (1) o el anafe (1), son mucho menos frecuentes, lo que sugiere una fuerte dependencia de gas o leña para cocinar y calentar agua. El cruce entre situación laboral y disponibilidad de aparatos indica que el acceso a equipamiento no sólo depende del poder adquisitivo, sino también de la capacidad del sistema eléctrico local para sostener su uso. En un escenario como el de Olacapato, donde el suministro es intermitente y limitado, la compra de ciertos electrodomésticos puede resultar inviable o poco útil, revelando que el derecho al confort energético se encuentra condicionado tanto por factores económicos como por las restricciones estructurales del servicio.

### ***Expectativas persistentes y resignificación comunitaria de la transición***

La comparación de las variables “Resultados de la planta” y “Grado de cumplimiento de las expectativas” del Censo Energético muestra en la figura N°9, un patrón de percepción marcado por la ausencia de información y apropiación comunitaria. En la primera, el 70 % de las personas encuestadas respondió “No sabe/No responde”, mientras que un 13 % consideró que los resultados son desfavorables y otro 13 % que la planta no ha producido resultados. Sólo un 3 % identificó efectos favorables. En la variable Grado de cumplimiento de las expectativas, el 76,7 % optó nuevamente por “No sabe/No responde”, lo que sugiere una desconexión estructural entre la población y el proyecto, probablemente asociada a la falta de canales de participación y comunicación. Las respuestas positivas fueron marginales, un 6,7 % señaló que las expectativas se cumplieron “mucho”, un 3,3 % “demasiado” y otro 3,3 % “regular”. Este panorama indica que, más allá del discurso institucional, la experiencia cotidiana de la comunidad no registra beneficios claros derivados de la planta

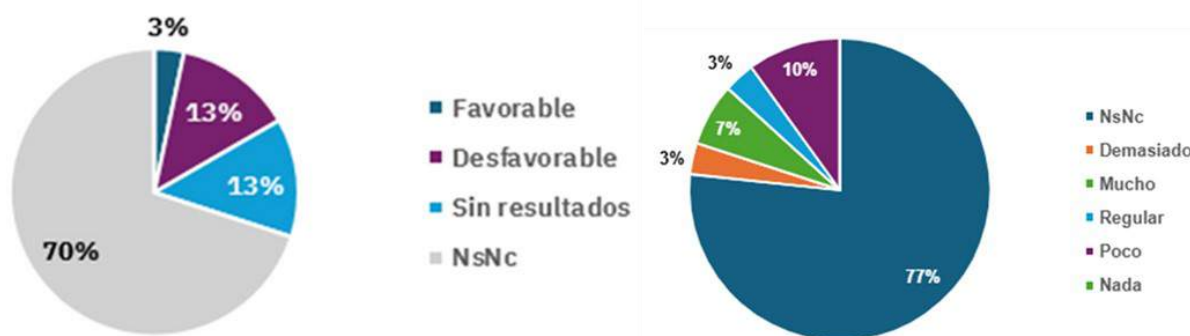


*Figura N°9: Percepción de resultados de la planta por grado de cumplimiento de expectativas.*

*Fuente: Informe técnico Olacapato 2024*

El cruce entre ambas variables confirma la brecha entre las promesas macro de desarrollo y los impactos percibidos a nivel local. La predominancia de respuestas negativas o nulas, sumada al alto porcentaje de “No sabe/No responde”, refuerza la idea de que la planta solar Cauchari opera bajo una lógica de supra hábitat: una gran infraestructura diseñada desde un modelo tecnocrático y centralizado, orientada a

objetivos externos a la comunidad. Mientras tanto, el infra hábitat configurado por las prácticas, necesidades y condiciones materiales cotidianas sigue marcado por un acceso eléctrico limitado, con baja calidad y disponibilidad del servicio. La disonancia entre las expectativas iniciales y los resultados percibidos no sólo genera resignación, sino que también cuestiona la narrativa de progreso asociada a la transición energética en contextos rurales como Olacapato.



Figura N°10: Demanda de inyección de energía por razones esgrimidas (proximidad, justicia, ahorro etc.). Fuente: Informe técnico Olacapato 2024

La figura N°10 muestra la demanda de inyección de energía al pueblo y las consideraciones de los pobladores, en relación con esta demanda. Estas variables muestran un consenso prácticamente unánime, donde el 96,7 % de las personas encuestadas considera que el parque solar debería inyectar energía directamente a Olacapato, frente a un 3,3 % que se manifestó en contra. Por otro lado, se profundiza en los motivos de esta postura, revelando que la razón más mencionada es la proximidad geográfica (46,7 %), seguida por el ahorro económico y la reducción de costos (16,7 %), el confort y bienestar (13,3 %), el valor simbólico y territorial del uso de recursos (13,3 %) y, finalmente, la necesidad y carencia estructural (6,7 %). Estos datos evidencian que la demanda de energía no sólo se sustenta en criterios funcionales o económicos, sino que también incorpora dimensiones identitarias y de justicia territorial.

El cruce entre ambas variables refuerza la centralidad que adquiere el acceso directo a la energía en la agenda comunitaria, articulando reclamos que combinan necesidades materiales con reivindicaciones simbólicas sobre el territorio. La comunidad internaliza el discurso de la transición energética, pero lo reinterpreta desde el infra hábitat, priorizando la redistribución local de beneficios frente a un supra hábitat que concentra la producción y decide de forma centralizada. La proximidad física a la planta se convierte en un argumento político que cuestiona la desigualdad en el acceso, mientras que el componente económico refuerza la demanda de tarifas justas y equidad en el uso de recursos. Así, la expectativa no se limita a una mejora técnica del servicio, sino que implica un reclamo de reconocimiento y participación en los beneficios generados por una infraestructura ubicada en su propio territorio.



Figura N°11: Identificación con pueblo indígena por Percepción sobre uso de recursos del territorio. Fuente: Informe técnico Olacapato 2024

La figura N°11 muestra la relación entre la variable de identificación del pueblo indígena y la percepción sobre el uso del territorio. Este análisis busca reflejar la vinculación de los habitantes con el territorio y las maneras en que lo ocupan. Lo que muestra que un 13,3 % de las personas encuestadas sostiene que la planta solar debería inyectar energía a Olacapato porque hace uso de los recursos del territorio. Este dato adquiere especial relevancia al cruzarlo con la figura 5, donde el 80 % de los encuestados se reconoce como parte del pueblo indígena Kolla Quewar. La convergencia de ambos indicadores evidencia una lectura crítica sobre la explotación de recursos por parte de actores externos y refuerza la demanda de reconocimiento de los derechos y el territorio ancestral. Aquí, la demanda energética se inscribe en un marco más amplio de justicia territorial, en el que el acceso a la energía se entiende no sólo como un servicio, sino como parte de una reciprocidad pendiente entre comunidad y Estado.

La relación entre identidad indígena y percepción sobre el uso de recursos refleja un reclamo que trasciende la provisión técnica de energía: apunta a la redistribución justa de los beneficios generados en tierras ancestrales. Como plantea el Informe 2024 de González et al., se trata de una expectativa “basada en el sentido de reciprocidad”, donde la energía es también un símbolo de reconocimiento político y cultural. La tensión entre supra e infra hábitat se manifiesta en la falta de correspondencia entre los discursos oficiales de transición energética y las condiciones materiales reales del pueblo. En este contexto, las percepciones y demandas comunitarias operan como formas de resistencia o de resignificación, cuestionando los modelos de desarrollo que priorizan objetivos externos por encima de las necesidades locales.

## **CONCLUSIONES**

Olacapato es mucho más que un pueblo en el mapa donde se instala una gran planta solar. Es un lugar con historias, rutinas, climas extremos y/o desafíos diarios para sostener algo tan básico como la luz encendida o el agua caliente. Esta investigación permite ver que, para su gente, la transición energética no es un concepto abstracto ni un eslogan político, sino, es la posibilidad de acceder a la energía, pagarla sin sacrificar otras necesidades y usarla sin miedo a que una instalación en mal estado provoque un accidente.

La investigación da cuenta de que la presencia de una mega obra como el parque Solar Cauchari no se traduce en beneficios concretos para la comunidad. La información y testimonios revelan cortes frecuentes, costos desproporcionados y una dependencia de fuentes tradicionales como la leña, que no es siempre una elección cultural, sino muchas veces una necesidad impuesta por la falta de alternativas seguras o accesibles. Aquí tiene sentido la idea de infra hábitat, un habitar condicionado por limitaciones materiales y económicas que dificultan el ejercicio pleno del derecho a la energía. En el otro extremo, el supra hábitat opera con la lógica de los grandes proyectos y las metas nacionales, pero sin tender puentes reales hacia las necesidades locales.

La distancia entre ambos niveles no es sólo técnica, sino también simbólica y política. El 80% de la población se reconoce como parte del pueblo Kolla Quewar, y cuando reclama que la planta inyecte energía al pueblo, no sólo pide electricidad, exige respeto por su territorio, reconocimiento de sus derechos y una reciprocidad que hoy no encuentra. En ese sentido, la energía se convierte también en un terreno de disputa por la dignidad y la justicia.

Este trabajo permite afirmar que no basta con llevar la transición energética a un territorio; es necesario construirla con quienes lo habitan. Eso implica informar, escuchar, incluir y garantizar que los beneficios no se queden en el discurso ni en las estadísticas macroeconómicas. Requiere políticas que reconozcan las desigualdades de partida, tarifas que no ahoguen a los hogares y mejoras en la infraestructura que reduzcan riesgos y amplíen posibilidades. La transición energética justa en lugares como Olacapato no se mide en paneles ni megavatios, sino en la mejora de la calidad de vida de las comunidades que habitan la zona. Solo cuando las promesas coincidan con la realidad, se podrá afirmar que la transición energética es para toda la sociedad.

## **FUENTES DE FINANCIAMIENTO**

Este trabajo fue financiado por el Proyecto de Investigación Científica y Tecnológica (PICT-2020 SERIEA-01759) “Política Pública y Desarrollo Científico-Tecnológico en Energías Renovables: Estrategias de Transición Sustentable en la Producción de Hábitat En Salta (2021-2023)” financiado por la Agencia I+D+i, el Proyecto de Investigación TIPO A N°2916/0 “Transición Energética en los Valles Calchaquíes y la Puna Salteña: análisis de políticas públicas de energía solar vinculadas con la producción del hábitat en Salta, Argentina” financiado por el CIUNSa y el Proyecto de Investigación



## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y a la Universidad Nacional de Salta por el financiamiento brindado. Además, agradecen profundamente la colaboración del Grupo de Estudios Socio-técnicos de la Energía y del Hábitat (GESEH) y la comunidad de Olacapato.

## REFERENCIAS

- Argentina. (2023). Anexo V: Marco de planificación para pueblos indígenas (MPPI). [https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/anexo\\_v\\_marco\\_de\\_planificacion\\_para\\_pueblos\\_indigenas\\_mppi.pdf](https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/anexo_v_marco_de_planificacion_para_pueblos_indigenas_mppi.pdf)
- Bonifacio, C. E., Miller, J. y Orte, A. I. (2024). De la Puna al Mundo: Energía Solar Fotovoltaica en Salta. Imaginarios de Transición Energética en el Pueblo Kolla de Olacapato (2023). Tesis de Licenciatura en Ciencias de la Comunicación, Universidad Nacional de Salta.
- Borrero, R. (2024). International Indigenous Peoples Forum on Climate Change Final Advocacy Paper on “Just Transition” for UNFCCC COP 28. International Indigenous People’s Forum on Climate Change. <https://www.iipfcc.org/blog/2024/2/10/international-indigenous-peoples-forum-on-climate-change-final-advocacy-paper-on-just-transition-for-unfccc-cop-28>
- Dirección General de Derechos Humanos. (2018). *Cuadernillo 8: Derechos de los pueblos indígenas. Dictámenes del Ministerio Público Fiscal ante la Corte Suprema de Justicia de la Nación (2012-2017)*. Ministerio Público Fiscal. <https://www.mpf.gob.ar/dgdh/files/2017/11/DGDH-Cuadernillo-8-Derechos-de-los-pueblos-indigenas-1.pdf>
- Govetto, S. C., González, F. D., Soria, J., Pedraza, M. L., Vilte, G. J. L., Vilca, M., Pérez Machado, F., López, V. M., y Corro Tosoni, F. E. (2025). *Censo energético 2024: Encuesta sobre consumos y condiciones energéticas en Olacapato (Salta, Argentina)* [Informe técnico]. Universidad Nacional de Salta; CIUNSa; Facultad de Humanidades; GESEH; INENCO.
- Gobierno de la Provincia de Salta. (16 de diciembre de 2021). Fue inaugurada en Salta la segunda planta solar más grande de Argentina [Nota de prensa]. Secretaría de Prensa y Comunicación. <https://www.salta.gob.ar/prensa/noticias/fue-inaugurada-en-salta-la-segunda-planta-solar-mas-grande-de-argentina-79706>
- Gonza, C., González, F. y Durán, P. (2022). Hábitat, pobreza energética y mujeres indígenas en el norte argentino: una propuesta interseccional para comunidades en zonas rurales aisladas del chaco salteño. *Hábitat y Sociedad*, 15, 183–209. <https://doi.org/10.12795/HabitatySociedad.2022.i15.09>
- Gonzalez, F. (2020). Producción y circulación de sentidos en la configuración de las dimensiones supra e infra hábitat: Experiencias de producción de hábitat en la Puna y en el Chaco salteños a partir de proyectos de extensión con la comunidad Kolla de Huncuro y el pueblo Wichí de El Cocal (Salta, 2017–2018) [Tesis doctoral, Universidad Nacional de Córdoba].
- González, F. (2019). Estrategias de hábitat en Salta: el caso del Programa de Mejoramiento Barrial (ProMeBa) 2015-2016 [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Quilmes]. <http://ridaa.unq.edu.ar/handle/20.500.11807/2041>
- González, F., Picabea, F. y Durán, P. (2023). Sentidos en torno a la dimensión energética en procesos de producción de hábitat en territorios indígenas en la provincia de Salta. *Revista Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. Salta.
- González, F., Sarmiento Barbieri, J. y Frascarolli, C. (2023). La transición energética como problema social: Una aproximación desde la economía política. *Revista ERMA*.
- González, F. y Rodríguez, N. (2020). Fundamentos teórico-metodológicos en la producción de hábitat en territorios interculturales: experiencias de extensión universitaria en Salta (2017–2019). *Perspectivas*. *Revista de Ciencias Sociales*, 5(9), 691–723.
- Gonzalez F.D., Cornú, C., Salas, N., Corro Tosoni, F., Miller, J., Orte, A., Bonifacio, C. E., Cadena, C. A. y Pérez Machado, F. A. (2024). Expectativas de los pobladores de Olacapato (Salta, Argentina) en relación con la instalación de grandes plantas solares en su territorio. *Revista AVERMA (Avances en Energías Renovables y Medioambiente)*. ASADES.
- Govetto, S. C., González, F. D., Soria, J., Pedraza, M. L., Vilte, G. J. L., Vilca, M., Pérez Machado, F., López, V. M. y Corro Tosoni, F. E. (2025). *Censo energético 2024: Encuesta sobre consumos y*



- condiciones energéticas en Olacapato (Salta, Argentina) [Informe técnico]. Universidad Nacional de Salta; CIUNSA; Facultad de Humanidades; GESEH; INENCO.
- Hidalgo Troya, A. (2019). Técnicas estadísticas en el análisis cuantitativo de datos. *Revista SIGMA*, 15(1), 28–44. Recuperado a partir de <https://revistas.udenar.edu.co/index.php/rsigma/article/view/4905>
- Ibañez, M., Zabaloy, M. F. y Guzoswky, C. (2021). ¿Pobreza o indigencia energética? Una primera exploración para Argentina. Saberes, Rosario, Argentina.
- INDEC. (2024). Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2022. Resultados definitivos. Fecundidad. Edición ampliada. Mayo de 2024.
- Ottavianelli, E., González, F. y Cadena, C. (2021). Hábitat y pobreza energética en zonas rurales aisladas en el noroeste argentino. *Ciencia Latina*, 5. México.
- Presidencia de la Nación, República Argentina. (s. f.). *Documentos de trabajo — Proyecto Energía Limpia*. Argentina.gob.ar. <https://www.argentina.gob.ar/economia/energia/proyecto-energia-limpia/documentos-de-trabajo>
- Power China Ltd. Sucursal Argentina. (s. f.). Caucharí, el mayor parque solar de América Latina [Sitio web]. <https://www.powerchina.com.ar/cauchari.html>
- Svampa, M. y Bertinat, P. (2022). La transición energética en Argentina. Siglo XXI Editores.

## **TRANSITION FOR WHOM? ENERGY, RISK, AND EXPECTATIONS IN PUNO COMMUNITIES FACING SOLAR MEGAPROJECTS**

**ABSTRACT:** The study analyzes energy access and usage conditions in Olacapato, a Kolla Quewar indigenous community in the Salta Puna region, located near two large solar farms. Its objective is to evaluate, based on the 2024 Energy Census, how the energy transition is developing in a territory that, despite its proximity to these infrastructures, remains off the national grid and relies on a diesel generator. The methodology combines a structured questionnaire with 51 people over the age of 17, interviews with community leaders, and descriptive statistical analysis with qualitative interpretation. Four axes were addressed: access conditions, electrical risks, perceptions of energy justice, and expectations regarding solar plants. The results show daily outages for more than 70% of those who report interruptions, costs exceeding 20% of income in many households, persistent use of firewood and coal, and underestimated domestic electrical risks. Most are unaware of or do not perceive the benefits of the plants and almost unanimously demand their direct connection, citing proximity, savings, and territorial justice. The conclusion is that the energy transition requires closing the gap between generation and access, guaranteeing fair rates, safe infrastructure, and community participation to achieve an equitable and continuous supply.

**Keywords:** energy transition, energy justice, energy poverty, Puna Salteña, solar megaprojects

## LA GESTION DE UNA IDEA: CENTRO BONAERENSE DE ENERGÍAS RENOVABLES, LA PLATA, ARGENTINA

**Gustavo San Juan<sup>1</sup>, Graciela Viegas<sup>1</sup>, Joel Asambuyo<sup>1</sup>,  
Graciano San Juan<sup>2</sup>, Fabián Pérez<sup>2</sup>, Ramiro Borga<sup>3</sup>, Nicolás Silva<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Instituto de Investigaciones y Políticas del Ambiente Construido (IIPAC)

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

<sup>2</sup>Facultad de Arquitectura y Urbanismo (FAU), Universidad Nacional de La Plata (UNLP)

Calle 47 N°162, La Plata, C.P. 1900 – Prov. de Buenos Aires

Tel. 0221-4236587/90 int. 250-31. e-mail: [gustavosanjuan60@hotmail.com](mailto:gustavosanjuan60@hotmail.com)

<sup>2</sup>OQOS Arquitectos. [estudio@oqos.ar](mailto:estudio@oqos.ar)

<sup>3</sup>Programa provincial de incentivos a la generación de energía distribuida,  
prov. de Buenos Aires (PROINGED). 0221- 4452342. [info@proinged.org.ar](mailto:info@proinged.org.ar)

**RESUMEN.** El presente trabajo propone un abordaje reflexivo, explicativo y expositivo del proceso de gestión de una idea, donde se destaca no solo la inclusión de conocimiento científico-técnico, sino de manera central, la articulación de saberes y capacidades a partir de una gestión interinstitucional y multiactoral concebida desde una perspectiva sistémica. La experiencia se sustenta en acciones de vinculación entre actores estatales, no estatales, científicos y técnicos, orientadas a la generación de una propuesta arquitectónica y al asesoramiento para la construcción de un edificio demostrativo de la aplicación de pautas bioclimáticas y sustentables. Se trata del primer Centro de Energías Renovables y Eficiencia Energética de la provincia de Buenos Aires. La metodología implicó la autoorganización del sistema de relaciones y flujos de información, así como la conducción de aquellos conocimientos, capacidades, intereses y modalidades de gestión propias de cada sector. Esta dinámica posibilitó la elaboración de una propuesta arquitectónica integral y el desarrollo de instancias de asesoramiento técnico orientadas a la materialización del edificio. Como resultado, se avanzó en la superación de abordajes fragmentarios y a-sistémicos, abriendo camino a nuevas formas de gestión colaborativa que pueden incidir estratégicamente en la transición energética a escala local y regional.

**Palabras clave:** Gestión multiactoral, gestión interinstitucional, vinculación tecnológica, diseño sustentable, políticas públicas.

### INTRODUCCION

Seguramente, uno de los temas más importantes para arribar a un objetivo, tal como es la concreción en este caso de un edificio demostrativo que incluye temas como la eficiencia energética y la generación de energías renovables, es su *gestión*. Desde finales del siglo XIX el concepto de gestión se consideró como una *tecnología* orientada a objetivos prácticos. Posteriormente, durante el primer cuarto del siglo XX, se convirtió rápidamente en una *disciplina*, como un “cuerpo organizado de conocimiento orientado a apoyar las empresas que actuaban por instinto, generando cambios en los valores y en los procesos organizacionales” (Manrique López 2016). En este sentido, Manrique López (2016), agrega, “A través de la historia, la gestión ha sido reconocida como disciplina -en el sentido foucaultiano-, en tanto adopta un conjunto de principios, métodos, técnicas y prácticas derivadas de la teoría científica, cuya aplicación permite la planificación, organización, dirección y control de los recursos (humanos, económicos, financieros, materiales, tecnológicos, del conocimiento, etc.) de una organización, garantizando el logro de objetivos institucionales por medio de una estructura y a través del esfuerzo humano coordinado”. En el caso particular de este servicio de transferencia tecnológica, las condiciones tienen que ver con la

articulación entre diferentes actores de los sectores público político, de gestión, privados y estatal académico-científico.

El presente artículo analiza e integra de manera sistémica algunos conceptos que caracterizan las prácticas integrales y articuladas, como una forma de aunar funciones, intereses, capacidades, saberes disciplinares y aprendizajes, en un espacio colaborativo, donde el *modelo de gestión* determina el *estilo de gestión* del sistema, o sea, la forma en que se interactúa y se toman decisiones (Pirez et al, 2003).

La *vinculación tecnológica* la entendemos como un proceso basado en la conexión, colaboración y relación del ámbito científico-técnico con otros actores del sector público, privado y de la sociedad civil, con el objeto de transferir conocimientos innovativos, tecnologías y resultados provenientes de la investigación y el desarrollo (I+D). Es de interés que dichos avances lleguen a la sociedad a partir de producir bienes de uso, de consumo o inmateriales para contribuir al desarrollo económico y social, así como generar un impacto positivo en la calidad de vida de la población.

Este proceso implica un tipo de modelo de gestión, donde se plantea básicamente abordar cuatro acciones: (i) la construcción de *interfaces* entre la formulación de conocimientos científicos y la concreción de políticas públicas; (ii) la generación de *redes*, sistemas y modalidades de comunicación entre los actores intervinientes; (iii) la concreción de *circuitos* de comunicación e información y (iv) la aplicación de un *estilo de gestión* participativa híbrido (horizontal y vertical, sistémico, adaptativo y dinámico). Esto implica la posibilidad de la auto-organización del sistema de relaciones y flujos con lo cual conducir aquellos conocimientos, capacidades, intereses y modalidades de gestión propias de cada sector involucrado (Karol y San Juan, 2021).

Las principales falencias de un modelo de gestión multiactoral pueden sintetizarse en: (a) la *debilidad o ausencia* de integración de/entre capacidades institucionales, (b) la *desarticulación* de/entre actores institucionales, en cuanto a definición de intereses y objetivos y (c) las *carencias* en la comunicación.

Esas desintegraciones y desarticulaciones –temporales, temáticas, instrumentales, políticas, intra/interjurisdiccionales e intra/interinstitucionales– son estructurales. De todos modos, es posible encarar esas desarticulaciones a través de la construcción progresiva de puentes que conecten operativamente a quienes están a unos y otros lados de una muy intrincada malla de *bordes y fronteras* institucionales y personales que operan en el territorio, en la producción de la ciudad, en la construcción de una idea (Karol y San Juan, 2021).

En particular, en este caso, el modelo analítico multiactoral se expone bajo lógica sistémica (García, 2000), donde cada sector (público-privado, académico-científico y productivo) traduce sus relaciones en flujos de información con diferentes características, intensidades y objetivos. Además, la forma de abordar la vinculación corresponde a la noción de *actores interactivos*, que interactúan de forma activa, realizando acciones en el seno de una organización o sistema (complejo) humano (Ferber, 1994). Mary Parker Follett (1924) determina que, según su orientación conductual, la gestión es "lograr resultados a través de las personas, determinando que el éxito o el fracaso de cualquier empresa depende, en gran medida, del compromiso y entrega de sus trabajadores".

En base a lo expuesto, el presente trabajo, tiene por objeto exponer de manera analítica y reflexiva la interacción multiactoral, con lo cual colaborar en la reproducción de procesos de vinculación que implican la autoorganización del sistema de relaciones y flujos, así como la conducción de aquellos conocimientos, capacidades, intereses y modalidades de gestión propias de los sectores o instituciones involucradas, con lo cual modificar procesos y prácticas vigentes que pueden condicionar el cómo arribar al objetivo planteado, así como transformar abordajes fragmentarios y a-sistémicos. En este sentido, los resultados alcanzados evidencian que la experiencia permitió superar modelos fragmentados de gestión y avanzar hacia la consolidación de un modelo multiactoral replicable, basado en la interacción activa de los distintos sectores involucrados. La contribución principal al campo de las ciencias radica en ofrecer evidencia empírica sobre la efectividad de un abordaje sistémico aplicado a políticas públicas vinculadas a la transición energética y al diseño sustentable, demostrando que la

articulación de saberes y capacidades puede incidir de manera estratégica en la materialización de proyectos complejos. Metodológicamente, el trabajo se inscribe en un análisis sistémico de gestión multiactoral, que posibilitó comprender las dinámicas de cooperación y los flujos de información interinstitucional, sentando bases conceptuales y prácticas para su aplicación en otros contextos territoriales y temáticos.

## METODOLOGIA

Desde el punto de vista metodológico, hablamos de una gestión multiactoral e interinstitucional y también de posibles desarticulaciones y desintegraciones. El objetivo, tácito, y no planificado fue en definitiva la *construcción del actor* (colectivo), o sea aquellos que se articularán para hacer algo (de qué manera, cuándo y cómo lo harán). Esta construcción implica la generación de determinados espacios o ámbitos de articulación, vínculos nuevos y específicos, los cuales permitirán favorecer la coordinación, el intercambio, el compartir nuevos aprendizajes individuales, institucionales y fundamentalmente colectivos.

Por otro lado, pero de manera secuencial y expositiva, la definición del objeto de la vinculación y de la articulación, un proceso, definido en fases, con tiempos previstos (metas) y responsabilidades institucionales claramente definidas.

La definición del objeto, también debe ser y fue -en este caso- clara: (i) la definición del encargo por parte de la articulación virtuosa entre el Foro Regional Eléctrico de la provincia de Buenos Aires (FREBA) y la Subsecretaría de Energía (SSE) del Ministerio de Infraestructura y Servicios Públicos de la provincia de Buenos Aires (MIySP), a través del Programa de Incentivo a la Generación Renovable (PROINGED); (ii) la definición del lugar donde se localizaría el edificio, a partir de la concreción de un comodato entre la Comisión de Investigaciones Científicas de la provincia de Buenos Aires (CIC) y el PROINGED; (iii) la concreción de un convenio de investigación y desarrollo (I+D) entre el PROINGED y el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) siendo la unidad ejecutora, el Instituto de Investigaciones y Políticas del Ambiente Construido (IIPAC, CONICET-UNLP) y (iv) el Contrato de construcción, entre la Empresa Constructora ABL S.A. y el PROINGED-FREBA.

Desde el punto de vista estrictamente técnico, la propuesta arquitectónica se basó en el diseño de un edificio que incorporó: (i) pautas de diseño bioclimáticas a partir de considerar el binomio C+P (Conservación/eficiencia energética y sistemas Pasivos); (ii) sistemas activos para generación eléctrica (FFVV, con operación *on grid* y *off grid*), (iii) materiales, componentes y sistemas, en el marco del concepto de sustentabilidad ambiental (San Juan et al., 2003). Desde el punto de vista funcional, (iv) que sea un edificio con destino para generar y apoyar la investigación, el desarrollo, así como actividades de capacitación, formación y (v) que tenga carácter demostrativo y de difusión de las tecnologías y criterios implementados.

## RESULTADOS

### *La gestión de una idea*

A mediados del año 2022, comenzaron las conversaciones entre los responsables del Programa de Incentivo a la Generación Renovable (PROINGED-FREBA, SSE del MIySP e IIPAC), con el objeto de generar la vinculación entre ambos organismos, para la materialización del proyecto de un edificio demostrativo dedicado a la sede del PROINGED incluyendo actividades en Ciencia y Tecnología, en el marco del desarrollo sustentable.

Este proyecto consistió en: el diseño y posterior licitación; construcción; y puesta en funcionamiento del primer Centro de Energías Renovables de la Provincia de Buenos Aires concebido como una sede provincial de referencia para todo el sector. Este proyecto implica la posibilidad de confluir diversas actividades de aplicación, exposición, demostración de criterios bioclimáticos y sustentables, capacitación, difusión, investigación y desarrollo de tecnologías vinculadas a la generación renovable y eficiencia energética. Se busca que, en este nuevo espacio, puedan confluir y desarrollarse diversos tipos

de actividades e iniciativas brindando un espacio abierto a la comunidad eléctrica, académica y científica vinculadas a la temática. La construcción se llevó a cabo en un predio cedido por la CIC- PBA en su Campus Tecnológico, situado en la localidad de Gonnet, La Plata.

En octubre de 2022, se rubrica el Convenio Específico entre PROINGED y CONICET (Unidad Ejecutora: IIPAC), con el siguiente objeto “El presente Convenio de investigación y desarrollo tiene por objeto elaborar una propuesta arquitectónica con eje fundamental en la aplicación de pautas sobre eficiencia energética y construcción bioclimática y sustentable, aplicables al diseño de un Centro demostrativo de energías renovables y sustentabilidad, que funcione como modelo y referencia de aplicación tecnológica, en adelante el Proyecto”. En julio de 2023, el IIPAC, entrega al PROINGED la documentación necesaria para la licitación y construcción del edificio en cuestión. A fines de ese mismo año se concreta la licitación pública para la ejecución de la obra. En diciembre de 2023, se da comienzo a las obras a cargo de la Empresa Constructora ABL S.A. A partir de ese momento se comienza una fructífera relación y articulación entre los diferentes actores intervinientes, finalizando su construcción en julio de 2025. A partir del segundo semestre de 2025, y con el edificio en uso, se comenzarán las actividades para la realización de las auditorías energéticas y ambientales, y la verificación del funcionamiento de los diferentes sistemas involucrados.

Se trata entonces, de un proceso de construcción y gestión de una idea, donde se destaca no solo la inclusión de conocimiento científico-técnico sino la articulación de saberes y capacidades de gestión (Figura 1).



Figura 1: El proceso temporal de construcción de una idea.

### La gestión de la vinculación interinstitucional

Como ya se ha mencionado, el foco del presente artículo es exponer los aprendizajes en cuanto al proceso de gestión. En este caso, y como se observa en la Figura 2, se han conjugado diferentes actores institucionales que construyen y producen en/la ciudad. (i) el *Sector Público-Privado*, constituido por el Gobierno de la Provincia de Buenos Aires (GPBA); el FREBA y el PROINGED, con aporte de gestión y económico-financiero; (ii) el *Sector Científico-Tecnológico*, constituido por la CIC-PBA, que proporcionó, mediante un comodato, el terreno donde se construyó el edificio; El IIPAC, como unidad de doble dependencia del CONICET y de la UNLP y otras instituciones científicas, invitadas a incorporar ciertos desarrollos tecnológicos, como por ejemplo el Centro de la Vivienda Económica (CEVE, CONICET-AVE); el Laboratorio de Biotecnología de Hongos Comestibles y Medicinales (CERZOS, CONICET-UNS-CIC y el Centro de Investigaciones y Transferencia Villa María (CIT, CONICET UNVM); (iii) el *Sector Productivo*, constituido por un estudio profesional (OQOS), asociado al IIPAC, que aportó en el diseño y la documentación técnica licitatoria, y la Empresa Constructora ABL S.A. Se invitó, además, a participar a una PyME, que proporcionó aislación higro-térmica-acústica conformada por lana de oveja (AbrigA).

En general, cuando se plantea este tipo de actividad donde participan diversas instituciones u organizaciones, se presentan *desarticulaciones* -temporales, temáticas, instrumentales, políticas, intra/interjurisdiccionales e intra/interinstitucionales-, las cuales son estructurales para arribar al objetivo planteado. Por ende, es necesario encarar posibles desarticulaciones a través de la construcción progresiva de puentes que conecten operativamente a quienes están a unos y otros lados de una intrincada malla de *bordes* y *fronteras* institucionales que operan en el territorio (Karol y San Juan, 2021). Ese abordaje implica articular conocimientos, capacidades, intereses, modalidades y estilos de gestión intra/interjurisdiccionales, intra/interinstitucionales e intra/interpersonales.



Figura 2: Actores institucionales que construyeron la gestión de la idea.

### La cogestión multiactoral

Este proceso de cogestión y multiactoral, implica varias acciones orientadas a: (a) construir *interfaces* entre la producción de conocimientos científicos y la formulación y aplicación de políticas públicas; (b) establecer *redes* entre actores públicos estatales, no estatales y científicos; (c) especificar *circuitos*, *herramientas* de comunicación entre los actores y (d) aplicar un *modelo de gestión participativa* para conducir aquellos conocimientos, capacidades, intereses y modalidades de gestión propias de cada sector, con lo cual modificar algunos procesos y prácticas vigentes que pueden condicionar el arribar al objetivo planteado, así como transformar abordajes fragmentarios y a-sistémicos. Como se ha mencionado, el modelo de gestión determina el estilo de gestión del sistema.

En la Figura 3 se expone la representación, bajo *lógica sistémica*, de los actores institucionales y sectoriales (entendidos como subsistemas) y sus relaciones, que se traducen en flujos de información de materia y también simbólicos. Este abordaje se funda en la noción del análisis de *actores interactivos*, en la autoorganización de los subsistemas (por ende, del sistema) a partir de acciones transformadoras, de los actores involucrados, de los subsistemas (sectores) y de las relaciones intra/extrasistema en relación con su entorno, y que se modifican, en este caso positivamente, en cuanto al sistema de múltiples actores (Ferber, 1994; García, 2000).

El sistema está compuesto por: (i) El *Subsistema Público-Privado*, con capacidades de decisión en la formulación y aplicación de políticas públicas sociales, recursos económico-financieros, capacidades de gestión, de comunicación y difusión. (ii) El *Subsistema Científico-Técnico provincial y nacional se involucra en la aplicación de aquellos conocimientos y desarrollos técnicos (I+D+i) en el marco del desarrollo sustentable*. (iii) El *Subsistema Productivo* ofrece sus servicios para concretar lo material, garantizando la calidad del producto o bien en cuestión. En la figura también se observa una fuerte articulación/interacción entre el PROINGED y el IIPAC, encargados de materializar la idea con diferentes funciones y aportes (etapas de proyecto, licitación y asesoramiento en la etapa de construcción), donde se intensifica en la etapa de construcción agregándose un nuevo actor, la Empresa Constructora.

El sistema tiene una frontera e interactúa con su entorno. En él convergen diversos flujos que condicionan y dan sentido al/los modelo/s de gestión/s: (i) La *realidad Climático-Territorial*, que se define por las condiciones del sitio de emplazamiento del proyecto y la obra (Ciudad de La Plata, localidad de M.B. Gonnet, Campus Tecnológico de la CIC) y las condiciones climáticas y ambientales; (ii) la *realidad Social* de este proyecto, que tiene por características intrínsecas ser demostrativo y formativo para la sociedad (profesionales, científicos, académicos y sociedad civil) de la inclusión de conocimiento científico-técnico en relación al diseño bioclimático y sustentable y especialmente en cuanto a la incorporación de pautas de eficiencia energética (EE), sistemas pasivos de climatización

(SP) y energías renovables (ER); (iii) la *realidad Provincial, Nacional e Internacional* en cuanto a cuestiones políticas, de gestión y económicas, entre otras, que influyen en el sistema.

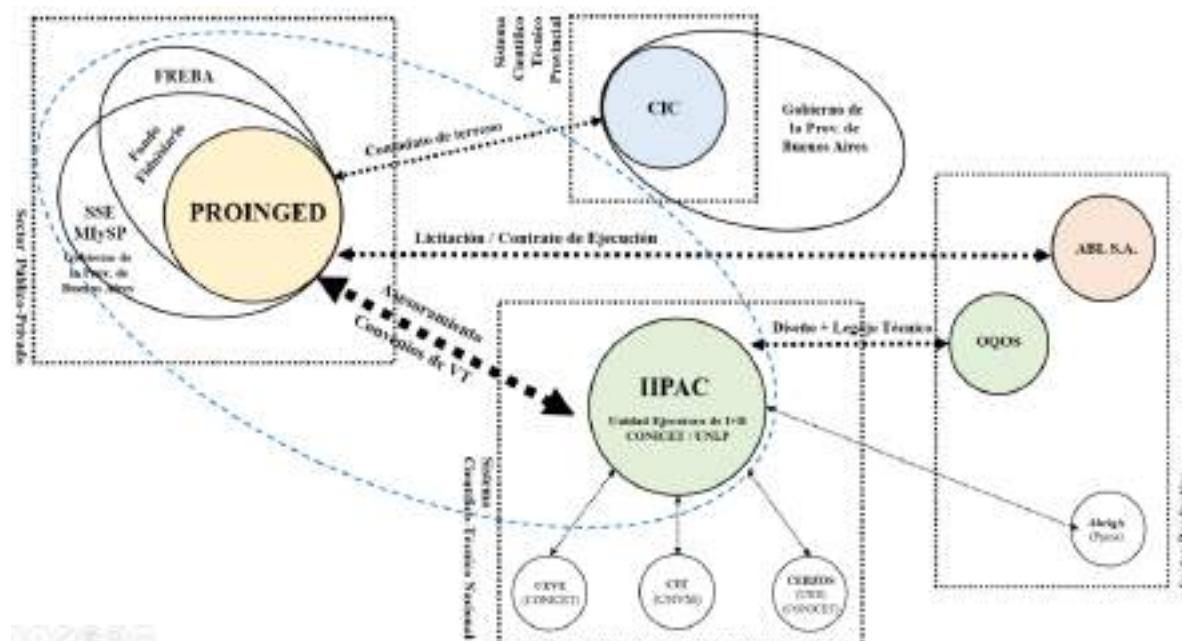


Figura 3: Representación sistémica de la lógica relacional de los actores.

#### Actores involucrados de forma directa en el proyecto

- FREBA: El Foro Regional Eléctrico de la provincia de Buenos Aires (<https://www.freba.org.ar/>) es una asociación civil sin fines de lucro creada en 1999 (Decreto PEP 4052/2000), que tiene por objetivo brindar a sus asociados el asesoramiento técnico, económico, legal y regulatorio necesario para ampliar y mejorar el sistema de transporte y subtransmisión de energía eléctrica en la provincia de Buenos Aires. Su propósito es el de abordar la problemática del Sistema de Transporte Eléctrico y gestionar su crecimiento en la provincia de Buenos Aires. Actualmente está constituido por más de 200 prestadores del servicio público, de distribución de energía eléctrica (nuclea a todas las distribuidoras provinciales y municipales de energía eléctrica de la PBA). En asociación con el Estado provincial, se creó en 2009 el PROINGED, para promover el desarrollo de proyectos que incorporen innovación en generación eléctrica distribuida basada en fuentes primarias renovables para ampliar la oferta energética conjunta a los usuarios actuales y asegurar a las futuras generaciones disfrutar de una mejor calidad energético-ambiental. Dentro de ese proceso asociativo con el Estado provincial (en articulación con la Subsecretaría de Energía del Ministerio de Infraestructura y Servicios Públicos, MIySP) también se enmarca el Instituto de Energía (IDE), que junto a la Federación Argentina de Trabajadores de Luz y Fuerza (FATLyF) y a través de Fundaluz XXI, brinda nuevas herramientas a los trabajadores, estableciendo una plataforma de capacitación para el desarrollo seguro y eficiente de la infraestructura energética

- PROINGED: Es un Programa de gestión público/privada dedicado al incentivo de la Generación Distribuida Renovable (GDR) (<https://www.proinged.org.ar/>) en todo el territorio de la PBA, para abordar la creciente demanda de electricidad con fuentes renovables, buscando demostrar la viabilidad técnica, económica y ambiental de proyectos de generación distribuida renovable. La gestión se encuentra a cargo de una Unidad de Coordinación Operativa (UCOP), integrada por representantes del Ministerio de Infraestructura y el FREBA. Desde el 2009, se ejecutan proyectos que funcionan como unidades demostrativas que demuestran la viabilidad técnica, económica y ambiental de este tipo de emprendimientos. Además, se lleva adelante la ejecución del Subprograma de Eficiencia Energética con intervenciones específicas en obras, que implican la aplicación de nuevas tecnologías y medidas de difusión sobre buenas prácticas en materia de gestión energética. Los fondos que se aplican a la ejecución de proyectos son los que la tarifa eléctrica destina al incentivo a la generación distribuida renovable: Según la reforma de la Ley 11.769 el Art: 43 (Marco Regulatorio Provincial) se prevé la



incorporación en las tarifas de un componente (Agregado Tarifario), en este caso Agregado para Generación Distribuida (GD) según Decreto 4052/00, continuidad por Resolución MIySP 565/08 y Resolución 827/09 (Convenio MIySP con FREBA para creación de PROINGED).

- **CIC:** La Comisión de Investigaciones Científicas de la provincia de Buenos Aires (<https://www.cic.gba.gob.ar/>), creada tras la firma del Decreto N° 21.996 del 5 de diciembre de 1956, es uno de los primeros organismos de ciencia y tecnología del país. Tiene como objetivo capacitar profesionales, desarrollar investigación científica y tecnológica, para generar conocimiento científico y soluciones concretas en áreas de interés con presencia territorial para la gestión del estado provincial, asesorando sobre los temas de competencia al Poder Ejecutivo. Lo hacen a través de la formación de personal científico especializado (256 investigadores, 183 propios y 73 asociados. 219 becarios, 232 personal de apoyo), articulando con PyMES, organismos provinciales y municipios bonaerenses, universidades y otros organismos de CyT (131 Centros de I+D, 7 propios y 142 asociados).
- **IIPAC:** El Instituto de Investigaciones y Políticas del Ambiente Construido es una unidad ejecutora (UE) de Investigación científico-tecnológica de doble dependencia, CONICET-UNLP (<https://iipac.unlp.edu.ar/>), cuya sede se encuentra en la Facultad de Arquitectura y Urbanismo (iniciando sus actividades como IAS, en 1978 y como IIPAC en 2009). Es un instituto con capacidades para contribuir a la construcción del hábitat humano desde una mirada sostenible, mediante el desarrollo y transferencia de conocimiento a gobiernos, instituciones y organizaciones comunitarias y de la sociedad civil, y la promoción de acciones a favor de los diferentes sectores socioeconómico-productivos, a nivel local, nacional y regional. Se especializa en los siguientes campos disciplinares: Arquitectura, Urbanismo, Diseño Bioclimático, Energía, Transporte, Desarrollo urbano, Sociología Urbana, Cambio Climático, Producción Social del Hábitat y Sociología de las organizaciones, integrados en seis Líneas de Investigación con intereses comunes, vinculados a la formación de recursos humanos de grado y postgrado.
- **OQOS:** Es un Estudio de Arquitectura dedicado al diseño y construcción de edificios en diferentes escalas y funciones, con énfasis en el diseño ambiental desde 2019 ([www.oqos.ar](http://www.oqos.ar)). Se asocia al IIPAC para el desarrollo de proyectos bioclimáticos y sustentables. IG: @oqosarquitectos.

#### ***Actores involucrados de forma indirecta en el proyecto***

- **CEVE:** El Centro Experimental de la Vivienda Económica (<https://ceve.org.ar/acerca-de-ceve/>), es una unidad ejecutora de doble dependencia, CONICET y Asociación de Vivienda Económica (AVE). Un centro de investigación, experimentación, desarrollo y transferencia de tecnologías de construcción y gestión integral, destinadas a la producción social del hábitat. En ese campo investiga y desarrolla acciones demostrativas para transferirse a los sectores públicos y privados vinculados al tema. Tiene por misión contribuir a la construcción de un hábitat sustentable mediante el desarrollo de conocimiento y promoción de acciones a favor de los sectores populares a nivel local, nacional y regional. Aportó al proyecto con ladrillos constituidos con reciclado de PET.
- **CIT:** El Centro de Investigaciones y Transferencia Villa María (<https://humanas.unvm.edu.ar/cit-villa-maria/>), unidad de doble dependencia CONICET y la Universidad Nacional de Villa María, la cual promueve la generación y transferencia de conocimientos a través de I+D con fuerte vinculación con la gestión estatal en las temáticas: Ciencias de la Salud, Arte-cultura y Educación y desarrollos tecnológicos. Aportó con placas de reciclado de cáscara de maní, como bio-material.
- **CERZOS:** Laboratorio de Biotecnología de Hongos Comestibles y Medicinales (<https://www.cerzos-conicet.gob.ar/>). Está conformado por un equipo interdisciplinario de investigadores científicos que pertenecen al CONICET, la Universidad Nacional del Sur (UNS) y la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CIC). Aportó con ladrillos y placas como aislantes térmicos constituidas con diferentes sustratos y micelio de hongo, como un bio-material.

- **AbrigaA:** Es un equipo multidisciplinario que desarrolla productos utilizando la lana de oveja (<https://abriga.com.ar/>), con capacidades termoacústicas para implementarse en la construcción. Aportó al proyecto con manta de lana de oveja, como un bio-material.
- **ABL S.A.:** Es una Empresa Constructora, localizada en la ciudad de La Plata, dedicada a materializar obras de diferentes tipos y dimensiones.

### ***El servicio de vinculación***

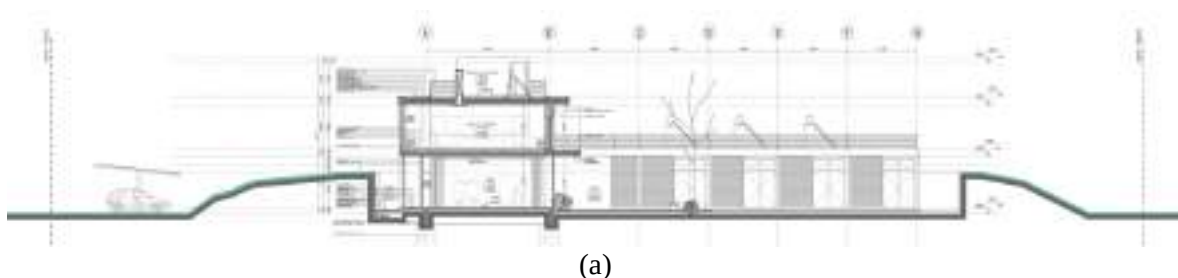
La vinculación tecnológica se inscribió en la realización de una propuesta y asesoramiento para la construcción de un edificio demostrativo (1000 m<sup>2</sup>) de la aplicación de pautas bioclimáticas y sustentables. El objetivo general de la idea, inicialmente planteado fue el de “Construcción y puesta en funcionamiento del primer Centro de Energías Renovables y Eficiencia Energética de la provincia de Buenos Aires”, incluyendo que (i) sea sede referencial para toda la provincia, (ii) que se integre con otros organismos y agentes del sector eléctrico provincial, (iii) que sea un Centro de I+D+i en eficiencia energética y generación renovable, (iv) que sea un Centro demostrativo y de difusión de la temática y (v) que se convierta en un Centro educativo y de capacitación.

Se localiza en el Campus Tecnológico de la Comisión de Investigaciones Científicas de la provincia de Buenos Aires (CIC PBA) a 6 kilómetros del centro del casco urbano de la ciudad de La Plata, en la localidad de M. B. Gonnet, sobre el camino Centenario, avenida altamente transitada, entre las calles 505 y 508 (Latitud: 34°53'06.76" S, Longitud 58°00'23.86" O, ASNM 10 m.s.n.m.). El predio tiene las siguientes dimensiones: 90 m por 75 m y 6750 m<sup>2</sup>.



*Figura 4: Localización del edificio*

**Condiciones funcionales:** Se trata de un edificio destinado a localizar actividades de I+D+i, formación y administrativas, con el siguiente programa de necesidades. (a) En planta baja: hall de acceso y espacio para exposiciones permanentes y transitorias. Salón de usos múltiples (SUM) para 140 personas para reuniones plenarias, seminarios, conferencias, con posibilidad de dividirse en dos salas menores; talleres con un sector de trabajo con posibilidad de dividirse en tres espacios, de manera flexible. Sala de armado: taller de armado de piezas y/o componentes. Kitchenette, servicios sanitarios, salas de máquinas, patios destinados a exposiciones, reunión de visitantes. (b) En planta Alta: oficinas de trabajo para autoridades y colaboradores de FREBA y PROINGED, sala de reuniones, área de trabajo general para el personal y sanitarios, kitchenette y archivo. (c) En la terraza, un laboratorio a cielo abierto (LCA) con localización de equipos para calentamiento de agua solar sanitaria, equipos fotovoltaicos, aerogenerador, estación meteorológica, lucarnas y chimeneas solares (Figura 5).



(a)

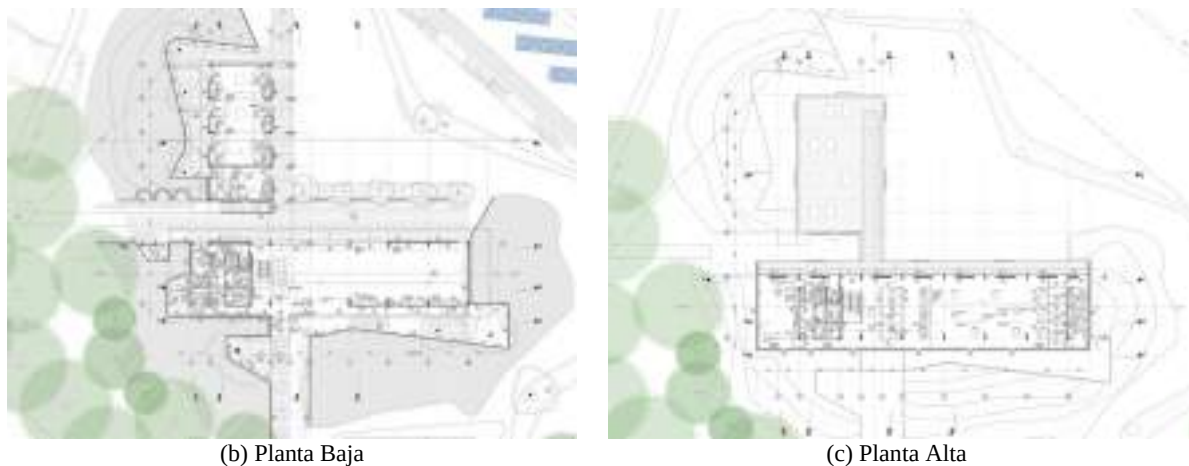


Figura 5: Documentación del edificio. (a) corte transversal del edificio. (b) planta baja del edificio. (c) planta alta del edificio.

Condiciones ambientales: La ciudad de La Plata está localizada en la Zona Bioambiental III (Templada Cálida), subzona IIIb húmeda, con baja amplitud térmica (menor a  $14^{\circ}\text{C}$ ), con influencia del río de La Plata (Norma IRAM, 2011). La situación bioclimática del sitio en cuanto a acondicionamiento de los espacios interiores es de un 73% de las horas de año, con unos 1668 GD de calefacción en base  $20^{\circ}\text{C}$ ; en confort el 7% de las horas del año; acondicionamiento estival en un 12% y con sombreado en un 8% (Gonzalo, 2015). Según el climograma de B. Givoni, las pautas generales son: 1 y 2: Confort de invierno y verano; 3: Ganancias internas; 4: Calefacción solar pasiva, 5: Calefacción solar pasiva y 12: Ventilación natural o mecánica. El edificio cumple con la Ley 13.059 (2003) de la provincia de Buenos Aires y su Decreto Reglamentario 1040, donde se establecen las condiciones de acondicionamiento térmico exigibles en la construcción de edificios para mejorar la calidad de vida y reducir el impacto ambiental mediante el uso eficiente de la energía (Figura 6).

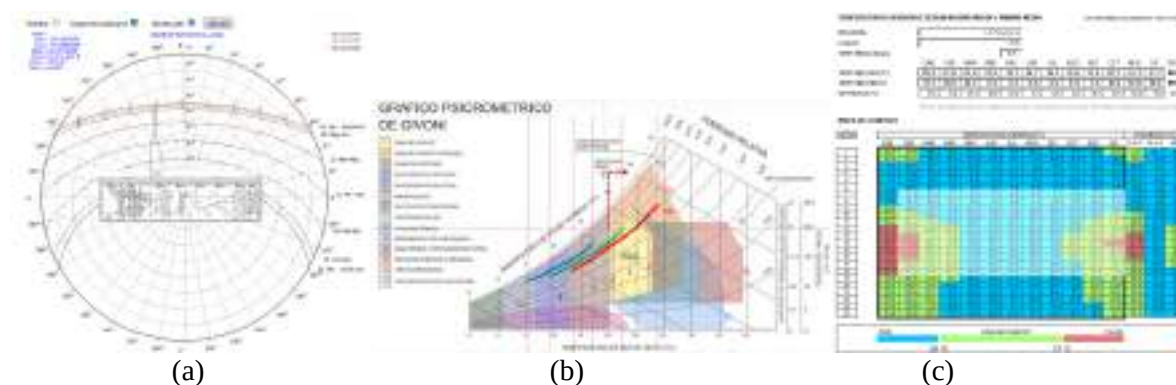


Figura 6: Condiciones bioclimáticas. (a) Orientación helio-energética; (b) Pautas de diseño bioclimáticas. Diagrama de B. Givoni.; (c) Mapa de Confort para La Plata. Temperatura entre  $20$  a  $27^{\circ}\text{C}$  Período diario de uso: 7 a 18hs. (Gonzalo G, UNT).

Partido energético y ambiental: Se basó en localizar un prisma de 43 m de largo por 11 m de ancho y 3.6 m de altura, a 3.4 m sobre nivel de terreno (+1 m), de modo de poder visualizarse desde el Camino Centenario a 150 m, con orientación helio-energética plena al norte de una de sus fachadas (superficie útil expuesta vertical, con azimut  $0^{\circ}$ , de  $120.4\text{ m}^2$ ). En la orientación sur se localiza un bosquecito de eucaliptos añosos que, junto con un talud construido de una altura de 2.6 m, sobre las orientaciones este, sur y oeste, protege la planta baja del edificio de las inclemencias del tiempo, sobre todo en el período invernal.

Las pautas de diseño, sistemas y materiales en cuanto a eficiencia energética y energías renovables adoptados son las siguientes:

- (i) Pautas de diseño: protección solar en el período cálido, masa térmica media, tratamiento ambiental para el aprovechamiento de la iluminación natural por ventanas al norte, verticales al sur, lucernarios en talleres y claraboyas en espacio administrativo.
- (ii) Aislación higrotérmica de la envolvente edilicia: cubiertas, muros y pisos. Aberturas de PVC con baja infiltración de aire, ruptura de puente térmico y DVH.
- (iii) Sistemas solares pasivos: ganancia directa (GAD) por ventanas al Norte, colectores solares de aire sin masa térmica (CSAi) en el SUM, muros acumuladores de calor modular (MAC) de hormigón y agua en sector de oficinas, ventilación natural cruzada y selectiva por chimeneas solares para ventilación con dámper motorizado, colectores solares para calentamiento de agua sanitaria (ACS).
- (iv) Sistemas solares activos: paneles solares fotovoltaicos para autogeneración (off grid) y conectados a la red local de distribución para la inyección de posibles excedentes (on grid) y un sistema de acumulación en baterías para servicios de emergencia.
- (v) Desde el concepto sustentable, se incorporó: techo verde, acumulación de agua de lluvia (15.00 l) destinada a riego, tratamiento de efluentes sanitarios mediante humedal construido y terreno de infiltración, biomateriales como aislación termoacústica de lana de oveja y placas de micelio de hongos, materiales reciclados tales como placas de cáscara de maní, aislación térmica de EPS reciclado y ladrillos de PET.

A continuación, se exponen algunas vistas del edificio (Figura 7).



(a)



(b)



(c)



(d)





(e)



(f)



(g)



(h)

Figura 7: Imágenes del edificio. (a) planta de conjunto. (b) Vista del acceso. (c) Vista del conjunto. (d) Vista peatonal. (e) Muros acumuladores de calor- MAC. (f) FFVV en cobertizo de automóviles. (g) Vista terraza jardín. (h) Vista terraza laboratorio.

## CONCLUSIONES

La experiencia presentada permite identificar el potencial diferencial de una gestión multiactoral e interinstitucional y multiactoral concebida desde una perspectiva sistémica. La articulación entre actores estatales, no estatales, científicos y técnicos demostró ser una estrategia eficaz para materializar una propuesta arquitectónica sustentable, basada en principios bioclimáticos, y dar lugar a la concreción del primer Centro de Energías Renovables y Eficiencia Energética de la provincia de Buenos Aires. Este edificio y su contenido permitirán la difusión de la estrategia abordada, para su posible replicabilidad.

La metodología empleada se centró en la autoorganización de relaciones y flujos de información, facilitó el intercambio de saberes y la integración de capacidades diversas, lo que contribuyó a modificar prácticas vigentes y superar abordajes fragmentarios. Este enfoque no solo permitió alcanzar el objetivo inicial, sino que habilitó nuevas formas de vinculación tecnológica orientadas a incidir estratégicamente en procesos de transición energética a escala local y regional. Se destaca la integración del sector productivo, como actor fundamental a incorporar en el marco del desarrollo económico de nuestra región. Esta materialización de puesta en acto de un *tipo de modelo de gestión* puso en valor la construcción de un nuevo *actor resultante*, el colectivo y definió el *tipo de gestión*.

En síntesis, este trabajo destaca el valor de los procesos colaborativos en el diseño y gestión de proyectos innovadores, y evidencia la importancia de promover esquemas de trabajo que reconozcan la complejidad de los sistemas sociales, técnicos y ambientales involucrados, en la producción del hábitat sustentable.

## FUENTES DE FINANCIAMIENTO

Convenio de Investigación y Desarrollo, entre el CONICET y FREBA a través del PROINGED. Unidad Ejecutora: IIPAC. CONVE-2022-106393971-APN-GVT#CONICET. 2022.2025.

## REFERENCIAS

- Ferber Jacques (1994). La kénétique: des systemes multi-agents a une science de l interaction. Revue Internationale de Systemique. Vol 8, N°1, pp13-27. Recuperado de: <http://www.res-systemica.org/ris/vol-08/vol08-num-01/ris-vol08-num01.html>
- Follett, M. (1924). Creative experience. Londres: Longmans. Recuperado de: <https://pqm-online.com/assets/files/lib/books/follett.pdf>
- García Rolando (2000). El conocimiento en construcción. De las formulaciones de Jean Piaget a la teoría de sistemas complejos. Barcelona, Gedisa, 252p. ISBN 84-7432-811-X. Recuperado de: <https://repositorio.esocite.la/653/>
- Gonzalo G. (2015). Manual de Arquitectura Bioclimática. Universidad Nacional de Tucumán. Recuperado de: [https://www.academia.edu/41191010/GEgonzalo\\_Manual\\_Arquitectura\\_Bioclimatica](https://www.academia.edu/41191010/GEgonzalo_Manual_Arquitectura_Bioclimatica)
- Norma IRAM, 11603 (2011). Acondicionamiento térmico de edificios. Clasificación bioambiental.
- Karol Jorge, San Juan Gustavo (2021). Bordes que conectan, fronteras que vinculan. Construir interfaces, redes, circuitos y protocolos en/desde el sector público estatal para orientar y conducir la gestión del riesgo hídrico. Pp: 57-84. En Libro GEFRE N° 4, “Fronteras en construcción: prácticas sociales, políticas públicas y representaciones espaciales desde Sudamérica”. Compiladores: T. Porcaro y E. Silva Sandes. Editorial Teseo Press, Buenos Aires, ISBN 978-987-86-9142-8. Recuperado de: <https://www.teseopress.com/fronterasenconstruccion/>
- Ley 13.059 (2003). Condiciones de acondicionamiento térmico en la construcción. Provincia de Buenos Aires, Argentina. Recuperado de: <https://www.argentina.gob.ar/normativa/provincial/ley-13059-123456789-0abc-defg-950-3100bvorpyel>
- Manrique López Aida (2016), Gestión y diseño: Convergencia disciplinar. Revista, Pensamiento y Gestión. Barranquilla, Colombia. ISSN 1657-6276, ISSN 2145-941X. <https://doi.org/10.14482/pege.40.8808>
- Pirez Pedro, Rosenfeld Elías, Karol Jorge, San Juan Gustavo (2003). El sistema urbano-regional de redes de servicios e infraestructuras. Materiales para su estudio. Editorial de la universidad Nacional de La Plata, EDULP. Recuperado de: <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/155510>
- San Juan, et al (2003). Diseño bioclimático como aporte al proyecto arquitectónico. Libros de Cátedra. Editorial de la Universidad Nacional de la Plata. Recuperado de: <http://iipac.unlp.edu.ar/libros/>

### THE MANAGEMENT OF AN IDEA: PROVINCIAL CENTER OF RENEWABLE ENERGY LA PLATA, BUENOS AIRES, ARGENTINA

**ABSTRACT:** This paper proposes a reflective, explanatory, and expository approach to the idea management process. It emphasises both the inclusion of scientific and technical knowledge, and the articulation of knowledge and capabilities through inter-institutional and multi-stakeholder management conceived from a systemic perspective. The experience is based on engagement efforts between state and non-state actors, scientists, and technicians, aimed at generating an architectural proposal and providing advice for the construction of a building demonstrating the application of bioclimatic and sustainable guidelines. This is the first Center for Renewable Energy and Energy Efficiency in the province of Buenos Aires. The methodology involved the self-organisation of the system of associations and information flows, as well as the coordination of knowledge, capabilities, interests, and management modalities specific to each sector. This dynamic enabled the development of a comprehensive architectural proposal and the development of technical advisory services aimed at the building's realisation. As a result, progress has been made in overcoming fragmented and asystemic approaches, paving the way for new forms of collaborative management that can strategically impact the energy transition at the local and regional levels.

**Keywords:** Multi-stakeholder management, inter-institutional management, technology integration, sustainable design, public policies.

## **HACIA UN DIAGNÓSTICO SITUADO DE LA VULNERABILIDAD ENERGÉTICA: DATOS OBTENIDOS DEL CENSO ENERGÉTICO 2024 EN BARRIOS POPULARES DE SALTA**

**Melanie L. Pedraza<sup>1</sup>, Cristian M. Lazarte<sup>2</sup>, Maximiliano A. Vilca<sup>3</sup>, Santiago M. Colque<sup>4</sup>,  
Facundo D. F. Gonzalez<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>Instituto de Investigaciones en Ciencias Sociales y Humanidades (ICSOH/CONICET) - Universidad Nacional de Salta (UNSa) - C.P.4400 Salta

<sup>2,3,4</sup>Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta (CIUNSa) - C.P.4400 Salta

<sup>5</sup>Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO/CONICET) - Universidad Nacional de Salta (UNSa) - C.P.4400 Salta

Tel. +54 9 387 452-0872 –e-mail: [melanielutpedraza@gmail.com](mailto:melanielutpedraza@gmail.com)

**RESUMEN:** El objetivo de la investigación es analizar y reflexionar en torno a los principales hallazgos del Censo Energético 2024, teniendo en cuenta sus procesos de diseño e implementación y las tensiones metodológicas y políticas que emergen de ellos. El relevamiento, realizado durante diciembre de 2024, se basó en una muestra representativa de hogares distribuidos en cuatro barrios populares de la ciudad de Salta donde se aplicaron 356 encuestas heteroadministradas. Este estudio articula una perspectiva socio-técnica y situada para analizar múltiples dimensiones del servicio eléctrico, desde cuestiones relacionadas con la infraestructura y las tarifas energéticas hasta las percepciones y sentidos sobre estas. El análisis reveló condiciones estructurales precarias, percepciones negativas sobre el servicio, y una diversidad de estrategias domésticas frente al aumento tarifario y la reducción de subsidios. Los resultados destacan la persistencia de vulnerabilidades energéticas, expresadas tanto en el acceso deficiente como en la percepción del costo, con implicancias directas para el diseño de políticas públicas inclusivas en el contexto de la transición energética. En suma, este instrumento constituye una herramienta clave para diagnosticar las condiciones materiales, simbólicas y sociales del acceso a la energía en sectores urbanos históricamente marginados.

**Palabras clave:** vulnerabilidad energética, barrios populares, hábitat popular, acceso a la energía, políticas públicas.

### **INTRODUCCIÓN**

El acceso a servicios energéticos seguros, asequibles y de calidad constituye un componente indispensable para el ejercicio de una vida digna. La literatura académica ha evolucionado desde una visión centrada en el insumo hacia una comprensión del hábitat popular como una compleja producción social del espacio (Gonzalez, 2019). En esta línea, Bouzarovski y Petrova (2015) proponen superar la dicotomía entre pobreza energética y de combustible, argumentando que toda forma de privación se sustenta en la incapacidad de alcanzar un nivel social y materialmente necesario de servicios energéticos domésticos. Este enfoque, centrado en los servicios que la energía posibilita -calefacción, refrigeración, cocción, iluminación-, enmarca el debate en la tradición de los derechos humanos, posicionando a la energía como un vehículo instrumental para garantizar derechos fundamentales como la vida, la salud y una vivienda adecuada (Hessling Herrera et al., 2023).

Sin embargo, la expansión urbana informal y la profundización de las desigualdades han convertido el acceso a la energía en un factor de exclusión. Lejos de ser un servicio universal, su provisión desigual reproduce y profundiza las brechas sociales. La irregularidad en el acceso no solo representa una barrera material, sino que expone a los hogares a condiciones de inseguridad, riesgos para la salud y procesos





de criminalización que socavan sus derechos y limitan sus capacidades de desarrollo (Duran et al., 2025). La producción de conocimiento científico en esta temática permite comprender y socializar la complejidad presente en el campo.

El diagnóstico de las condiciones energéticas en los barrios populares de Argentina ha cobrado una visibilidad sin precedentes gracias a la creación del Registro Nacional de Barrios Populares (ReNaBaP). Este instrumento se ha vuelto una fuente primordial para la investigación, permitiendo una primera caracterización a escala nacional de la precariedad habitacional y energética (Gonza et al., 2023). Estudios como el de Lopera et al. (2022) han utilizado esta base de datos para identificar patrones estructurales, como la preponderancia de conexiones eléctricas informales (presente en el 62% de los casos) y la casi nula penetración de la red de gas natural (ausente en el 97% de los hogares). Asimismo, el análisis de políticas públicas como el programa "Mi Pieza" ha revelado que, si bien se dirigen a esta población, a menudo no logran abordar la dimensión energética de manera integral, limitándose a refacciones menores sin problematizar la matriz de acceso, los costos diferenciales o la seguridad de las instalaciones (Gonza et al., 2023).

### ***Breve panorama sobre la vulnerabilidad energética en Argentina***

El concepto de pobreza energética -acuñado inicialmente en Europa para describir hogares que destinan más del 10% de sus ingresos al pago de servicios básicos (Boardman, 1991)- resulta insuficiente para captar la complejidad de la precariedad energética en territorios populares latinoamericanos (Durán et al., 2025; Okushima y Tamura, 2011). Frente a ello, se vuelve imprescindible adoptar enfoques más amplios, como el de vulnerabilidad energética, que integren no sólo el acceso económico, sino también las condiciones materiales de las viviendas, las prácticas de consumo y las dinámicas sociotécnicas que configuran el vínculo cotidiano con la energía (Bouzarovski y Petrova, 2015).

En el Sur Global, la vulnerabilidad energética se ha consolidado como una problemática estructural íntimamente asociada a procesos de precarización del hábitat y a la ausencia de políticas públicas que integren las dimensiones técnicas, sociales y simbólicas de la energía (Gonzalez et al., 2025). Argentina no escapa a esta realidad: pese a los avances en cobertura formal, persisten situaciones de acceso irregular, conexiones precarias e inseguras, tarifas segmentadas y una débil implementación de programas de eficiencia energética en las áreas urbanas más postergadas (Hessling Herrera et al., 2024; Durán et al., 2025). Este panorama configura una situación de injusticia energética que es, a su vez, una injusticia habitacional y social.

En la ciudad de Salta, los barrios populares urbanos y periurbanos -surgidos en el marco de procesos de informalización y autogestión- enfrentan serias restricciones en el acceso seguro y regular a los servicios energéticos (González et al., 2025). Sin embargo, la ausencia de indicadores locales que reflejen las dimensiones materiales y simbólicas de esta vulnerabilidad constituye una limitación para la planificación de políticas públicas inclusivas. Asimismo, investigaciones recientes han señalado la necesidad de construir diagnósticos integrales que contemplen la producción social del hábitat, las prácticas de consumo, las percepciones de riesgo y las estrategias de subsistencia energética (Ottavianelli et al., 2021; Duran et al., 2025).

En este marco, resulta indispensable la producción de datos primarios a nivel de hogar que permitan caracterizar con precisión las condiciones de acceso, los patrones de consumo, la infraestructura doméstica y los niveles de vulnerabilidad de la población. En consecuencia, surge la "Encuesta sobre consumos y condiciones energéticas en barrios populares de la ciudad de Salta" (denominada Censo Energético 2024) como una herramienta metodológica y política para mapear estas desigualdades. Por lo expuesto, el objetivo de este trabajo consiste en analizar y reflexionar en torno a los principales hallazgos del Censo Energético 2024, teniendo en cuenta sus procesos de diseño e implementación y las tensiones metodológicas y políticas que emergen de ellos. Asimismo, se busca destacar la relevancia de este tipo de iniciativas para consolidar indicadores propios de vulnerabilidad energética urbana, capaces de orientar estrategias de transición energética justa y popular en contextos de alta desigualdad.

## ESTRATEGIA METODOLÓGICA

El diseño del censo se estructuró a partir de una definición multifuente del universo de estudio (es decir, los barrios populares) y una selección muestral estadísticamente representativa, con el objetivo de capturar la heterogeneidad de las condiciones energéticas en el territorio. La definición de barrios populares se apoyó en la triangulación de fuentes oficiales: el Registro Nacional de Barrios Populares (ReNaBaP), el Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2022 (INDEC) y la Encuesta Permanente de Hogares (EPH). Se consideraron criterios de informalidad, déficit estructural, precariedad habitacional y vulnerabilidad socioeconómica.

El trabajo de campo se focalizó en cuatro conglomerados de la ciudad de Salta que, por su extensión, densidad poblacional y antecedentes de precariedad, resultan emblemáticos de la problemática. Los barrios seleccionados fueron: Barrio Solidaridad, Barrio La Paz, Villa Lavalle y Villa Floresta (incluyendo Villa Floresta Alta), ubicados en las zonas sudeste y este de la ciudad (Figura 1).

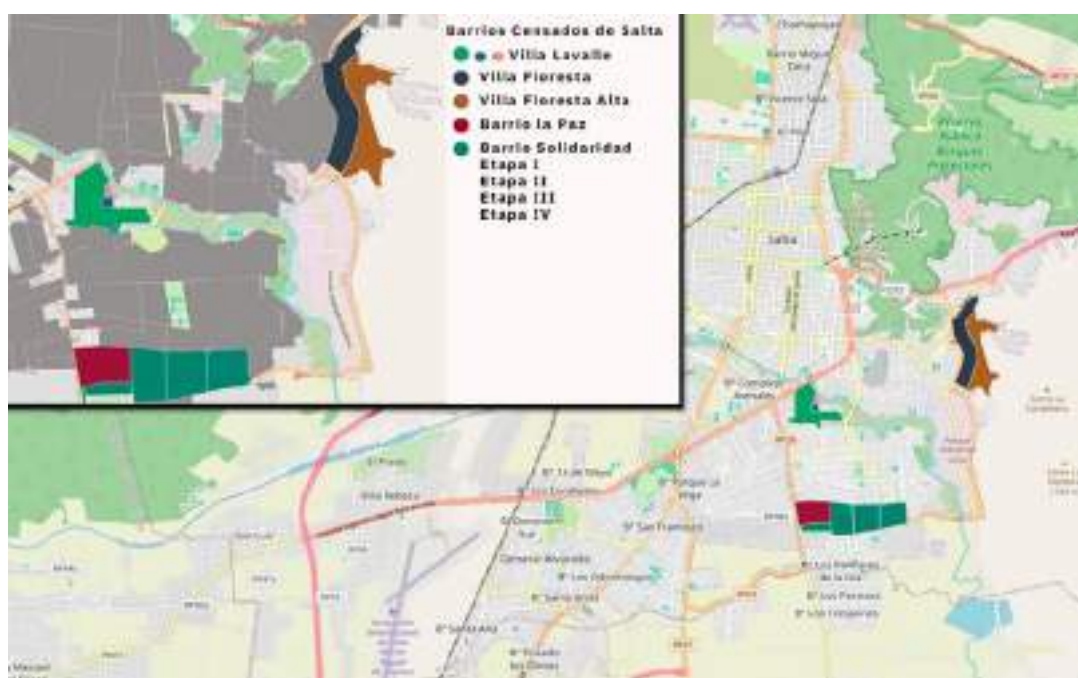


*Figura 1: Ubicación geográfica de los barrios y villas censados. Fuente: Censo Energético 2024.*

Para la selección de las unidades de análisis se optó por un muestreo aleatorio simple, garantizando que cada vivienda tuviera la misma probabilidad de ser incluida (Levin y Rubin, 2004). La población total estuvo constituida por 4.818 viviendas, obtenidas a partir del cruce de datos del ReNaBaP y la Infraestructura de Datos Espaciales de la Municipalidad de Salta (IDEMSa), distribuidas en 2.165 viviendas en Barrio Solidaridad, 1.180 en Villa Lavalle, 1.050 en Villa Floresta y 88 en Barrio La Paz. Para asegurar la representatividad estadística, se calculó un tamaño de muestra de 356 encuestas, con un nivel de significancia del 95% y una probabilidad de error del 5%. La distribución de esta muestra en cada barrio se realizó mediante una ponderación proporcional a la cantidad de viviendas de cada barrio respecto al total, asignando el 44,9% a Solidaridad (160 encuestas), el 24,4% a Lavalle (87 encuestas), el 28,7% a Floresta (102 encuestas) y el 1,8% a La Paz (7 encuestas).

Con la muestra definida, se siguieron las etapas de diseño, prueba, implementación, sistematización y análisis. Se construyó una encuesta estructurada con preguntas cerradas, abiertas, numéricas y de opción múltiple, organizadas en dos bloques temáticos: uno sociodemográfico y otro energético. El primero permitió relevar información básica sobre las personas y los hogares, incluyendo variables como la edad (variable continua), el género, el estado civil, la jefatura de hogar y la condición laboral (variables nominales), así como la composición del hogar medida por la cantidad de personas y familias convivientes (variables discretas). También se incorporaron el nivel de ingresos (variable continua), la

percepción sobre la suficiencia de esos ingresos (variable ordinal) y el acceso a ayudas sociales del Estado (variable nominal).

El bloque energético se centró en las condiciones de acceso al servicio, los costos, las formas de pago y la percepción del sistema energético. Se relevaron la tenencia del servicio y del medidor, así como la existencia de conexiones compartidas (variables nominales). Los costos se abordaron como variables continuas, mientras que las formas de pago se clasificaron como variables nominales. La percepción de la relación entre precio y calidad del servicio, al igual que el impacto de la quita de subsidios y los hábitos de ahorro energético, se consideraron variables ordinales, ya que implican una escala jerárquica de respuestas. También se incluyó la frecuencia y horario de interrupciones del servicio, tratadas como variables ordinales o discretas según el tipo de escala empleada. El uso de fuentes energéticas alternativas como gas, leña, carbón o energías renovables fue codificado mediante variables nominales dicotómicas, mientras que la percepción de riesgos eléctricos se midió como variable ordinal y la ocurrencia de accidentes fue registrada como variable nominal de tipo dicotómico. Finalmente, el equipamiento de electrodomésticos se trató como variable discreta en términos de cantidad y nominal en cuanto al tipo de artefactos disponibles.

La clasificación de estas variables se realizó siguiendo los criterios establecidos por Cuestas (2009) y Newbold et al. (2008), quienes recomiendan diferenciar entre variables nominales (aquellas que se expresan en categorías sin orden), ordinales (con categorías jerarquizadas), discretas (valores enteros) y continuas (valores numéricos infinitos dentro de un rango). La modalidad de aplicación fue heteroadministrada y presencial, con formato papel. Participaron 25 encuestadores capacitados quienes también intervinieron en las instancias de prueba piloto, estudio territorial y carga de datos. El trabajo de campo se realizó entre el 6 y el 20 de diciembre de 2024.

El tratamiento de los datos relevados implicó un riguroso proceso de estandarización y estructuración para asegurar la calidad, coherencia y comparabilidad de la información, permitiendo un análisis descriptivo robusto. La base de datos se sometió a una estandarización de formatos y unidades. Para las variables categóricas de respuesta múltiple (ej. "hábitos para reducir el consumo"), se aplicó el procedimiento de codificación binaria *One-Hot-Encoding*, creando columnas independientes para cada categoría posible. Esto facilitó el análisis estadístico posterior. Las respuestas "No Sabe/No Contesta" (NS/NC) fueron tratadas como una categoría válida para visibilizar la falta de información o la indecisión de los encuestados, especialmente en variables de percepción. Se establecieron rangos para variables continuas como los ingresos, con el fin de facilitar la visualización y el análisis comparativo. Por su parte, los riesgos eléctricos se clasificaron según las categorías emergentes de las respuestas abiertas de los propios encuestados (ej. "instalaciones inseguras", "cortocircuitos"), permitiendo cuantificar las problemáticas más recurrentes. Cabe señalar que el procesamiento de los datos se realizó íntegramente en Microsoft Excel, empleando sus herramientas avanzadas para la estructuración, codificación y análisis descriptivo de las variables.

## RESULTADOS

El análisis de los datos recabados por el Censo Energético 2024 permite descomponer la problemática de la privación energética en los barrios populares de Salta en las tres dimensiones de la vulnerabilidad propuestas: la estructural, la socioeconómica y la simbólica. Los resultados no solo cuantifican la precariedad, sino que revelan un sistema interconectado donde las deficiencias de la infraestructura, las limitaciones económicas y las percepciones de riesgo se refuerzan mutuamente, configurando un estado de vulnerabilidad crónica.

### ***La dimensión estructural y socioeconómica: infraestructuras precarias y costos excluyentes***

A primera vista, el acceso a la electricidad parece casi universal, ya que un 97% de los hogares afirma contar con servicio eléctrico en su vivienda (Figura 2). Sin embargo, la vulnerabilidad estructural no reside en la falta de conexión, sino en la calidad, formalidad y seguridad de la misma. El primer indicador de esta precariedad es que un 14,29% de los hogares no posee un medidor eléctrico propio y comparte la energía eléctrica con otra vivienda colindante (Figura 3). Esta cifra, que representa a uno de cada siete

hogares, es el punto de partida de la exclusión formal: un acceso no reconocido por la empresa distribuidora es un acceso sin garantías técnicas ni derechos comerciales.

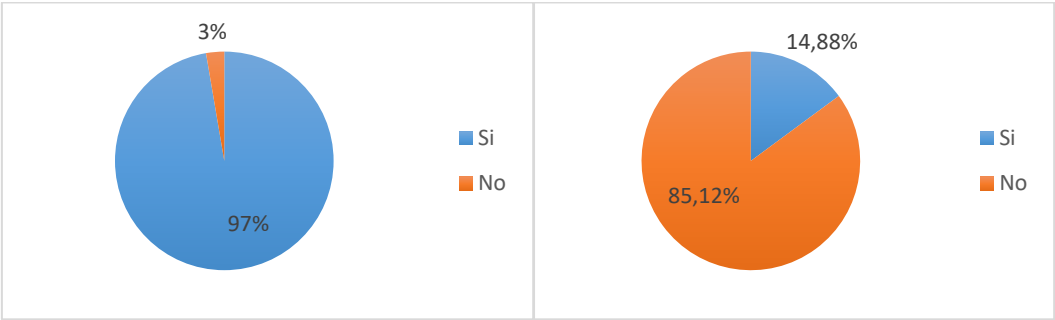


Figura 2: Distribución de hogares según acceso al servicio eléctrico.  
Figura 3: Distribución de hogares según tipo de conexión eléctrica (compartida o independiente).  
Fuente: elaboración propia con base en los datos del Censo Energético 2024.

El censo también revela que un 42% de los hogares sufre interrupciones en el suministro (Figura 4). Para quienes padecen estos cortes, el problema es recurrente: un 27% los experimenta más de una vez al mes, un 9% más de una vez a la semana y un 7% diariamente (Figura 5). Estos cortes no son meras molestias: interrumpen rutinas de cuidado, provocan la pérdida de alimentos y dañan electrodomésticos, materializando la vulnerabilidad en la vida cotidiana. La infraestructura resulta, por lo tanto, un agente que produce y reproduce la precariedad.

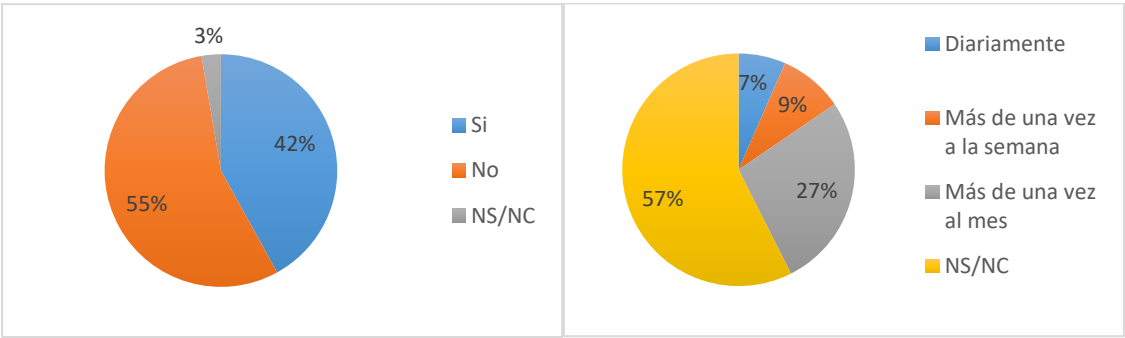


Figura 4: Interrupciones en el suministro eléctrico. Figura 5: Frecuencia de las interrupciones.  
Fuente: elaboración propia con base en los datos del Censo Energético 2024.

Sobre esta base estructural precaria se monta una profunda vulnerabilidad socioeconómica. Los datos exponen un contexto de fragilidad económica generalizada: un 75% de los hogares encuestados considera que sus ingresos no son suficientes para cubrir sus necesidades básicas mensuales (Figura 6) y más del 60% se encuentra por debajo de la línea de la Canasta Básica Total<sup>1</sup> (Figura 7).

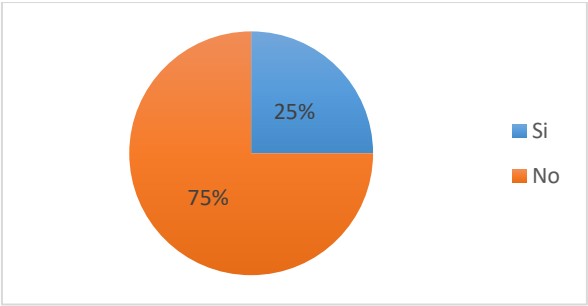


Figura 6: Percepción sobre la suficiencia de ingresos para cubrir necesidades básicas en el hogar.  
Fuente: elaboración propia con base en los datos del Censo Energético 2024.

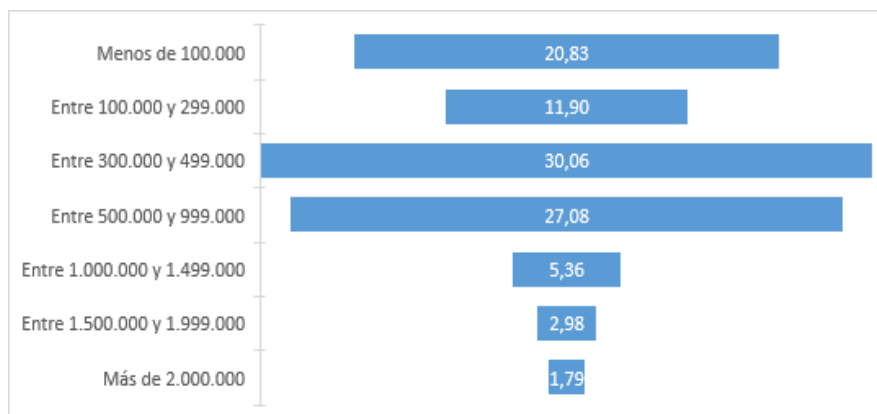


Figura 7: Ingresos aproximados de hogar por mes. Fuente: Censo Energético 2024.

En este escenario de fragilidad económica, el costo de la energía representa una carga desproporcionada. A costos de diciembre 2024, el 57% abona entre \$10.000 y \$49.999, un 33% entre \$50.000 y \$99.999, un 6% entre \$100.000 y \$149.999 y solo un 4% más de \$150.000 (Figura 8). En este escenario, la matriz energética de los hogares agrava la carga económica. La electricidad y el gas son usados en un 99% y 92%, respectivamente, mientras que las energías renovables solo registran 1% de uso, evidenciando una muy baja incidencia de estas tecnologías en sectores populares (Figura 9).

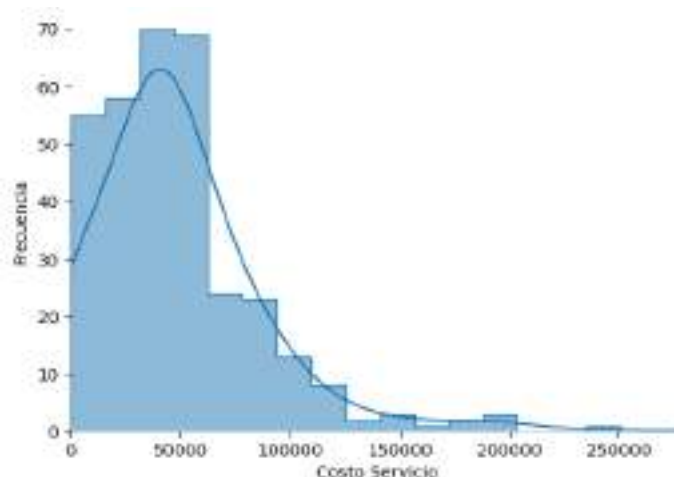


Figura 8: Dispersión de los costos del servicio eléctrico. Fuente: Censo Energético 2024.

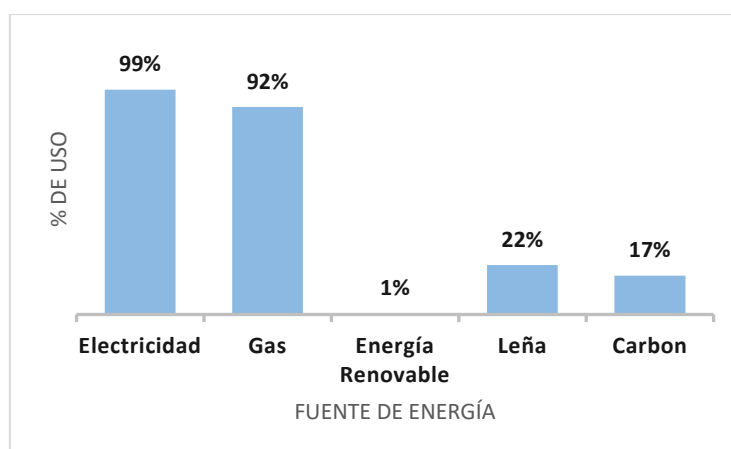
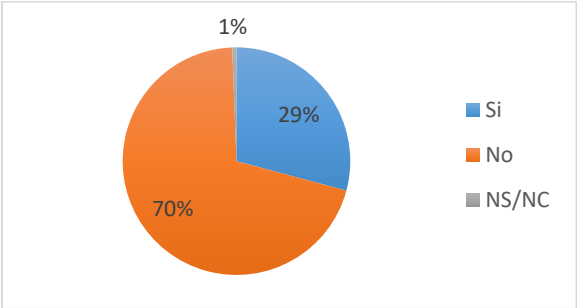


Figura 9: Porcentaje de uso promedio por fuente de energía. Fuente: Censo Energético 2024.

**La dimensión simbólica: percepciones en torno al riesgo eléctrico**

La dimensión simbólica ofrece uno de los hallazgos más reveladores del censo: la disonancia entre el riesgo objetivo y la percepción subjetiva. A pesar de las condiciones de precariedad descritas, una mayoría del 70% de los encuestados afirma no percibir riesgos eléctricos en su hogar. Solo un 29% sí identifica su conexión como peligrosa (Figura 10). Este dato sugiere un proceso de normalización del riesgo, donde la convivencia diaria con la precariedad invisibiliza el peligro latente. Sin embargo, para el 29% consciente del peligro, los riesgos son muy concretos y están directamente ligados a la mala calidad de la infraestructura: instalaciones inseguras (16,4%), antiguas (10,4%), sobrecarga del sistema (7,7%) y cortocircuitos (7,1%) son las causas más mencionadas (Figura 11).



*Figuras 10: Percepción de riesgos eléctricos en el hogar.*  
*Fuente: elaboración propia con base en los datos del Censo Energético 2024.*

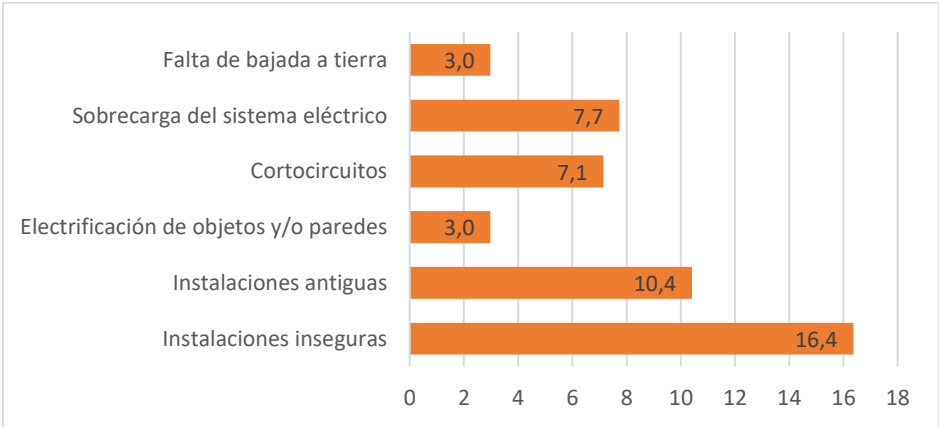


*Figura 11: Tipos de riesgos eléctricos percibidos.*  
*Fuente: elaboración propia con base en los datos del Censo Energético 2024.*

La gravedad de la situación se confirma cuando la percepción se contrasta con la experiencia material. Un 11% de los hogares reportó haber sufrido algún tipo de accidente doméstico asociado a riesgos eléctricos (Figura 12). Esto demuestra que, aunque el riesgo sea subestimado, sus consecuencias son reales y afectan a una porción significativa de la población. La electrocución (55% de los accidentes) es la causa más frecuente, evidenciando la letalidad potencial de estas instalaciones (Figura 13).

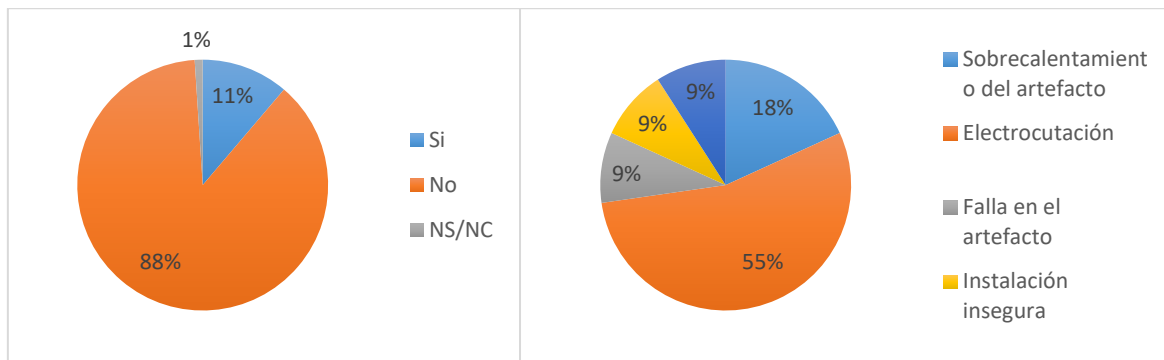


Figura 12: Accidentes domésticos asociados a riesgos eléctricos. Figura 13: Causa de los accidentes.  
Fuente: elaboración propia con base en los datos del Censo Energético 2024.

Frente a estos escenarios, los vecinos no son actores pasivos y desarrollan estrategias de adaptación y resistencia, lo que se podría considerar su agenciamiento. El dato de que en la mayoría de los hogares se toman diversas medidas para reducir el consumo eléctrico (Figura 14) no debería leerse únicamente como una respuesta a los altos precios. Prácticas como "apagar las luces" o "desenchufar electrodomésticos" son también formas de gestionar una red inestable y peligrosa, un intento de ejercer control en un sistema que los excluye. Estas acciones representan un conocimiento práctico y una forma de resiliencia que las políticas públicas suelen ignorar.

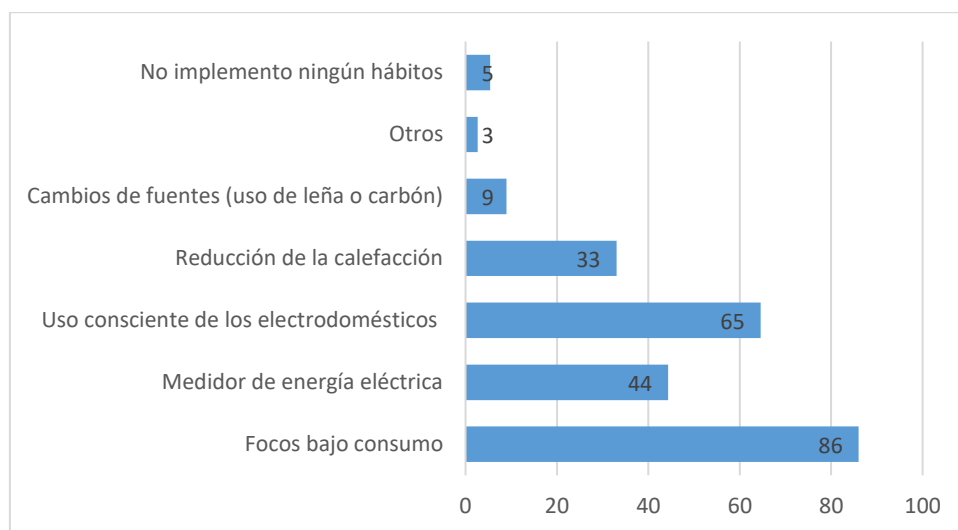


Figura 14: Medidas domésticas implementadas para reducir el consumo energético.  
Fuente: Censo Energético 2024.

### Algunas tensiones y desafíos de la investigación en terreno

El desarrollo de un relevamiento de esta magnitud en territorios complejos no estuvo exento de desafíos, los cuales informan tanto las limitaciones del estudio como las estrategias adoptadas para mitigarlas. La primera tensión es la que existe entre la estandarización y la complejidad. Una encuesta, por su naturaleza, obliga a categorizar y simplificar realidades fluidas. Si bien se logró capturar la heterogeneidad de los barrios, el formato de pregunta cerrada inevitablemente deja fuera los matices de las respuestas individuales de cada encuestado. Estos matices vienen, muchas veces, de las vivencias cotidianas de cada hogar que emergen de la charla con la persona encuestada. Este punto, cabe señalar, permitió a los encuestadores registrar observaciones cualitativas que, aunque no se analizaron como variables, enriquecieron la comprensión del contexto. El desafío metodológico a futuro es cómo complementar esta robustez cuantitativa con aproximaciones cualitativas que den cuenta de esa heterogeneidad interna.



Por otro lado, se registraron resistencias iniciales de algunos hogares a participar en el censo, motivadas por experiencias negativas previas con operativos oficiales y percepciones de desconfianza hacia encuestadores externos. Esta situación fue mitigada parcialmente gracias a la colaboración de referentes comunitarias y organizaciones barriales, quienes facilitaron el ingreso y promovieron la participación de la comunidad. Esta cooperación fue clave para legitimar la labor y facilitar el diálogo con los vecinos. Por último, se observaron estrategias de invisibilización de la informalidad energética por parte de algunos hogares, que tendían a minimizar o no declarar la existencia de conexiones irregulares por temor a sanciones o denuncias, lo que requirió un abordaje sensible por parte de los encuestadores, enfatizando el carácter confidencial y académico del relevamiento. Estas tensiones evidenciaron la necesidad de continuar desarrollando herramientas metodológicas flexibles, que permitan abordar la heterogeneidad del hábitat popular y sus múltiples configuraciones de acceso a la energía.

## CONCLUSIONES

El análisis realizado da cuenta de que el acceso a la energía en los barrios populares de Salta no es un problema resuelto. Los datos revelan un espejismo de inclusión: detrás de una cobertura eléctrica formalmente alta (97%), se esconde una vulnerabilidad sistémica, profunda y multidimensional. La interpretación de las variables, a la luz de las condiciones de pobreza estructural, demuestra que la falta de un medidor propio (14%), la precariedad de las conexiones, la recurrencia de los cortes (42%) y la dependencia de fuentes secundarias costosas e ineficientes no son problemas aislados. Son, en realidad, los síntomas energéticos de una exclusión habitacional, social y económica más amplia, que atrapa a los hogares en un ciclo de gasto elevado, inseguridad constante y derechos vulnerados.

En este contexto, el principal aporte del censo energético es doble. Por un lado, evidencia el potencial de un relevamiento de estas características como herramienta de política pública. Al generar datos primarios, situados y granulares, se ofrece a los gestores públicos y a las organizaciones sociales una base empírica robusta para ir más allá de los diagnósticos generales. Esta herramienta permite identificar los puntos críticos de la vulnerabilidad, comprender las estrategias domésticas de los hogares y, en consecuencia, diseñar intervenciones más justas y eficaces. Por otro lado, el estudio subraya la imperiosa necesidad de integrar las dimensiones técnicas y sociales en la planificación energética. Los resultados demuestran el fracaso de los enfoques puramente técnicos: de nada sirve una alta tasa de conexión si el servicio es inseguro, inasequible y el riesgo se ha normalizado hasta volverse invisible para una mayoría. La percepción subjetiva, las prácticas culturales y las dinámicas de género no son variables secundarias, sino elementos centrales que definen la experiencia del acceso a la energía.

No obstante, esta investigación también deja planteados una serie de desafíos y abre interrogantes para el futuro. El primero es la necesidad de consolidar indicadores propios y complejos para medir la vulnerabilidad energética en contextos regionales. Si bien este censo es un primer paso fundamental, el próximo desafío consiste en sintetizar sus múltiples variables en un índice de vulnerabilidad local que pueda ser monitoreado periódicamente. Este indicador no solo serviría para un diagnóstico más preciso, sino también para evaluar el impacto real de las políticas públicas implementadas.

El segundo desafío es garantizar la sostenibilidad de estas mediciones, continuar con relevamientos periódicos y fortalecer la articulación con los organismos públicos para que esta información no quede en un repositorio académico, sino que nutra de forma sistemática la planificación estatal. Un estudio de estas características corre el riesgo de convertirse en un mero ejercicio académico o en una herramienta de diagnóstico que no se traduce en acción transformadora. La producción de datos, por sí sola, no garantiza la formulación de políticas públicas. Los resultados aquí presentados no son un punto de llegada, sino un punto de partida para que las organizaciones barriales, las instituciones académicas y los organismos estatales puedan dialogar sobre la base de evidencia concreta, disputar el sentido común y co-diseñar soluciones que vayan más allá de la regularización de un medidor. El desafío final, por tanto, es político e institucional: cómo construir los puentes para que la información rigurosa producida por el censo se convierta en un insumo efectivo para la planificación urbana, la política tarifaria y las estrategias de transición energética, asegurando que el derecho a la energía deje de ser un eslogan y comience a materializarse en los territorios más vulnerados.

Aquí se vuelve ineludible la necesidad, señalada a lo largo del texto, de complementar la robustez de datos en diálogo con la intervención cualitativa. ¿Cómo viven las familias la gestión diaria de una red precaria? ¿Qué saberes y estrategias de resiliencia despliegan frente a los cortes y los riesgos? ¿Cómo se negocian los costos en un hogar con medidor compartido? Estas son preguntas que los números pueden plantear, pero que solo la observación y el diálogo abierto pueden responder.

En última instancia, este trabajo busca ser una contribución para pensar una transición energética que no deje a nadie atrás. La energía más justa no es necesariamente la que proviene de una fuente renovable, sino aquella cuyo acceso es seguro, asequible y habilita una vida digna para todos. La pregunta que permanece abierta, y que interpela tanto a la academia como a los responsables políticos, es si seremos capaces de construir una transición energética que, en lugar de reproducir las desigualdades existentes, se convierta en una genuina herramienta de justicia social y territorial.

## NOTA

<sup>1</sup>Dato extraído de la noticia “Una familia tipo debe ganar \$1.024.435 por mes para no ser pobre” publicada en el medio salteño Radio Salta el 15/01/25. <https://www.radiosalta.com.ar/nota/2025-1-15-8-58-0-una-familia-tipo-debe-ganar-1-024-435-por-mes-para-no-ser-pobre>

## FUENTES DE FINANCIAMIENTO

Este trabajo fue financiado por el Proyecto de Investigación TIPO A N°2916/0 “Transición Energética en los Valles Calchaquies y la Puna Salteña: análisis de políticas públicas de energía solar vinculadas con la producción del hábitat en Salta, Argentina” y el Proyecto de Investigación TIPO A N°2710/0 “Caracterización y Factibilidad de Transiciones Energéticas en el noroeste argentino: Redes Inteligentes para un futuro sustentable”, ambos financiados por CIUNSa.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y a la Universidad Nacional de Salta por el financiamiento brindado. Además, agradecen profundamente la colaboración del Grupo de Estudios Socio-técnicos de la Energía y del Hábitat (GESEH), el grupo de referentes comunitarias “Mujeres Plenas” de Villa Floresta y la organización barrial “Casona de La Paz”, quienes hicieron posible la realización del Censo.

## REFERENCIAS

- Boardman, B. (1991). *Fuel poverty: From cold homes to affordable warmth*. Belhaven Press.
- Bouzarovski, S., y Petrova, S. (2015). A global perspective on domestic energy deprivation: Overcoming the energy poverty-fuel poverty binary. *Energy Research & Social Science*, 10, 31-40. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2015.06.007>
- Cuestas, E. (2009). Variables. *Revista de la Facultad de Ciencias Médicas de Córdoba*, 66(3), 118-122. <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/med/article/view/23463>
- Duran, P. A., Hessling Herrera, F. D., y Gonza, C. N. (2025). Vulnerabilidad energética en Salta: Análisis y registro de incendios en viviendas de la capital (2018–2023). *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente (AVERMA)*, 28, 426-437. <https://portalderevistas.unsa.edu.ar/index.php/averma/article/view/4902>
- Gonza, C. N., Hessling Herrera, F., y González, F. D. (2023). “Mi Pieza”: la dimensión energética en una política habitacional para mujeres de barrios populares argentinos. *Cuadernos de Vivienda y Urbanismo*, 16. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.cvu16.mpde>
- González, F. D. (2019). *Estrategias de hábitat en Salta: el caso del Programa de Mejoramiento Barrial (ProMeBa) 2015-2016* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Quilmes]. Repositorio Institucional Digital de Acceso Abierto RIDAA-UNQ. <http://ridaa.unq.edu.ar/handle/20.500.11807/2041>
- Gonzalez, F. D. F., Durán, P. A., Pérez Machado, F. A., Colque, S. M., Cornú, C. N., Cornú, J. A., Govetto, S. C., Pedraza, M. L., Sarmiento Barbieri, N. M., Soria, J. P., Vilte, G. J. L., y Elías, R. F.

- G. (2025). *Censo energético 2024: Encuesta sobre consumos y condiciones energéticas en barrios populares de la ciudad de Salta. Informe descriptivo*. Editorial de INENCO.
- Hessling Herrera, F. D. (2023). Tarifas en Salta durante 2022: Segmentación en la energía eléctrica. *Energías Renovables y Medio Ambiente (ERMA)*, 51, 7-13. <https://portalderevistas.unsa.edu.ar/index.php/erma/article/view/4190>
- Hessling Herrera, F. D., Garrido, S. M., y Gonza, C. N. (2023). Derecho a la energía desde los derechos humanos: transición profunda hacia viviendas adecuadas, un ambiente sano y modos de vida dignos. *Letras Verdes. Revista Latinoamericana de Estudios Socioambientales*, (34), 48–65. <https://doi.org/10.17141/letrasverdes.34.2023.5904>
- Hessling Herrera, F. D., Gonza, C. N., y Duran, P. A. (2024). (In)seguridad energética, infraestructura y criminalización: entre la autogestión de derechos y el poder punitivo. *URVIO. Revista Latinoamericana de Estudio de Seguridad*, (40), 63-81. <https://doi.org/10.17141/urvio.40.2024.6199>
- Instituto Nacional de Estadística y Censos (INDEC). (2022). *Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2022: Resultados definitivos*. [https://censo.gob.ar/index.php/datos\\_definitivos/](https://censo.gob.ar/index.php/datos_definitivos/)
- Instituto Nacional de Estadística y Censos (INDEC). (s.f.). *Encuesta Permanente de Hogares (EPH)*. Recuperado el 10 de octubre de 2025 de <https://www.indec.gob.ar/indec/web/Institucional-Indec-BasesDeDatos>
- Levin, R. I., y Rubin, D. S. (2004). *Estadística para administración y economía* (7.<sup>a</sup> ed.). Pearson Educación.
- Lopera, D. F., Durán, R., y Condorí, M. (2022). Acceso a la energía en barrios populares en Argentina. Una aproximación para caracterizar la pobreza energética en el espacio urbano. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, 50, 29-35. <https://portalderevistas.unsa.edu.ar/index.php/erma/article/view/3862>
- Municipalidad de Salta. (s.f.). *Infraestructura de Datos Espaciales de la Municipalidad de Salta (IDEMSa)*. Provincia de Salta. Recuperado el 2 de agosto de 2025, de <https://idemsa.municipalidadsalta.gob.ar/visor.php>
- Okushima, S., y Tamura, M. (2011). Identifying the sources of energy use change: Multiple calibration decomposition analysis and structural decomposition analysis. *Structural Change and Economic Dynamics*, 22, 313–326. <https://doi.org/10.1016/j.strueco.2011.07.003>
- Ottavianelli, E., González, F., y Cadena, C. (2021). Hábitat y pobreza energética en zonas rurales aisladas en el noroeste Argentino. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 5(5), 7997-8017. [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v5i5.886](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v5i5.886)
- Newbold, P., Carlson, W. L., y Thorne, B. M. (2008). *Estadística para administración y economía*. Cengage Learning.
- Secretaría de Integración Socio Urbana. (s.f.). *Registro Nacional de Barrios Populares (RENABAP)*. Ministerio de Capital Humano, Gobierno de Argentina. Recuperado el 2 de agosto de 2025, de <https://www.argentina.gob.ar/desarrollosocial/renabap>

## **TOWARDS A SITUATED DIAGNOSIS OF ENERGY VULNERABILITY: DATA OBTAINED FROM THE 2024 ENERGY CENSUS IN POPULAR NEIGHBORHOODS OF SALTA**

**ABSTRACT:** The objective of the research is to analyze and reflect on the main findings of the Energy Census 2024, taking into account its design and implementation processes and the methodological and political tensions that emerge from them. The survey, carried out during December 2024, was based on a representative sample of households distributed in four popular neighborhoods of the city of Salta where 356 hetero-administered surveys were applied. This study articulates a socio-technical and situated perspective to analyze multiple dimensions of the electricity service, from issues related to infrastructure and energy tariffs to perceptions and meanings about them. The analysis revealed precarious structural conditions, negative perceptions about the service, and a diversity of domestic strategies in the face of tariff increases and subsidy reductions. The results highlight the persistence of energy vulnerabilities, expressed both in poor access and in the perception of cost, with direct implications for the design of inclusive public policies in the context of energy transition. In sum, this instrument constitutes a key tool for diagnosing the material, symbolic and social conditions of energy access in historically marginalized urban sectors.

**Keywords:** energy vulnerability, informal neighborhoods, popular habitat, energy access, public policies.

## EL HVO COMO COMBUSTIBLE LIMPIO EN ARGENTINA: ANÁLISIS DE IMPACTO Y OBSTÁCULOS CLAVES

**Juan Pablo Cecchini<sup>1</sup>, Ernesto E. Coutsiers<sup>2,3</sup>, Mariela Colombo<sup>2</sup>, Viviana A. Venturino<sup>4</sup>,  
Ramiro Rodríguez<sup>2,5</sup>**

<sup>1</sup>Universidad Nacional de Rafaela, Santa Fe, Argentina.

Bv. Roca 989, CP 2300, Rafaela, Argentina. [juanp.cecchini@unraf.edu.ar](mailto:juanp.cecchini@unraf.edu.ar)

<sup>2</sup>Calden Consultoría SRL – Av. Padre Mariani 478, Villa Allende (5105), Córdoba  
[www.caldenconsultoria.com](http://www.caldenconsultoria.com) +54 351 7000717, [mcolombo@caldenconsultoria.com](mailto:mcolombo@caldenconsultoria.com)

<sup>3</sup>Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de Salta - Av. Bolivia 5150, Salta (4408),  
[www.exactas.unsa.edu.ar](http://www.exactas.unsa.edu.ar) +54 387 4255408, [ecoutsiers@exa.unsa.edu.ar](mailto:ecoutsiers@exa.unsa.edu.ar)

<sup>4</sup>GIADDEH - Grupo de Investigación Aplicada de Estudio y Difusión de Emprendimientos  
Energéticos basados en hidrógeno, UTN Concordia; [vventurino2015@gmail.com](mailto:vventurino2015@gmail.com)

<sup>5</sup>Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba,  
Córdoba, Argentina. [ramiro.rodriguez@unc.edu.ar](mailto:ramiro.rodriguez@unc.edu.ar)

**RESUMEN.** El Aceite Vegetal Hidrotratado es una alternativa renovable al diésel fósil, clave para la descarbonización del transporte. Este trabajo evalúa el potencial ambiental de la adopción de este diésel renovable en Argentina, enfocándose en la reducción de emisiones de carbono en vehículos con motores de encendido por compresión. Se analizan las propiedades fisicoquímicas del combustible, su impacto en las emisiones del motor, la viabilidad económica y los desafíos de una cadena de suministro sostenible. Los cálculos de la huella de carbono se basan en metodologías de Análisis de Ciclo de Vida del pozo a la rueda, obteniéndose una reducción neta del 75% en las emisiones de carbono para el combustible puro, similar a la observada en estudios internacionales.

A nivel económico, el análisis de paridad de costos muestra que, al considerar el impuesto a las emisiones de carbono, el precio del diésel renovable para una planta piloto se igualaría al precio del diésel fósil (punto de equilibrio) en el año 2043. La implementación a gran escala dependerá críticamente de la disponibilidad de materias primas sostenibles, como el aceite de soja, grasas animales y el aceite de cocina usado, y de políticas que superen la brecha de costos inicial.

**Palabras clave:** Aceite Vegetal Hidrotratado, diésel renovable, emisiones de CO<sub>2</sub>, desfosilización, descarbonización.

## INTRODUCCIÓN

El interés global en la mitigación del cambio climático impulsa la búsqueda de combustibles más limpios para el sector transporte, uno de los mayores emisores de carbono. En este contexto, el Aceite Vegetal Hidrotratado (HVO), también llamado "diésel renovable" o "diésel verde" (Ashraful et al., 2014) emerge como un biocombustible avanzado con gran potencial para la descarbonización de la flota de vehículos con motores de encendido por compresión (CI), especialmente en el transporte pesado.

El HVO se distingue por ser un reemplazo directo ("*drop-in*") del diésel fósil, lo que permite su uso en motores CI existentes sin necesidad de modificaciones. Esto lo diferencia del biodiésel de primera generación (FAME, *Fatty Acid Methyl Ester*) resultante mayormente del proceso de transesterificación, con el cual comparte algunas materias primas, pero difiere en su proceso de producción y composición química (Ashraful et al., 2014). El HVO se produce mediante el hidropocesamiento catalítico de



materias primas renovables como aceites vegetales, grasas animales o materiales de desecho, incluyendo el aceite de cocina usado (*UCO*, por sus siglas en inglés *Used Cooking Oil*). Su composición predominantemente parafínica (hidrocarburos saturados o alcanos) lo hace químicamente similar al diésel fósil, libre de azufre y aromáticos (Szeto y Leung, 2022). La adopción de combustibles como el HVO es una preocupación global; la Comunidad Europea, EE. UU. y países como Brasil evalúan su incorporación a la matriz energética (Azeredo et al., 2025).

Este estudio se propone analizar la adopción de HVO en Argentina, enfocándose en evaluar su potencial ambiental, es decir, su capacidad para reducir las emisiones de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) en la flota diésel. Además, se consideran los desafíos económicos y de suministro para una posible implementación, comenzando por la proyección de costos para una planta piloto. Finalmente, el trabajo busca sintetizar el conocimiento actual sobre las propiedades del HVO, su impacto en las emisiones del motor y su sostenibilidad ambiental mediante un enfoque de ciclo de vida.

### ***Producción y Propiedades del HVO***

El proceso principal para producir este biocombustible es el hidroprocesamiento o hidrotratamiento de materias primas lipídicas (Gomes et al., 2025), en el que se convierten triglicéridos y ácidos grasos libres en hidrocarburos parafínicos aptos para combustible diésel (Pérez-Rangel et al., 2025). Operando a altas temperaturas ( $300^\circ\text{C}$ - $450^\circ\text{C}$ ) y presiones de hidrógeno ( $\text{H}_2$ ) (3 MPa-20 MPa), con catalizadores heterogéneos, se eliminan el oxígeno ( $\text{O}_2$ ) y los dobles enlaces (Vásquez et al., 2017). El objetivo central es la desoxigenación de las moléculas de ácidos grasos, lo que ocurre principalmente por tres rutas que pueden darse de manera independiente, pero en la práctica suelen ocurrir en paralelo y competir entre sí, dependiendo de las condiciones de operación:

- **Hidrodesoxigenación (HDO).** El  $\text{O}_2$  se elimina como agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ) mediante la reacción con  $\text{H}_2$ . Esta vía produce n-alcanos (parafinas de cadena lineal) con el mismo número de átomos de carbono que la cadena de ácido graso original. Esta ruta consume una cantidad significativa de  $\text{H}_2$ .
- **Descarboxilación ( $\text{DCO}_2$ ).** El grupo carboxilo ( $-\text{COOH}$ ) se elimina como  $\text{CO}_2$ . Esta vía produce n-alcanos con un átomo de carbono menos que el ácido graso original y, lo que es importante, no consume  $\text{H}_2$ .
- **Descarbonilación ( $\text{DCO}$ ).** El  $\text{O}_2$  se elimina como monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ) y agua. Esta ruta también produce n-alcanos con un átomo de carbono menos y consume  $\text{H}_2$ .

El producto es esencialmente libre de azufre y compuestos aromáticos (Ashraful et al., 2014). Una ventaja clave es la flexibilidad de materia prima, pudiendo usar: aceites vegetales convencionales y no comestibles, grasas animales de baja calidad y residuos como el *UCO* y el *POME* (*Palm Oil Mill Effluent*) (aceite de efluentes de molinos de aceite de palma). Para mejorar las propiedades a baja temperatura del HVO, se suelen emplear pasos catalíticos adicionales como la isomerización y el hidrocrackeo (Gomes et al., 2025). La isomerización reorganiza las n-parafinas en iso-parafinas ramificadas, mejorando el punto de enturbiamiento y la fluidez (Pérez-Rangel et al., 2025).

Las propiedades clave del HVO relevantes para la combustión incluyen (Dimitriadis et al., 2018):

- **Composición.** Casi en su totalidad hidrocarburos parafínicos, sin azufre, aromáticos ni oxígeno
- **Número de Cetano.** ( $>70$ ), más alto que el diésel convencional (DC) (40 - 55) y el *FAME* ( $>50$ ).
- **Densidad.** ( $\sim 775$ - $785 \text{ kg/m}^3$ ), generalmente más baja que el DC ( $\sim 830$ - $850 \text{ kg/m}^3$ ).
- **Poder Calorífico Inferior (PCI).** Mayor que el DC por unidad de masa ( $\sim 44 \text{ MJ/kg}$ ) pero ligeramente menor o comparable por volumen debido a su menor densidad.
- **Viscosidad Cinemática.** Exhibe una viscosidad cinemática más baja que DC ( $\sim 2.5$ - $3.5 \text{ mm}^2/\text{s}$ ).
- **Propiedades de Flujo en Frío.** Mejores al *ULSD* (*Ultra-Low Sulfur Diesel*) relacionadas con su menor viscosidad
- **Lubricidad.** Muy baja, requiere aditivos mejoradores de lubricidad.
- **Estabilidad.** Demuestra buena estabilidad al almacenamiento y la oxidación, superior al *FAME*.

A continuación, se detallan algunas de las diferencias y similitudes clave entre el HVO y el *ULSD* (Tabla 1), así como entre el HVO y el *FAME* (Tabla 2).

Tabla 1: Comparación HVO vs. ULSD

| Propiedad/<br>Característica             | HVO vs ULSD                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Origen</b>                            | El HVO se produce a partir de materia orgánica renovable, mientras que <i>ULSD</i> tiene una base de petróleo fósil                                                                                                                                                                                                        |
| <b>Composición Química</b>               | El HVO no contiene azufre ni aromáticos, a diferencia del <i>ULSD</i> . La ausencia de estos componentes contribuye a una combustión más limpia                                                                                                                                                                            |
| <b>Número de Cetano</b>                  | El HVO tiene un número de cetano significativamente superior (70-90) al <i>ULSD</i> ( $\approx 51$ )                                                                                                                                                                                                                       |
| <b>Propiedades de Flujo en Frío (FF)</b> | El HVO exhibe excelentes propiedades de FF, con un punto de enturbiamiento y de obstrucción del filtro en frío por debajo de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , superando al <i>ULSD</i> en climas fríos, debido al mayor punto de solidificación o congelamiento de este último, por su contenido de parafinas y aromáticos. |
| <b>Densidad y Contenido Energético</b>   | Densidad del HVO $\approx 7\% <$ densidad del <i>ULSD</i><br>Poder calorífico HVO = 44 MJ/kg; Poder calorífico <i>ULSD</i> = 42,6 MJ/kg<br>(La diferencia se debe al contenido de $\text{H}_2$ )                                                                                                                           |

Tabla 2: Comparación HVO vs. FAME

| Propiedad/<br>Característica             | HVO vs FAME                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Materias Primas</b>                   | Ambos se producen a partir de aceites vegetales no comestibles, grasas animales, lípidos de desecho                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| <b>Proceso de Producción</b>             | El HVO se produce mediante hidrotratamiento, utilizando $\text{H}_2$ a alta presión y temperatura para convertir aceites y grasas en un diésel puro. Este proceso es más costoso, requiriendo instalaciones complejas y gasificación para obtener el $\text{H}_2$ . En contraste, el biodiésel se fabrica mediante transesterificación con metanol y un catalizador, resultando en ésteres metílicos de ácidos grasos ( <i>FAME</i> ) y glicerol como subproducto |
| <b>Composición Química</b>               | El biodiésel contiene grupos oxigenados, lo que afecta su estabilidad, mientras que el HVO no los contiene. La ausencia de oxígeno mejora su estabilidad a la oxidación y su vida útil de almacenamiento                                                                                                                                                                                                                                                          |
| <b>Subproductos</b>                      | La producción de biodiésel genera glicerol, mientras que la producción de HVO genera propano y agua.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| <b>Estabilidad y mezcla</b>              | El HVO tiene una excelente estabilidad a la oxidación y no es propenso al crecimiento bacteriano, a diferencia del biodiésel. El HVO se puede mezclar con combustible fósil en proporciones más altas que el biodiésel                                                                                                                                                                                                                                            |
| <b>Propiedades de Flujo en Frío (FF)</b> | El HVO ofrece mejores propiedades de FF que el <i>FAME</i> lo que es una ventaja en climas fríos, ya que éste último, al compuesto principalmente por ésteres de ácidos grasos, tiende a solidificarse más fácilmente                                                                                                                                                                                                                                             |

### Impacto en las Emisiones del Motor

El uso de *HVO* en motores diésel conduce a reducciones consistentes y significativas en las emisiones de material particulado (*PM*), monóxido de carbono (*CO*) e hidrocarburos no quemados (*UHC*), debido a la ausencia de aromáticos y azufre, y a su alto número de cetano que favorece una combustión más completa (Dimitriadis et al., 2018; Pérez-Rangel et al., 2025).

El efecto sobre las emisiones de óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) presenta aumentos y disminuciones reportados dependiendo de la tecnología del motor, las condiciones de operación (temperatura de combustión) y la calibración. Sin embargo, el retraso del tiempo de inyección, pueden mitigar los aumentos de  $\text{NO}_x$  y reducir simultáneamente emisiones de  $\text{NO}_x$  y hollín (Dimitriadis et al., 2018).

En términos de  $\text{CO}_2$  de escape, el HVO puro (HVO100) resulta en emisiones aproximadamente un 4% más bajas en comparación con el DC. Esta reducción se atribuye a la menor relación carbono-hidrógeno (*C/H*) inherente a su estructura parafínica. En vehículos modernos Euro 6b equipados con sistemas de postratamiento eficientes (SCR, LNT, DPF), el impacto de las mezclas de HVO o HVO-100 sobre los

contaminantes criterio regulados (NO<sub>x</sub>, PM, CO, UHC) disminuye en gran medida y el beneficio de CO<sub>2</sub> en el escape persiste (Hunicz et al., 2025; Dobrzyńska et al., 2020; Suarez-Bertoa et al., 2019).

### **Análisis del Ciclo de Vida (ACV) y Sostenibilidad**

Evaluar el verdadero mérito ambiental de un biocombustible requiere un enfoque de Análisis del Ciclo de Vida (ACV), que considera los impactos ambientales acumulativos, como las emisiones de GEI, a lo largo de toda la cadena de valor ("*del pozo a la rueda*"). El HVO ofrece el potencial de reducciones sustanciales de GEI, con cifras que van del 60% al 95% menos de emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub> en comparación con el DC.

Sin embargo, los ahorros reales de GEI son altamente sensibles a varios factores, especialmente el tipo de materia prima (MP) utilizada y los impactos asociados al cambio de uso del suelo (*LUC, Land Use Change*). Las MP cultivadas específicamente para combustible (p. ej., aceite de palma sin certificación) conllevan mayor huella de GEI debido a la deforestación y la conversión de ecosistemas. Las MP residuales, como el *UCO* o el aceite de resina (*tall oil*), tienen un perfil de GEI más favorable.

El costo de la MP suele representar la mayor parte del costo final de producción del HVO (60%-75%). Esto puede influir en la elección de MP, favoreciendo opciones más baratas con perfiles de sostenibilidad menos favorables. La producción de HVO es también un proceso intensivo en energía y consume H<sub>2</sub>, cuya fuente (renovable o no) impacta significativamente el balance general de GEI (Ajeeb et al., 2025; Gomes et al., 2025; Soam y Hillman, 2019; Ashraful et al., 2014).

## **METODOLOGÍA y DESARROLLO**

### **Metodología para la Adopción en Argentina**

Para evaluar el potencial de adopción en Argentina, se propone una metodología basada en la extrapolación de los hallazgos y modelos de estudios existentes, particularmente el caso brasileño (Pérez-Rangel et al., 2025) con algunas modificaciones.

- **Análisis de Suministro.** Se identifica las principales materias primas disponibles en Argentina (ej., aceites vegetales locales, grasas animales, *UCO*) y se evalúa su potencial de suministro sostenible frente a la demanda proyectada, considerando las lecciones del caso sueco (Soam y Hillman, 2019). Se analizan las capacidades de producción y el potencial uso de este biocombustible en el país.
- **Cálculo de Emisiones de CO<sub>2</sub>.** Se utilizan los factores de emisión (FE) de CO<sub>2</sub> para el DC, el biodiésel de aceite de soja y el HVO estimados por (Pérez-Rangel et al., 2025), asumiendo una reducción neta de 75% en las emisiones de CO<sub>2</sub> para el HVO puro, y de 78.45% para el biodiésel puro, ambas basadas en análisis de ciclo de vida (ACV) "*del pozo a la rueda*" que considera la absorción de CO<sub>2</sub> por los cultivos de materia prima, resultando los FE en  $FE_D = 2,68 \text{ Mt CO}_2/\text{Mm}^3$  para DC,  $FE_{BD} = 0,58 \text{ Mt CO}_2/\text{Mm}^3$  para el biodiesel y  $FE_{HVO} = 0,61 \text{ Mt CO}_2/\text{Mm}^3$  para el HVO. Para la realización de estos cálculos tuvieron en cuenta dos puntos importantes que son:
  - o **Escenarios de Mezcla.** Se modelaron diferentes escenarios de mezcla de combustibles, considerando la incorporación de HVO: **a)** El corte actual vendido en Argentina que contiene 92,5% de diésel fósil y 7,5% de biodiesel según ley 27.640 (Régimen de Corte, 2022). **b)** La incorporación de 7,5% de HVO al corte actual (HVO7,5) quedando con un 7,5% de biodiesel y el 85% restante de DC, que por disponibilidad de materias primas la situación más factible y **c)** La utilización de solamente de HVO (HVO100) que es una situación hipotética deseable pero poco probable por diversos motivos que pueden ser de costos y/o abastecimiento. En base a estas proporciones y los FE mencionados arriba se calcularon los correspondientes para  $FE_{\text{corte actual}} = 2,53 \text{ Mt CO}_2/\text{Mm}^3$  y  $FE_{HVO7,5} = 2,37 \text{ Mt CO}_2/\text{Mm}^3$ .
  - o **Proyección de la Flota Argentina.** Se utilizaron datos históricos y proyecciones del parque automotor diésel argentino que según (AFAC, 2025) creció un 1% el último año por lo que se tomó ese porcentaje para todos los años siguientes. Se calculó la proporción de la flota diésel dividida en tres categorías: *automóviles* (sedanes, hatchbacks, SUV, coupés, descapotables, y familiares), *vehículos livianos comerciales* (pick-ups, furgonetas, camionetas, etc.) y *vehículos pesados* (camiones, ómnibus, etc.). Para cada categoría se asumió un kilometraje de 20.000 y



35.000 km/año para automóviles y vehículos livianos comerciales respectivamente, tomados según datos utilizados por defecto en la página web de AFLEET (Argonne National Laboratory, 2025), y de 100.000 km/año para vehículos pesados (Pérez-Rangel et al., 2025). Para estimar las emisiones asociadas se utilizó un consumo promedio en cada categoría de: 8,3 L/100km, 10 L/100km y 20 L/100km (12, 10 y 5 km/L correspondientemente) para autos, livianos comerciales y pesados, respectivamente. Si bien estas cifras pueden variar significativamente según el tipo de vehículo, modelo, tecnología y condiciones de conducción, se adoptan como una aproximación válida y razonable para los fines del análisis.

- **Análisis Económico.** En este apartado se considera la proyección del costo de HVO para una planta piloto de 10.000.000 L/año, evaluando que en Argentina sería una decisión estratégicamente interesante, ya que este tamaño permite gestionar el riesgo inicial (costo y tecnología) mientras se exploran y aseguran los factores críticos del mercado local (MP y regulación), permitiendo probar la logística de recolección y pretratamiento de sebo animal, UCO y subproductos de la industria aceitera a la escala necesaria. Si la planta requiere 7.800 t de MP al año (con densidad 0,78 kg/L), esta escala es manejable para asegurar el suministro local.

## RESULTADOS

A continuación, se analizan en detalle los principales factores que posicionan a Argentina como un país con alto potencial para el desarrollo de la producción de HVO, considerando tanto los aspectos técnicos como estructurales mencionados previamente.

### **Potencial suministro de materias primas lipídicas para la producción de HVO en Argentina**

El HVO utiliza en gran medida la misma MP que el FAME, lo que significa que las cadenas de suministro para su producción son, en general, tan seguras como el mercado de biodiesel en general, ya que se cuenta con abundante oferta de materias primas (Epifanio y Ernst, 2019).

#### **1. Aceite de Soja (y Subproductos)**

Argentina se posiciona como uno de los principales productores y exportadores mundiales de aceite de soja. Aunque éste es un producto primario y no un "residuo", su vasta disponibilidad como coproducto de la molienda de la oleaginosa lo convierte en la MP con mayor volumen potencial para la industria de biocombustibles avanzados. Subproductos del procesamiento como aceites de descarte o de menor calidad de la refinación también constituyen fuentes lipídicas valiosas (Agrositio, 2025).

- **Ubicación Principal.** La producción se concentra predominantemente en la región de la Pampa Húmeda. Los mayores polos industriales de molienda se encuentran en las provincias de Santa Fe (especialmente en el cordón industrial del Gran Rosario), Córdoba y Buenos Aires.
- **Cantidades Estimadas.** La producción de aceite de soja en Argentina típicamente supera los 7 a 9 Mt/año, lo que representa una base material para la expansión de la capacidad de HVO, considerando su destino actual hacia exportaciones y consumo alimentario.

#### **2. Grasas Animales (Sebo Vacuno y Porcino)**

Las grasas animales, principalmente el sebo vacuno y porcino, son subproductos directos de la actividad frigorífica argentina. Estas grasas representan una MP de alto contenido energético y son altamente adecuadas para la producción de HVO debido a su composición de ácidos grasos. Su disponibilidad está ligada al volumen de faena del sector ganadero. (SAGyP, 2025).

- **Ubicación Principal.** La generación de grasas animales se concentra en las provincias con mayor actividad ganadera e industrial frigorífica. Se destacan Buenos Aires, Santa Fe y Córdoba. También existen volúmenes significativos en otras provincias ganaderas como La Pampa y Entre Ríos.
- **Cantidades Estimadas.** La producción anual de sebo crudo en Argentina ronda las 120.000 t dependiendo de las variaciones interanuales en la actividad de faena, y unas 60.000 t se destinan a exportación. Considerando los subproductos grasos y residuos bovinos, la cifra ronda 330.000 t/año. La producción de sebo (*tallow*) refinado se ubicó en 234.000 t, valores obtenidos el año 2020.

### 3. Aceite de Cocina Usado (UCO - Used Cooking Oil)

El UCO es un residuo valioso generado en hogares, el sector gastronómico (restaurantes, hoteles) e industrias alimentarias. Su utilización para la producción de HVO es particularmente atractiva desde una perspectiva de sostenibilidad ambiental, ya que transforma un desecho en un recurso. Sin embargo, su recolección y pretratamiento eficiente son desafíos logísticos clave (RAAVU, 2025).

- Ubicación Principal. Volúmenes significativos de UCO se generan en grandes centros urbanos como Ciudad Autónoma de Buenos Aires (CABA), Gran Buenos Aires, Córdoba, Rosario (Santa Fe), Mendoza, y otras capitales provinciales son las fuentes más importantes debido a su alta densidad poblacional y concentración de establecimientos gastronómicos.
- Cantidades Estimadas. El potencial teórico de UCO en el país ronda en 200.000 t/año y se desechan estimativamente entre 64 y 91 millones de litros de aceite vegetal usado por año. No obstante, la cantidad efectivamente recolectada y disponible para la industria es una fracción de este potencial, sujeta a la infraestructura de recolección y reciclaje, que en términos concretos es difícil de estimar.

### 4. Cultivos no alimentarios

El desarrollo de biocombustibles de segunda y tercera generación en Argentina se beneficia del uso de cultivos no alimentarios que se adaptan a condiciones marginales, lo que evita competir con la producción de alimentos. Entre las especies prometedoras se encuentran *Camelina sativa*, *Brassica carinata*, *Jatropha curcas* y diversas microalgas. La *Camelina sativa* se adapta bien a suelos de baja fertilidad y climas templados/secos. Sus rendimientos de semilla equivalen a aproximadamente 1.000 litros de aceite por hectárea. La *Brassica carinata* es robusta, crece bien en invierno y tiene un potencial para expandirse en el sur de América. La *Jatropha curcas*, una alternativa interesante para el noroeste argentino en tierras no aptas para alimentos produce entre 540 y 680 litros de aceite por hectárea y sus subproductos son aprovechables energéticamente. Además, especies halófitas como la *Salicornia bigelovii* pueden crecer en suelos salinos del oeste y sur del país, lo que ayuda a recuperar ecosistemas degradados. Las microalgas, como *Chlorella vulgaris* o *Scenedesmus sp.*, son una fuente de lípidos muy prometedora, con rendimientos estimados superiores a 8.000 litros de biodiésel por hectárea al año, y se pueden cultivar en aguas residuales o salinas, lo que elimina la presión sobre las tierras agrícolas.

- Ubicación Principal. Estos cultivos se desarrollan en zonas actualmente subutilizadas como suelos de baja fertilidad, cuyo potencial de cultivo depende de la rentabilidad y las políticas de incentivo.
- Cantidades Estimadas. Es difícil estimar el potencial a cultivar, ya que este número depende de múltiples factores como la rentabilidad, condiciones del mercado y políticas de incentivo. El informe WISDOM Argentina (FAO, 2009) confirma la existencia de un gran potencial de recursos bioenergéticos en el país y proporciona el marco de análisis adecuado para abordar esta cuestión.

### Análisis de Suministro: Capacidad de Producción

A diferencia del FAME, donde Argentina es un gran productor y exportador, la producción de HVO es incipiente y con proyectos en curso como es el caso de la empresa Santa Fe Bio (AdeC, 2025), que plantea una producción a escala comercial significativa. El país cuenta con condiciones estructurales facilitadoras de desarrollo, experiencia industrial, disponibilidad de materias primas y capacidad técnica. En ese contexto se destaca la presencia de refinerías de petróleo tradicionales y biorrefinerías, mayormente distribuidas en la zona central y norte del país (Figura 1 a y b).

- Refinerías de Petróleo Tradicionales. Grandes refinerías como YPF, Raízen/Shell y Axion/Pan American Energy tienen la infraestructura necesaria, específicamente unidades de hidrot ratamiento, que podrían ser adaptadas para co-procesar aceites vegetales y grasas. En la actualidad, varias de estas empresas están explorando o anunciando inversiones para la producción de este tipo de combustible. Es probable que el primer paso sea el co-procesamiento (mezclando aceites vegetales con crudo en las unidades existentes), para luego, potencialmente, construir plantas dedicadas.
- Biorrefinerías. La mayoría de las plantas existentes producen FAME (biodiésel de primera generación) y bioetanol. La infraestructura de éstas no está preparada para la obtención de HVO, y

su reconversión requiere gran una inversión, ya que son procesos de producción diferentes y tecnológicamente incompatibles. Los principales actores del sector de biodiésel (como Bunge, Cargill, AGD, Renova) tienen experiencia en el manejo de aceites vegetales y podrían ser futuros inversores, tal vez, a través de asociaciones estratégicas.

### **Consumo de Diésel y Potencial de Sustitución con HVO en Argentina**

El consumo anual de gasoil y diésel oil en Argentina se mantiene en volúmenes significativos, destacando su importancia para diversos sectores económicos (Secretaría de Energía, 2024).

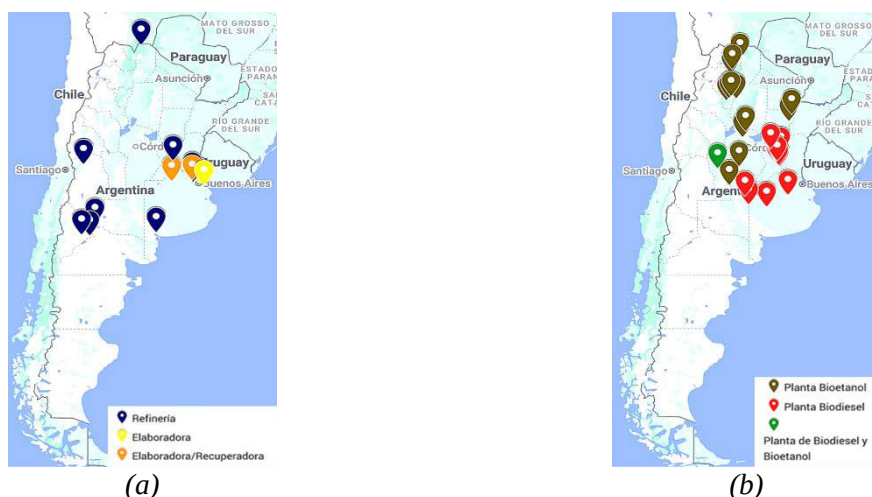


Figura 1: Ubicación de las refinerías: (a) Refinerías de petróleo tradicionales y (b) Biorrefinerías.

La distribución del consumo de diésel en 2023 fue la siguiente:

- El sector transporte terrestre representó 65.99% del consumo total (6.974 miles de TEP), abarcando flotas de carga, transporte de pasajeros y vehículos livianos diésel.
- El sector agropecuario fue el segundo consumidor, con 32% (3.382 miles de TEP), con uso intensivo en maquinaria agrícola y sistemas de bombeo, durante las campañas de siembra y cosecha.
- Los sectores industrial y comercial y público compartieron el remanente, cada uno con un 1% del consumo total (106 miles de TEP). Esto incluye desde generación eléctrica de respaldo y maquinaria pesada industrial hasta flotas de transporte público y equipos de obras civiles.

### **Balance Comercial de Diésel y Producción de Biodiésel (2023)**

El análisis del balance comercial de diésel en Argentina para 2023 revela una situación estratégica. La producción de gasoil y diesel oil ascienden a 10.454 miles de TEP (equivalentes a 12.224,6 ML de gasoil), las importaciones totales ascendieron a 1.386 miles de TEP (equivalentes a 1.605 ML).

Paralelamente, las exportaciones y ventas de bunker (combustible para buques y aeronaves de tráfico internacional) registraron un valor de 199 miles de TEP (equivalentes a 230,4 ML). En cuanto a la producción de biodiésel (*FAME*), Argentina produjo un total de 831.269 t (equivalentes a 944,6 ML) durante 2023. De este volumen, 580.502 toneladas (659,6 millones de ML) fueron destinadas a las "ventas al corte", que representan el volumen obligatorio de biodiésel que debe mezclarse con el gasoil fósil para el mercado interno, según lo dispuesto por la Ley 27.640. Adicionalmente, se registraron 8.302 t (9,4 ML) en "otras ventas al mercado interno" (para usos específicos o consumo propio), y 284.600 t (323,4 ML) se destinaron a exportaciones de biodiésel.

Los datos de 2023 ponen de manifiesto una disyuntiva y una oportunidad estratégica. Por un lado, el país exhibe una significativa dependencia de las importaciones de DC, superando los  $\approx 1.600$  ML/año. Por otro lado, la producción total de *FAME* en el mismo período apenas superó los 944 ML, y de este volumen, más de 323 ML fueron exportados (Secretaría de Energía, 2025). Esta situación revela que:

1. Las exportaciones de *FAME*, aunque relevantes, no compensan el volumen de DC que Argentina debe importar. A pesar de la capacidad instalada y la abundancia de MP (aceite de soja), una parte considerable de la producción de biodiésel se destina a mercados externos, mientras que la demanda interna de DC aún requiere de volúmenes sustanciales de importación.
2. Existe una oportunidad estratégica para la sustitución de importaciones de diésel, ya que el volumen de diésel importado (aproximadamente 1.600 ML) es considerablemente mayor que el total de biodiésel producido y consumido internamente (ventas al corte + otras ventas  $\approx$  669 ML), indicando un margen para que biocombustibles avanzados jueguen un rol crucial en la seguridad energética.

### ***Emisiones de CO<sub>2</sub> en el Ciclo de Vida (ACV)***

Existe un total circulante de 15.552.418 vehículos de los cuales 3.934.762 (25,3%) corresponden a la flota diésel. Según el último informe de AFAC, del total (nafteros, diésel, GNC, etc.) 3,10% corresponden a pesados, 14,70% a comerciales livianos y el 82,20% a automóviles. No existe información segmentada de vehículos diésel por categoría por lo que, para el cálculo, se estimó que 100% de los vehículos pesados (482.125), 75% de los comerciales livianos (1.714.655) y 13,6% de los automóviles (1.737.983) usan este tipo de combustible.

En la Figura 2 (a) se observa la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> por categoría según el combustible utilizado en un solo año, reemplazando el corte actual por la mezcla HVO7,5, los pesados reducen las emisiones un 6,35% (de 24,4 a 22,8 Mt de CO<sub>2</sub>), los comerciales livianos 6,32% de (de 15,18 a 14,22 Mt de CO<sub>2</sub>) y los automóviles un 6,28% (de 7,33 a 6,87 Mt de CO<sub>2</sub>). Reemplazando el corte actual por la mezcla HVO100 la reducción es abrupta, los pesados reducen las emisiones un 75,90% (de 24,4 a 5,88 Mt de CO<sub>2</sub>), los comerciales livianos 75,89 % de (de 15,18 a 3,66 Mt de CO<sub>2</sub>) y los automóviles un 75,85% (de 7,33 a 1,77 Mt de CO<sub>2</sub>).

En la Figura 2 (b) se observan las emisiones de todo el parque automotor diésel con los diferentes combustibles analizados a diferentes horizontes temporales, estimando además un crecimiento de la flota diésel al 1% anual (AFAC, 2025). El reemplazo del corte actual por HVO genera la siguiente reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> medidas en Mt para 1, 5 y 10 años, respectivamente: HVO7,5 de: 46,91 a 43,94 – 246,5 a 230,91 – 518,15 a 485,38 y HVO100 de: 46,91 a 11,31 – 246,5 a 59,43 – 518,15 a 124,93. Claramente el HVO100 se posiciona como el combustible con mayor potencial de mitigación de la huella de carbono de la flota diésel.



Figura 2: Comparación de emisiones de CO<sub>2</sub> en Mt por tipo de vehículo. Fuente: producción propia.

### ***Viabilidad Económica***

Para la proyección del costo de la planta piloto de HVO se usó como primera aproximación un modelo simple de costos nivelados (tipo LCOE aplicado a combustibles), transparente y reproducible en Excel, con limitaciones devenidas de no incluir inflación en USD, subsidios, impuestos específicos, ni posibles economías de escala (Concawe, 2022). Las entradas de modelo se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3: Valores de entrada del modelo de costos nivelados

| Item                                                                 | Valor      |
|----------------------------------------------------------------------|------------|
| CAPEX total (USD)                                                    | 50.000.000 |
| Tasa de capital (%)                                                  | 10         |
| Vida útil (años)                                                     | 25         |
| Producción anual (L)                                                 | 10.000.000 |
| Precio MP (USD/L)                                                    | 0,800      |
| Consumo (L MP / L HVO)                                               | 1          |
| H <sub>2</sub> (kg H <sub>2</sub> / L HVO)                           | 0,015      |
| Precio H <sub>2</sub> (USD/kg)                                       | 3          |
| OPEX anual (USD/año)                                                 | 2.000.000  |
| Créditos subproductos (USD/año)                                      | 0          |
| Reducción anual compuesta (%) (aplicada a MP, H <sub>2</sub> y OPEX) | 0,030      |

Los valores quinquenales obtenidos entre 2025 y 2050 en USD/L para el HVO resultan: 1,69 – 1,56 – 1,43 – 1,30 – 1,17 – 1,04.

Paralelamente a los efectos de comparar la proyección de costos entre combustibles, se toma un precio base de DC de 1,09 USD/L para 2025 (Sec, 2025). Para 2030 se parte de 1,12 USD/L + impuesto al carbono creciente en 2,5 USD/t año hasta llegar a 100 USD/t (0,27 USD/L) en 2040 y 125 USD/t (0,34 USD/L) en 2050, lo que conduce a valores quinquenales entre 2025 y 2050 en USD/L para el DC de: 1,09 – 1,12 – 1,16 – 1,19 – 1,22 – 1,26. La Figura 3 muestra la comparación en la proyección de costos para HVO y DC.

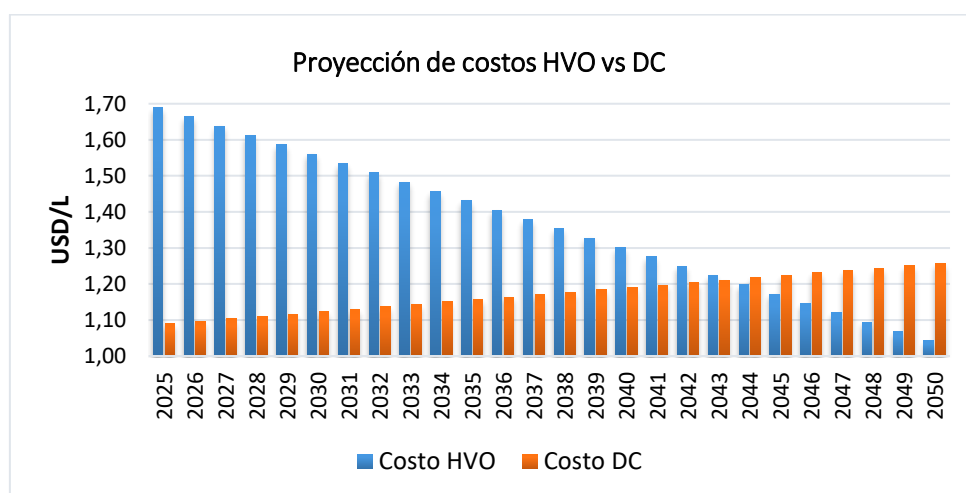


Figura 3: Escenario de proyección de costos para HVO vs DC. Fuente: producción propia

Se puede observar en la Figura 3, que bajo los supuestos mencionados los precios de los combustibles se cruzan en el año 2043 (punto de equilibrio o breakeven). Este es un escenario conservador que resalta que el HVO necesita apoyo de políticas (incentivos fiscales, créditos de carbono, subsidios de producción) para acortar esa brecha temporal. Es posible señalar las siguientes características del modelo de proyección de costos considerado:

1. Sensibilidad: si el impuesto al carbono crece más rápido; ej. 150 USD/t al 2040, como sugieren escenarios net-zero de la IEA (IEA, 2021), el punto de equilibrio se adelanta 5–10 años.
2. MP del HVO: la suba de precios de aceites o H<sub>2</sub> encarecen el HVO y el cruce se corre más adelante.
3. Coprocesamiento en refinerías: podría bajar el CAPEX/HVO y adelantar el punto de equilibrio.
4. Riesgo cambiario/inflación USD: se asumen precios constantes en USD (sin devaluaciones fuertes), que de ocurrir podría mover mucho el perfil de las curvas.

## Desafíos y Oportunidades para Argentina

El diésel renovable emerge como una solución de alto valor estratégico, puede sustituir directamente las importaciones de diésel en cualquier proporción, sin requerir adaptaciones en motores o infraestructura. La experiencia de otros países, como Suecia, demuestra que, si bien las políticas gubernamentales pueden impulsar la adopción de este biocombustible, la sostenibilidad a largo plazo depende de la disponibilidad de materias primas verdaderamente sostenibles y de evitar impactos negativos por el cambio de uso del suelo (Soam y Hillman, 2019).

Argentina, cuenta con una vasta capacidad para producir grandes volúmenes de aceites vegetales y grasas animales, sumada a políticas estratégicas en cuanto a la recuperación de los UCO y valorización de cultivos no convencionales. La integración de la producción de HVO en las refinerías de petróleo existentes podría reducir los costos de inversión y acelerar el despliegue. El desarrollo de la cadena de valor del HVO en Argentina no solo impulsaría sectores como el agroindustrial y la recolección de residuos, generando empleo y estimulando la economía local (Pérez-Rangel et al., 2025), sino que también reduciría drásticamente la dependencia energética externa en lo que respecta al diésel, mejorando la balanza comercial y la resiliencia económica del país.

## CONCLUSIONES

El HVO representa una prometedora alternativa renovable y directa al DC, con la capacidad de reducir significativamente las emisiones netas de CO<sub>2</sub> y otros contaminantes. Su adopción en la flota diésel argentina podría generar beneficios ambientales sustanciales para la descarbonización del sector transporte, particularmente en vehículos pesados.

Sin embargo, la viabilidad económica de esta transición en Argentina está intrínsecamente ligada al costo de producción del HVO y, por ende, a la disponibilidad y sostenibilidad de las materias primas. Las políticas de apoyo gubernamental y la inversión en I+D para optimizar los procesos de producción y diversificar las fuentes de MP sostenible son esenciales para superar los desafíos económicos y de suministro. Su integración en la matriz energética argentina, junto con una gestión cuidadosa de los impactos del ciclo de vida, contribuirá a un futuro más sostenible para el transporte y el medio ambiente.

## FUENTES DE FINANCIAMIENTO

Secretaría de Ciencia y Técnica de la Universidad Nacional de Córdoba – SECyT\_UNC. Proyecto consolidar 2023 N° 33620230100934CB. “Simulación de sistemas híbridos de ERNC y cálculo del costo nivelado de exportación de moléculas PtX, desde países exportadores a países importadores”.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la SECyT\_UNC por el financiamiento y a Calden Consultoría SRL por el aporte de datos y las discusiones ofrecidas sobre este trabajo.

## NOMENCLATURA

|                                                      |                                                                          |
|------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| ACV: Análisis del Ciclo de Vida                      | LUC: Cambio de Uso del Suelo (Land Use Change)                           |
| CI: Encendido por Compresión                         | NOx: Óxidos de Nitrógeno                                                 |
| CO <sub>2</sub> : Dióxido de Carbono                 | PCI: Poder Calorífico Inferior                                           |
| DC: Diésel Convencional                              | MP: Materia prima                                                        |
| DCO: Descarbonilación                                | PM: Materia Particulada                                                  |
| DCO <sub>2</sub> : Descarboxilación                  | POME: Efluente de la Planta de Aceite de Palma (Palm Oil Mill Effluent)  |
| DPF: Filtro de Partículas Diésel                     | SCR: Reducción Catalítica Selectiva                                      |
| FAME: Éster Metílico de Ácido Graso                  | TEP: Tonelada Equivalente de Petróleo                                    |
| GEI: Gases de Efecto Invernadero                     | UCO: Aceite de Cocina Usado (Used Cooking Oil)                           |
| UHC: Hidrocarburos No Quemados                       | ULSD: Diésel de ultra bajo contenido de azufre (Ultra-Low Sulfur Diesel) |
| HDO: Hidrodesoxigenación                             | WTW: De la Fuente a la Rueda (Well-to-Wheel)                             |
| HVO: Aceite Vegetal Hidrotratado                     |                                                                          |
| LCA: Análisis de Ciclo de Vida (Life Cycle Analysis) |                                                                          |
| LNT: Lean NOx Trap                                   |                                                                          |

## REFERENCIAS

- Adec (2025). Recuperado de <http://www.acopiadorescba.com/content/noticias-del-sector/otras/ypf-invertira-us-400-millones-en-santa-fe-para-producir-biocombustibles-de-aviacion> 29 sept. de 2025.
- Agrositio (2025). Producción de aceites vegetales en Argentina y Córdoba. En Agrositio. Recuperado de <https://www.agrositio.com.ar/noticia/239164-produccion-de-aceites-vegetales-en-argentina-y-cordoba.html> el 07 de agosto de 2025.
- Ajeeb A., Melo Gomes D., Costa Neto R., Baptista P. (2025). Life cycle analysis of hydrotreated vegetable oils production based on green hydrogen and used cooking oils. *Fuel*, 390, 134749. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.134749>.
- Argonne National Laboratory (2025). AFLEET Tool – Alternative Fuel Life-Cycle Environmental and Economic Transportation. En GREET Model - Argonne National Laboratory. Recuperado de <https://greet.es.anl.gov/afleet> el 7 de agosto de 2025.
- Asociación de Fábricas Argentinas de Componentes (AFAC). (2025). Flota Vehicular Circulante en Argentina 2024. En <https://www.afac.org.ar/>. Recuperado de <https://cdn.motor1.com/pdf-files/afac-flota-circulante-2024-copia3.pdf> el 8 de agosto de 2025.
- Ashraful A. M., Masjuki H. H., Kalam M. A., Fattah I. R., Imtenan S., Shahir S. A. y Mobarak, H. M. (2014). Production and comparison of fuel properties, engine performance, and emission characteristics of biodiesel from various non-edible vegetable oils: A review. *Energy conversion and management*, 80, 202-228. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S019689041400082X> el 15 de junio de 2025.
- Azeredo F., Hüther C., Werlang J. y Panizio R. (2025). HVO: A review on production, properties, environmental impact, and future perspectives. En *Insights into Energy Trends*, pp. 99–109. Springer Nature Switzerland, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-83811-8\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-031-83811-8_10).
- Concawe (2025). Future diesel-like renewable fuels – a literature review. Anselmi P. et al. Recuperado de: [https://www.concawe.eu/wp-content/uploads/Rpt-22-18.pdf?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.concawe.eu/wp-content/uploads/Rpt-22-18.pdf?utm_source=chatgpt.com) -1/10/25.
- Dimitriadis A., Natsios I., Dimaratos A., Katsaounis D., Samaras Z., Bezergianni S. y Lehto K. (2018). Evaluation of a hydrotreated vegetable oil (HVO) and effects on emissions of a passenger car diesel engine. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 4, 7. <https://doi.org/10.3389/fmech.2018.00007>.
- Dobrzyńska E., Szewczyńska M., Pośniak M., Szczotka A., Puchałka B., y Woodburn J. (2020). Exhaust emissions from diesel engines fueled by different blends with the addition of nanomodifiers and hydrotreated vegetable oil HVO. *Environmental Pollution*, 259, 113772. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113772>
- Epifanio D. y Ernst C. (2020). La cadena de suministro de biodiésel en Argentina: ¿una oportunidad para el avance social? En Organización Internacional del Trabajo. Recuperado de [https://www.ilo.org/sites/default/files/wcmsp5/groups/public/@americas/@ro-lima/@ilo-buenos\\_aires/documents/publication/wcms\\_734241.pdf](https://www.ilo.org/sites/default/files/wcmsp5/groups/public/@americas/@ro-lima/@ilo-buenos_aires/documents/publication/wcms_734241.pdf) el 07 de agosto de 2025.
- FAO – Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2009). Análisis del balance de energía derivada de biomasa en Argentina. WISDOM Argentina. Departamento Forestal, Servicios y Productos Forestales – Dendroenergía. Roma, Italia.
- Gomes D. M., Neto R. C., Baptista P., Ramos C. P., Correia C. B. y Rocha, R. (2025). A review of advanced techniques in hydrotreated vegetable oils production and life cycle analysis. *Biomass and Bioenergy*, 194, 107689. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.107689>.
- Hunicz J., Yang L., Rybak A., Ji S., Gęca M. S. y Mikulski M. (2025). Comparison of diesel and hydrotreated vegetable oil as the high-reactivity fuel in reactivity-controlled compression ignition. *Energy Conversion and Management*, 323, 119264. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.119264>
- IEA (2021). Net Zero by 2050 A Roadmap for the Global Energy Sector. Recuperado de: [https://iea.blob.core.windows.net/assets/7ebafc81-74ed-412b-9c60-5cc32c8396e4/NetZeroBy2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector-SummaryforPolicyMakers\\_CORR.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/7ebafc81-74ed-412b-9c60-5cc32c8396e4/NetZeroBy2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector-SummaryforPolicyMakers_CORR.pdf) , 02/10/25
- Martínez-Hernández E., Ramírez-Verduzco L. F., Amezcua-Allieri M. A. y Aburto J. (2019). Process simulation and techno-economic analysis of bio-jet fuel and green diesel production—Minimum selling prices. *Chemical Engineering Research and Design*, 146, 60-70. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2019.03.042>.



- Pérez-Rangel N. V., Ancheyta J., de Souza T. A. Z., da Costa R. B. R., Sousa D. J., Cardinali V. B. A. y Hernández J. J. (2025). HVO Adoption in Brazil: Challenges and Environmental Implications. *Sustainability*, 17(13), 6128. <https://doi.org/10.3390/su17136128>.
- RAAVU (2025). Sitio oficial de RAAVU. En RAAVU - Red Argentina de Análisis de Ciclo de Vida y Evaluación de la Sostenibilidad. Recuperado de <https://raavu.com.ar/> el 7 de agosto de 2025.
- Régimen de Corte Obligatorio Transitorio Adicional de Biodiésel. <https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/decreto-330-2022-366627/texto> - 6/08/25.
- SAGyP (2025). Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca. Recuperado el 7 de agosto de 2025. [https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/bovinos/informacion\\_interes/informes/index.php](https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/bovinos/informacion_interes/informes/index.php)
- Secretaría de Energía (2024). Balance Energético Nacional 2023. En la Secretaría de Energía de la Nación. Recuperado de <https://www.argentina.gob.ar/energia/balance-energetico-nacional> - 7/08/25.
- Secretaría de Energía (2025). Cifras de producción, ventas al mercado interno y exportaciones de biodiésel. En la Secretaría de Energía de la Nación. Recuperado de <https://www.argentina.gob.ar/energia> el 7 de agosto de 2025.
- Sec (2025). Secretaría de Energía. Precios de Biodiesel. Resuperado de [https://glp.se.gob.ar/biocombustible/reporte\\_precios.php](https://glp.se.gob.ar/biocombustible/reporte_precios.php) - 01/10/25.
- Soam S. y Hillman K. (2019). Factors influencing the environmental sustainability and growth of hydrotreated vegetable oil (HVO) in Sweden. *Bioresource Technology Reports*, 7, 100244. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100244>
- Suarez-Bertoa R., Kousoulidou M., Clairotte M., Giechaskiel B., Nuottimäki J., Sarjoavaara T. y Lonza L. (2019). Impact of HVO blends on modern diesel passenger cars emissions during real world operation. *Fuel*, 235, 1427-1435. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.08.031>.
- Szeto W. y Leung D. Y. C. (2022). Is hydrotreated vegetable oil a superior substitute for fossil diesel? A comprehensive review on physicochemical properties, engine performance and emissions. *Fuel* 327 (125065), 125065. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125065>
- Vásquez M. C., Silva E. E., Castillo E. F. (2017). Hydrotreatment of vegetable oils: a review of the technologies and its developments for jet biofuel production, *Biomass Bioenergy* 105, 197–206. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.07.008>.

## HVO AS A CLEAN FUEL IN ARGENTINA: IMPACT ANALYSIS AND KEY OBSTACLES

**ABSTRACT:** Hydrotreated Vegetable Oil is a renewable alternative to fossil diesel, key to the decarbonisation of transport. This paper evaluates the environmental potential of the adoption of this renewable diesel in Argentina, focusing on the reduction of carbon emissions in vehicles with compression ignition engines. The physicochemical properties of the fuel, its impact on engine emissions, economic viability and the challenges of a sustainable supply chain are analyzed. The carbon footprint calculations are based on Well-to-Wheel Life Cycle Analysis methodologies, resulting in a net reduction of 75% in carbon emissions for pure fuel, like that observed in international studies. On an economic level, the cost parity analysis shows that, when considering the carbon tax, the price of renewable diesel for a pilot plant would be equal to the price of fossil diesel (break-even) in the year 2043. Large-scale implementation will critically depend on the availability of sustainable feedstocks, such as soybean oil, animal fats and used cooking oil, and on policies that overcome the initial cost gap.

**Keywords:** HVO, renewable diesel, CO<sub>2</sub> emissions, defossilisation, decarbonization.

## ACCESO A LA ENERGÍA Y EDUCACIÓN RURAL: IMAGINARIOS SOCIOTÉCNICOS, USOS Y APROPIACIONES DE LA ENERGÍA EN CONTEXTOS DE DIVERSIDAD CULTURAL

**Genaro Vilte<sup>1</sup>, Facundo González<sup>2</sup>, Facundo Pérez Machado<sup>3</sup>, Viviana Tarifa<sup>4</sup>, Nuria Rodríguez<sup>5</sup>  
y Rubén Darío González<sup>6</sup>**

<sup>1</sup>Instituto de Investigación en Ciencias Sociales y Humanidades (ICSOH, UNSa - CONICET)

Av. Bolivia 5150, Salta Capital, CP 4400, Argentina. Correo: [genarojvilte@gmail.com](mailto:genarojvilte@gmail.com)

<sup>2</sup>Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO, UNSa – CONICET)

Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta. Correo: [facundoinenco@gmail.com](mailto:facundoinenco@gmail.com)

<sup>3</sup>Facultad de Humanidades - Universidad Nacional de Salta. Correo: [perezmfacundoo@gmail.com](mailto:perezmfacundoo@gmail.com)

<sup>4</sup>Instituto de Investigación en Ciencias Sociales y Humanidades (ICSOH, UNSa - CONICET)

Av. Bolivia 5150, Salta Capital, CP 4400, Argentina. Correo: [vivi.100490@gmail.com](mailto:vivi.100490@gmail.com)

<sup>5</sup>Instituto de Investigación en Ciencias Sociales y Humanidades (ICSOH, UNSa - CONICET)

Av. Bolivia 5150, Salta Capital, CP 4400, Argentina. Correo: [nuria.macarena.rodriguez@gmail.com](mailto:nuria.macarena.rodriguez@gmail.com)

<sup>6</sup>Facultad de Humanidades - Universidad Nacional de Salta. Correo:

[rubendariogonzalezreyes@gmail.com](mailto:rubendariogonzalezreyes@gmail.com)

**RESUMEN:** Este artículo analiza el acceso a la energía eléctrica en la Escuela Rural de Santa Bárbara, situada en la Quebrada de las Conchas (Salta, Argentina), y su impacto en las prácticas educativas en un contexto rural e intercultural. A partir de encuestas a estudiantes, observaciones de campo y entrevistas informales, se indagan las condiciones materiales, los usos y apropiaciones de la energía, y los imaginarios sociotécnicos que configuran las expectativas de futuro. El estudio adopta un enfoque cualitativo y crítico, interpretando la energía no sólo como un recurso técnico, sino como un componente constitutivo del hábitat y un soporte para las prácticas de cuidado. Los resultados muestran que, aunque la electrificación mediante paneles solares ha mejorado las condiciones de vida y enseñanza, persisten limitaciones vinculadas a la intermitencia del suministro, la capacidad técnica local y la falta de integración pedagógica de los recursos energéticos y tecnológicos. Se concluye que la electrificación rural debe articularse con políticas educativas y culturales, garantizando sostenibilidad técnica, pertinencia cultural y participación comunitaria. El caso aporta insumos para el diseño de políticas y estrategias replicables en otros territorios, reconociendo que el acceso a la energía en la ruralidad intercultural es tanto una cuestión técnica como ética y política.

**Palabras clave:** energía solar, acceso a la energía, educación rural, diversidad cultural, justicia energética.

### INTRODUCCIÓN

En América Latina, el acceso a la energía eléctrica en ámbitos rurales no puede comprenderse únicamente en términos de cobertura técnica, sino como parte de un entramado complejo de relaciones territoriales, culturales y pedagógicas. Particularmente en Argentina, los programas de electrificación rural, como el Programa de Energías Renovables en Mercados Rurales (PERMER), han promovido el uso de fuentes renovables en parajes dispersos, con resultados dispares en términos de sostenibilidad, apropiación comunitaria y continuidad educativa (Govetto *et al.*, 2024; González *et al.*, 2023).

En línea con los debates contemporáneos en torno a la justicia energética, la transición hacia sistemas renovables y el rol de la educación rural en contextos de diversidad cultural, se incorporan referencias que amplían el anclaje teórico del presente trabajo. Estudios como los de García y Orozco (2023) abordan los desafíos de la justicia energética en territorios rurales latinoamericanos, mientras que Herrera y Tapia (2022) analizan las implicancias socioculturales de la energía solar fotovoltaica en



comunidades de la Puna argentina. Desde la pedagogía crítica, Meza y Lagos (2021) vinculan la transición energética con propuestas educativas contextualizadas para el ámbito rural. Finalmente, Sovacool y Griffiths (2020) ofrecen un marco de interpretación sobre los imaginarios sociotécnicos en proyectos de electrificación solar en América Latina, aportando claves para situar el caso de Santa Bárbara en un escenario comparativo más amplio.



*Figura 1: Paraje Santa Bárbara, Salta.  
Fuente: banco propio de imágenes.*



*Figura 2: Escuela Rural de Santa Bárbara.  
Fuente: banco propio de imágenes.*

En el actual contexto argentino, garantizar la escolaridad obligatoria a lo largo y ancho del país constituye uno de los desafíos más importantes para el Sistema Educativo. Este compromiso asumido por el Estado a través de la Ley de Educación Nacional 26.206 (en adelante LEN) sancionada en diciembre del 2006, implicó un cambio significativo en el sistema educativo argentino, que antes se sostenía de políticas neoliberales materializadas en la década de los 90 con la Ley Federal de Educación. En este marco el Plan Nacional de Educación Obligatoria (Resol. CFCyE N° 79/09) explica que el sistema educativo argentino presenta un conjunto de problemas y desafíos que son consecuencia, entre otros, de tres tendencias de nuestra historia política y económica reciente: Creciente desigualdad social, fragmentación del sistema educativo e importante incremento de la matrícula en el nivel inicial y secundario. De lo antes descrito se comprende que la educación en general y particularmente la educación rural, requieren un análisis situado, que permita identificar algunos elementos que la definen, para garantizar el pleno derecho a la educación de infancias de ámbitos rurales.

La Educación Rural constituye una de las ocho modalidades dentro de la LEN y está orientada a garantizar el cumplimiento de la escolaridad obligatoria, teniendo en cuenta formas adecuadas a las necesidades y particularidades de la población que habita en zonas rurales. Dentro de los objetivos de esta modalidad se establece el acceso a los saberes postulados para el conjunto del sistema, a través de propuestas pedagógicas flexibles que fortalezcan el vínculo con las identidades culturales y las actividades productivas locales; así como promover diseños institucionales que permitan a las y los estudiantes mantener los vínculos con su núcleo familiar y su medio local de pertenencia (durante el proceso educativo), garantizando una coordinación y articulación del sistema dentro de cada provincia y entre las diferentes jurisdicciones y; permitiendo modelos de organización escolar adecuados a cada contexto, como por ejemplo salas plurigrados y grupos multiedad en instituciones que abarquen varios niveles en una misma unidad educativa. Tal es el caso de la Escuela Rural de Santa Bárbara (ver figuras N° 1 y N° 2), a la cual asisten niños del nivel inicial y del nivel primario (de cinco a once años de edad) en salas de plurigrados (ver figuras N° 3 y N° 4) conformando un grupo multiedad a cargo de una docente, que es el personal único de la institución.



*Figura 3: alumnos de la escuela rural.  
Fuente: banco propio de imágenes.*



*Figura 4: alumnos de la escuela rural.  
Fuente: banco propio de imágenes.*

Estas características de la escuela requieren analizar “lo rural” como parte de los procesos de planificación, administración y evaluación de los sistemas educativos desde una mirada micro-social, como estrategia para recuperar la identidad de las comunidades y grupos locales e impulsar un desarrollo sustentable del territorio (Romero, N. 2020). De esta manera se pone en tensión la noción tradicional de “lo rural” para comprender las particularidades del paraje Quebrada de las Conchas.

La escuela rural, en este marco, constituye un nodo estratégico para pensar los vínculos entre energía, derechos y territorio. No solo por su función pedagógica, sino por su centralidad simbólica y operativa en la vida cotidiana de comunidades que enfrentan condiciones estructurales de desigualdad. En zonas como la Quebrada de las Conchas (Salta), donde convergen poblaciones indígenas, familias criollas, productores rurales y saberes ancestrales, el acceso a la energía impacta directamente en las condiciones de enseñanza, en las trayectorias escolares y en los imaginarios de desarrollo comunitario.

Sin embargo, el sistema educativo rural en Argentina continúa respondiendo a una lógica unificadora, que reproduce estructuras pedagógicas y administrativas diseñadas para contextos urbanos o semirurales. Las escuelas de plurigrado con una sola docente a cargo de múltiples niveles (ver figura N° 5), sin equipos interdisciplinarios ni acompañamiento técnico, son un ejemplo claro de esta inequidad estructural. Esta situación se agrava cuando se suman factores como el aislamiento geográfico, la falta de conectividad, la intermitencia del suministro eléctrico y la ausencia de políticas educativas interculturales sostenidas.



*Figura 5: directora y docente a cargo de la Escuela Rural de Santa Bárbara.  
Fuente: banco propio de imágenes.*

Este artículo propone analizar el rol del acceso a la energía eléctrica en la Escuela Rural de Santa Bárbara, situada en el paraje homónimo de la Quebrada de las Conchas. A través de una encuesta aplicada a estudiantes, observaciones de campo y entrevistas con actores escolares, se busca indagar



cómo las condiciones energéticas moldean el quehacer educativo y los vínculos entre escuela, familia y comunidad. La apuesta teórica radica en comprender la energía no solo como recurso físico, sino como componente constitutivo del hábitat, y como mediadora de imaginarios sociotécnicos (Jasanoff y Kim, 2009) que organizan expectativas, sentidos de futuro y formas de vida.

## METODOLOGÍA

Este trabajo se inscribe en una perspectiva crítica de los estudios sociales de la energía y del hábitat, que entiende el acceso a la electricidad no solo como una cuestión técnica, sino como parte de una configuración sociotécnica situada. A partir de los aportes de Jasanoff y Kim (2009), se adopta la noción de *imaginarios sociotécnicos* para interpretar cómo las comunidades construyen sentidos, valoraciones y expectativas en torno a las tecnologías energéticas, en función de sus trayectorias históricas, sus condiciones materiales y sus horizontes de futuro.

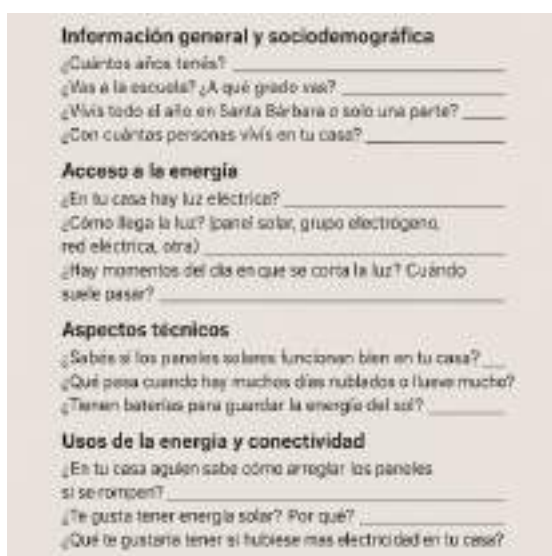
Particularmente, se entiende que la energía -como parte del hábitat- no se limita a proveer confort o funcionalidad, sino que actúa como mediadora entre formas de vida, saberes y proyectos educativos. Este enfoque permite problematizar la instalación de tecnologías como los paneles solares no solo en términos de acceso o cobertura, sino como una intervención que reconfigura las relaciones entre la escuela, el territorio y la comunidad.

El análisis se sostiene, además, en aportes de la pedagogía crítica latinoamericana y de los estudios en educación intercultural, que advierten sobre las limitaciones de los sistemas escolares rurales para acoger la diversidad epistémica y cultural de los pueblos indígenas y criollos. En este sentido, se asume la interculturalidad no como un dispositivo de inclusión, sino como un rasgo constitutivo de la población del paraje Santa Bárbara, que organiza las formas de crianza, los vínculos comunitarios y los saberes transmitidos. Ignorar esta dimensión, o reducirla a actividades complementarias dentro del currículo, implica invisibilizar las formas de habitar y aprender que estructuran la vida cotidiana en estos territorios.

Desde este enfoque, la escuela es vista como una institución atravesada por tensiones: entre el mandato curricular estatal y las prácticas comunitarias, entre la universalización tecnológica y la territorialización de los saberes, entre el modelo de desarrollo dominante y las estrategias locales de reproducción de la vida. La energía eléctrica se vuelve así un objeto privilegiado para analizar cómo estas tensiones se despliegan material y simbólicamente, afectando tanto la organización escolar como los sentidos de pertenencia, futuro y justicia territorial.

El abordaje metodológico adoptado es de carácter cualitativo, con un diseño exploratorio-descriptivo. La estrategia combinó tres técnicas principales:

- **Encuesta a niños:** cuestionario con preguntas abiertas y cerradas sobre acceso, uso y valoración de la energía en hogares y en la escuela. Aplicada durante una visita de campo en junio de 2025 a los cinco estudiantes (5 a 11 años) que asisten a la Escuela Rural de Santa Bárbara. (Ver figuras N° 6 y N° 7).



Información general y sociodemográfica

¿Cuántos años tenías? \_\_\_\_\_

¿Vas a la escuela? ¿A qué grado vas? \_\_\_\_\_

¿Vivís todo el año en Santa Bárbara o solo una parte? \_\_\_\_\_

¿Con cuántas personas vivís en tu casa? \_\_\_\_\_

**Acceso a la energía**

¿En tu casa hay luz eléctrica? \_\_\_\_\_

¿Cómo llega la luz? (panel solar, grupo electrógeno, red eléctrica, otra) \_\_\_\_\_

¿Hay momentos del día en que se corta la luz? Cuando suele pasar? \_\_\_\_\_

**Aspectos técnicos**

¿Sabés si los paneles solares funcionan bien en tu casa? \_\_\_\_\_

¿Qué pasa cuando hay muchos días nublados o llueve mucho? \_\_\_\_\_

¿Tienen baterías para guardar la energía del sol? \_\_\_\_\_

**Usos de la energía y conectividad**

¿En tu casa alguien sabe cómo arreglar los paneles si se rompen? \_\_\_\_\_

¿Te gusta tener energía solar? Por qué? \_\_\_\_\_

¿Qué te gustaría tener si hubiese más electricidad en tu casa? \_\_\_\_\_

Figura 6: boceto de encuesta a alumnos.  
Fuente: banco propio de imágenes.



Figura 7: desarrollo de encuesta.  
Fuente: banco propio de imágenes.

- **Observación participante:** visitas sistemáticas desde 2022 en el marco de proyectos de investigación en hábitat, energía y educación, registrando infraestructura energética, dinámicas pedagógicas y condiciones de habitabilidad.
- **Entrevistas informales:** conversaciones no estructuradas con docentes y personal auxiliar para complementar percepciones estudiantiles con perspectivas institucionales y territoriales.

Si bien el estudio se basa en una muestra reducida de cinco estudiantes, esta elección responde a la estructura poblacional del paraje y a la matrícula efectiva de la escuela en el momento de la investigación (ver figuras N° 8 y N° 9). Al tratarse de un establecimiento unidocente y multiedad, la totalidad de los niños presentes fueron incluidos, lo que otorga representatividad interna al universo escolar, aunque no pretende extrapolarse estadísticamente a otros contextos rurales. La naturaleza cualitativa y exploratoria del diseño priorizó la profundidad de las descripciones y la construcción situada de significados por sobre la amplitud numérica, buscando captar matices culturales, afectivos y pedagógicos vinculados al acceso y uso de la energía.

Asimismo, se reconoce que la investigación presenta limitaciones derivadas del acceso al campo, la temporalidad del trabajo de campo y la posible presencia de sesgos por la mediación adulta en las respuestas. El análisis se realizó mediante codificación temática abierta a partir de las transcripciones y notas de campo, utilizando criterios de saturación adaptados a la escala del estudio y al contexto rural e intercultural. Aunque se incorporaron algunos datos cuantitativos descriptivos para caracterizar el acceso energético, estos fueron interpretados desde un encuadre cualitativo, evitando atribuirles alcance estadístico. La explicitación de estas decisiones metodológicas permite contextualizar los resultados y orientar futuras investigaciones hacia diseños comparativos o ampliados que incorporen mayor diversidad de casos y herramientas analíticas.



*Figura 8: intercambio con alumnos.  
Fuente: banco propio de imágenes.*



*Figura 9: visita a la escuela en 2024.  
Fuente: banco propio de imágenes.*

## RESULTADOS

### Condiciones materiales de acceso

Los datos recolectados en junio de 2025, en continuidad con el trabajo de campo iniciado en 2022, muestran que la totalidad de los hogares de los estudiantes de la Escuela Rural de Santa Bárbara obtiene electricidad a partir de paneles solares domiciliarios, con variaciones significativas en la cantidad de módulos y en la capacidad de almacenamiento. Cuatro de los cinco niños encuestados reportaron cortes frecuentes en el suministro, mientras que solo uno indicó contar con una disponibilidad más estable (ver tabla N° 2). Estas interrupciones no constituyen un evento excepcional, sino que forman parte de la rutina diaria, obligando a planificar las actividades escolares y domésticas en función de los momentos de mayor disponibilidad energética.

La propia escuela enfrenta condiciones similares: carece de grupo electrógeno propio y su abastecimiento depende de la intermitencia solar, de la falta de mantenimiento y de la limitada capacidad de sus baterías (ver tabla N° 1). A ello se suma la imposibilidad de acceder a agua caliente, dado que los

calefones solares instalados en 2004 se encuentran en desuso desde hace años por roturas y ausencia de reparaciones, situación confirmada por la directora en visitas anteriores.

La infraestructura escolar es básica: cuenta con una computadora, una impresora, un pequeño reproductor de música y utensilios de cocina para preparar desayuno, almuerzo y merienda a los estudiantes. En la visita de 2025, realizada en la transición entre fines de otoño y principios de invierno, se constató la dificultad adicional que implica la ausencia de calefacción: los niños asistían menos horas a clase debido al frío, y dependían exclusivamente de su vestimenta para resguardarse, dado que la escuela no dispone de estufas ni de otro sistema de calefacción.



*Figura 10: calefones solares deteriorados.*

*Fuente: banco propio de imágenes.*

Esta situación evidencia un doble condicionante estructural. Por un lado, la dependencia exclusiva de la energía solar, sin sistemas de respaldo, expone a la comunidad escolar a interrupciones que afectan el normal desarrollo de las actividades educativas y domésticas. Por otro, la ausencia de mantenimiento sistemático -tanto en el equipamiento eléctrico como en el de provisión de agua caliente- transforma inversiones iniciales significativas en infraestructura subutilizada o directamente inutilizada. El caso de los calefones solares ilustra con claridad este problema: dispositivos pensados para mejorar la habitabilidad escolar permanecen fuera de servicio por casi dos décadas, revelando no solo limitaciones técnicas y económicas, sino también fallas en la planificación de políticas públicas de infraestructura escolar en contextos rurales (ver figura N°10).

En términos más amplios, estas condiciones ponen de relieve cómo las carencias energéticas se entrelazan con otras dimensiones del derecho a la educación: la falta de electricidad y calefacción en una escuela de altura no solo limita el uso de dispositivos tecnológicos o la preparación de alimentos, sino que también incide directamente en la asistencia y permanencia de los estudiantes, profundizando desigualdades ya presentes en territorios rurales y de difícil acceso.

*Tabla 1: matriz de encuesta realizada a los alumnos (parte 1)*

*Fuente: elaboración propia.*

| UA | ¿Cuántos años tenés?  | ¿Va a la escuela? | ¿Qué grado?     | ¿Viviste todo el año en Santa Bárbara o solo una parte del año? | ¿Con cuántas personas vivís en tu casa? | ¿En tu casa hay luz eléctrica? | ¿Cómo llega la luz?  | ¿Hay momentos del día en que se corta la luz? | ¿Cuándo suele pasar?                               | ¿Sabes si los paneles solares funcionan bien en tu casa? |
|----|-----------------------|-------------------|-----------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------|----------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| 1  | 9 años (Wilson).      | Si.               | 4to grado       | Si. Todo el año.                                                | 4 personas (5 en total).                | Si.                            | Paneles solares (2). | Si.                                           | De noche.                                          | No tanto.                                                |
| 2  | 5 años.               | Si.               | Sala de 5 años. | Si.                                                             | 4 personas (5 en total).                | Si.                            | Paneles solares.     | Si.                                           | Por la mañana.                                     | Bien. Más o menos.                                       |
| 3  | 11 años.              | Si.               | 2do grado.      | Si. Todo el año.                                                | 2 personas (3 en total).                | Si.                            | Paneles solares.     | No.                                           | ---                                                | NS- NC                                                   |
| 4  | 11 años.              | Si.               | 6to grado.      | Si.                                                             | 4 personas (5 en total).                | Si.                            | Paneles solares.     | Si.                                           | De tarde                                           | Funcionan más o menos.                                   |
| 5  | 11 años (Evangelina). | Si.               | 6to grado.      | Si.                                                             | 3 personas (4 en total).                | Si.                            | Paneles solares.     | Si.                                           | A la noche. Porque no se cargan bien las baterías. | Si. 1 de los 2 que tiene. El otro no funciona.           |



Tabla 2: matriz de encuesta realizada a los alumnos (parte 2)

Fuente: elaboración propia.

| ¿Qué pasa cuando hay días nublados o llueve mucho? | ¿Tienen baterías para guardar la energía del sol? | ¿Qué cosas usas vos que necesitan electricidad? | ¿Tenés celular o usas el de alguien? | ¿Tenés señal en tu casa?                                           | ¿Podes usar internet? | ¿Para qué lo usas?                                            | ¿En tu casa alguien sabe cómo arreglar los paneles si se rompen? | ¿Te gusta tener energía solar? | ¿Por qué?                                    | ¿Qué te gustaría tener si hubiese más electricidad en tu casa? |
|----------------------------------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| NS- NC                                             | Sí (1).                                           | Licuada, celulares (5).                         | Le presta su papá.                   | Sí (WiFi Starlink).                                                | Sí.                   | Videos (YouTube). Para buscar explicaciones.                  | Sí. Mi papá es electricista.                                     | Sí.                            | Porque sino estaría todo oscuro.             | Está bien como está.                                           |
| NS- NC                                             | Sí.                                               | No usa nada.                                    | Le presta su mamá.                   | Sí (WiFi Starlink).                                                | Sí.                   | Videos.                                                       | Sí. Su papá se encarga.                                          | Sí.                            | Porque sí.                                   | Una tablet.                                                    |
| No anda bien.                                      | Sí.                                               | Celular.                                        | Sí.                                  | Sí (WiFi Starlink).                                                | Sí.                   | Estudio inglés.                                               | No.                                                              | Sí.                            | Porque tengo luz.                            | Nada.                                                          |
| Se les corta la luz.                               | Sí.                                               | Celular.                                        | Sí.                                  | Sí (WiFi Starlink).                                                | Sí.                   | Veo videos, juego juegos aprendo inglés.                      | NS- NC                                                           | Sí.                            | Por temor a la oscuridad de la noche.        | Con lo que tiene está feliz.                                   |
| No se cargan bien las baterías.                    | Sí. 3 baterías.                                   | Celular. Internet. Linterna.                    | Sí. Tiene uno propio.                | Sí (WiFi Starlink). Lo tiene por emergencia. Lo tienen desde 2024. | Sí.                   | Videos (Instagram y TikTok). Cosas de la escuela. También les | No. Nadie.                                                       | Sí.                            | Porque sino no andan los focos y no hay luz. | Computador a y para escuchar música.                           |

Tabla 3: cortes de energía según alumnos.

Fuente: elaboración propia.

| ¿Hay momentos en el día en que se corta la luz? | ¿Cuándo suele pasar?                          | ¿Qué pasa cuando hay días nublados o llueve mucho? |
|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Sí.                                             | De noche.                                     | NS - NC                                            |
| Sí.                                             | Por la mañana.                                | NS - NC                                            |
| No.                                             | ---                                           | No andan bien.                                     |
| Sí.                                             | De tarde.                                     | Se nos corta la luz.                               |
| Sí.                                             | A la noche, porque no se cargan las baterías. | No se cargan bien las baterías.                    |

## Usos y apropiaciones

En todos los hogares relevados, el dispositivo central es el teléfono celular (ver figura N° 11), propio o prestado, utilizado principalmente para acceder a internet mediante servicio satelital Starlink. Sus usos combinan dimensiones de entretenimiento y aprendizaje: mirar videos en YouTube o TikTok, buscar explicaciones para tareas escolares, practicar inglés o jugar en línea (ver figura N° 12). La directora ha participado en capacitaciones vinculadas al uso de TICs, lo que amplía los horizontes culturales y lingüísticos de niños y adultos. Sin embargo, estas posibilidades se ven limitadas por las condiciones de conectividad de la escuela y por la ausencia de una mediación pedagógica sistemática que integre dichos recursos al proceso educativo formal. En el espacio escolar, los dispositivos más comunes son celulares, linternas, cargadores y, en algunos casos, conexión WiFi satelital. La energía habilita así espacios de exploración individual que, en ausencia de estrategias institucionales, dependen casi exclusivamente de iniciativas familiares o personales.

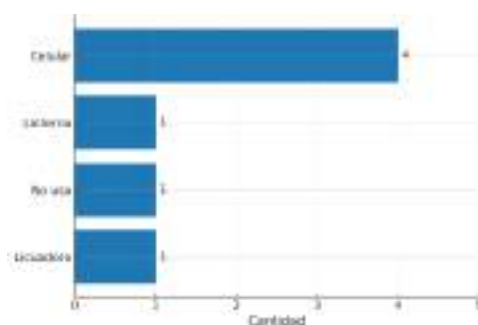


Figura 11: usos de la electricidad según alumnos.

Fuente: elaboración propia.

La comparación con la última visita de campo (2024) evidencia un cambio sustancial: entonces, el acceso a internet a través de Starlink era excepcional y la mayoría de las familias dependía de la conectividad provista por la escuela. En cambio, en la visita de 2025 se constató una rápida y

generalizada adopción de internet en los hogares: los cinco niños encuestados declararon tener acceso a la red, lo que habilita un abanico de posibilidades de conocimiento, ocio y vinculación con el mundo exterior. Este acceso también refuerza el vínculo con la escuela, al facilitar la asignación de tareas para el hogar o el seguimiento de videos relacionados con contenidos específicos.

Este hallazgo no es menor: la conectividad doméstica transforma no solo la experiencia educativa, sino también las redes de comunicación de la comunidad. La directora de la escuela mantiene ahora un contacto más fluido tanto con el Ministerio de Educación como con nuestro equipo de investigación, y lo mismo sucede entre pobladores y otros actores clave, como destacamentos policiales, prestadores de servicios o instituciones de salud para la gestión de turnos médicos (en este caso ante el hospital de Cafayate, al ser el más próximo). En suma, la conectividad se vuelve un nodo que articula lo educativo, lo institucional, lo productivo y lo cotidiano.

Sin embargo, esta ampliación de oportunidades también introduce nuevos desafíos: el acceso masivo a internet no garantiza por sí mismo un uso crítico o seguro de los contenidos; la ausencia de mediación pedagógica sistemática puede generar consumos culturales fragmentados o desarticulados del currículum escolar; y la dependencia de un servicio satelital pago implica riesgos de exclusión si las familias no pueden sostener los costos. La conectividad, en este sentido, se presenta como un factor que simultáneamente empodera y tensiona, capaz de reducir brechas de aislamiento, pero también de reproducir desigualdades si no se acompaña de políticas educativas y de acceso equitativo a largo plazo.

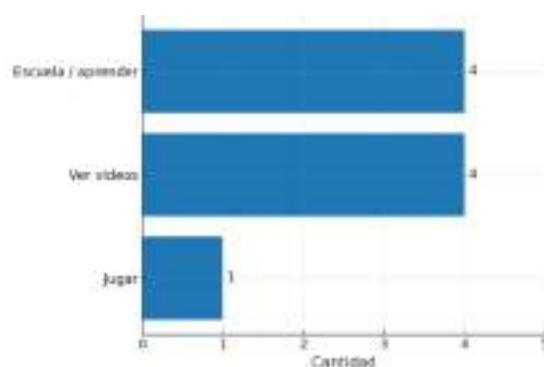


*Figura 12: usos del internet según alumnos.*

*Fuente: elaboración propia.*

### **Saberes técnicos locales**

La capacidad local de mantenimiento se presenta como un factor crítico para garantizar la sostenibilidad de los sistemas fotovoltaicos en contextos rurales. En el caso relevado, tres de los cinco hogares dependen exclusivamente del personal técnico de ESED -empresa concesionaria encargada del mantenimiento-, ya que, según mencionaron los niños, en sus casas no saben reparar los paneles solares (ver figura N° 13). Esta situación introduce una serie de vulnerabilidades que comprometen la continuidad y confiabilidad del servicio. Relevamientos previos y testimonios informales indican que la atención en estos casos no siempre es inmediata y, en ocasiones, está condicionada a que el hogar esté al día en el pago del servicio. Este punto genera tensiones adicionales: por un lado, la dimensión económica, donde la morosidad implica no solo riesgo de corte, sino también retrasos en la reparación; por otro, la logística misma de reclamar, ya que la ausencia de electricidad implica también la pérdida de conexión a internet (por ejemplo, a través de Starlink), dificultando la comunicación con la empresa. A ello se suman los propios tiempos de respuesta de ESED, que, según reportes anteriores y conversaciones off the record, no siempre se ajustan a las necesidades de inmediatez que plantea la vida cotidiana sin energía.

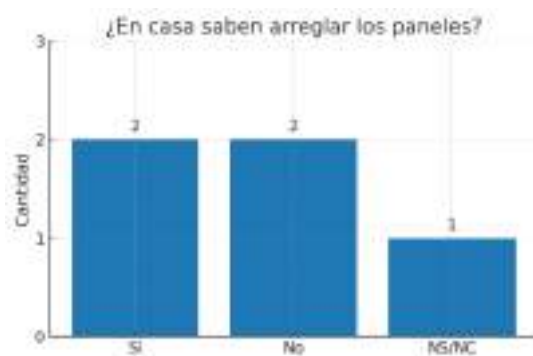


Figura 13: saberes técnicos según alumnos.  
Fuente: elaboración propia.

En síntesis, el mantenimiento de los sistemas no depende únicamente de la tecnología instalada, sino también de una red de capacidades técnicas locales, condiciones económicas, disponibilidad de infraestructura de comunicación y voluntad operativa de la empresa concesionaria. En este entramado, las brechas de saberes técnicos no solo reproducen desigualdades preexistentes, sino que pueden profundizar la vulnerabilidad energética de los hogares.

### Imaginarios y valoraciones

Las valoraciones sobre la energía solar recogidas en las encuestas y conversaciones informales son unánimemente positivas, asociándola directamente con bienestar y seguridad. Frases como “porque si no estaría todo oscuro” o “porque tengo luz” condensan la percepción de que la energía no es simplemente un insumo técnico, sino un recurso del cuidado: permite resguardar el cuerpo, sostener la seguridad emocional y ampliar las posibilidades de aprendizaje. Desde la perspectiva de los imaginarios sociotécnicos (Jasanoff y Kim, 2009), la energía aparece como condición habilitante para “una vida buena”, aunque con una presencia frágil, marcada por intermitencias y contingencias.

Frente a la posibilidad de contar con mayor disponibilidad energética, las aspiraciones se dividen (ver figura N° 14): algunos niños y familias expresan el deseo de ampliar el equipamiento (tablets, computadoras, equipos de música), mientras que otros se muestran conformes con las condiciones actuales, evidenciando diferentes escalas de deseo tecnológico y una adaptación histórica a la escasez. Estas posiciones se entrelazan con relatos espontáneos surgidos durante las actividades: “estoy bien acá”, “me gusta lo tranquilo que es acá, voy a la ciudad a pasear pero no me gusta quedarme”, “me gustan los animales, me gusta estar cerca de mis amigos y familia”. En reiteradas ocasiones emergió la palabra “libertad” como síntesis afectiva del lugar: libertad para correr, jugar y habitar un espacio que se percibe propio. En contraste, uno de los niños mencionó que, pocas semanas después de nuestra visita, se mudaría a Brasil debido a una oportunidad laboral para su padre en el sector vitivinícola, anticipando que extrañaría “estas tierras” y a su abuela, lo que revela cómo la movilidad laboral tensiona los vínculos afectivos y territoriales.

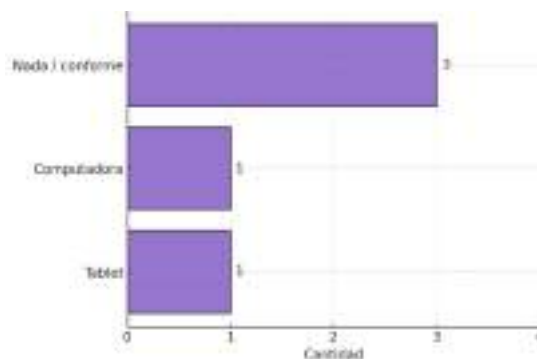


Figura 14: anhelos según alumnos.  
Fuente: elaboración propia.

Este escenario se desarrolla en un territorio intercultural donde conviven familias de origen diaguita-calchaquí y criollo, y donde la energía opera como una infraestructura sensible que conecta no solo dispositivos, sino también mundos simbólicos. Sin embargo, la instalación de paneles solares -realizada de forma externa y sin procesos de consulta previa- es percibida como una intervención ajena, aunque valorada por sus beneficios concretos. La escuela, como nodo comunitario, condensa estas tensiones: es el espacio que más requiere energía para enseñar, comunicarse y articular la vida comunitaria, pero el que menos recursos recibe para garantizar ese acceso.

En términos analíticos, esta situación expone la paradoja de las transiciones energéticas en contextos rurales: tecnologías altamente valoradas y culturalmente apropiadas en su uso cotidiano pueden, al mismo tiempo, permanecer como infraestructuras “impuestas” que reproducen asimetrías en la toma de decisiones. La energía, así, no solo ilumina hogares y escuelas, sino también las desigualdades de poder que atraviesan su provisión, mantenimiento y gobernanza.

### **Síntesis interpretativa**

El acceso a la energía en Santa Bárbara es técnicamente viable gracias a la instalación de paneles solares domiciliarios, pero esta disponibilidad se encuentra atravesada por una inestabilidad simbólica que condiciona su significado y su uso. La energía no se percibe como un derecho plenamente garantizado, sino como un recurso contingente, sujeto a la radiación solar, a las condiciones de mantenimiento y a las capacidades técnicas de la comunidad. Esta fragilidad no solo impacta en la organización de la vida cotidiana, sino que moldea las expectativas, los hábitos y las estrategias de adaptación de las familias y de la escuela. En este sentido, la infraestructura energética no es un elemento neutro, sino un actor que participa en la configuración del hábitat y de las relaciones sociales (ver figura N° 15).



*Figura 15: equipo de trabajo junto a alumnos.  
Fuente: banco propio de imágenes.*

Más allá de su función técnica, la energía en Santa Bárbara sostiene imaginarios de futuro, regula emociones y habilita aprendizajes. Las expresiones de niñas y niños que asocian la electricidad con la seguridad, la posibilidad de estudiar o el acceso a otros mundos -a través de internet o dispositivos digitales- muestran que su valor excede lo material. La energía se convierte en un *recurso del cuidado*, que protege y habilita, pero cuya fragilidad introduce también incertidumbre. Desde la perspectiva de los imaginarios sociotécnicos (Jasanoff y Kim, 2009), este caso revela cómo las comunidades rurales construyen visiones de vida buena que dependen de infraestructuras cuya estabilidad no está garantizada, generando tensiones entre aspiraciones y condiciones reales.

Reconocer esta dimensión implica reorientar las políticas públicas de electrificación rural hacia enfoques más participativos y culturalmente situados. No basta con contabilizar paneles instalados o

medir la cobertura técnica: es necesario desarrollar diagnósticos que incorporen la voz de las comunidades, identificar barreras culturales y técnicas para la apropiación de la energía, fortalecer capacidades locales de gestión y asegurar el mantenimiento cuando se hacen las instalaciones. Solo así se podrán diseñar estrategias que aseguren la continuidad del servicio, promuevan un uso pedagógico y productivo de la energía, y respeten la diversidad cultural y territorial. La transición energética en territorios interculturales como Santa Bárbara requiere, por tanto, articular lo técnico con lo social y lo pedagógico, reconociendo que la energía es tanto un bien material como un recurso simbólico que estructura la vida comunitaria.

## **CONCLUSIONES**

El caso de la Escuela Rural de Santa Bárbara evidencia que, en territorios rurales e interculturales, la energía no constituye únicamente un insumo para el funcionamiento de equipamientos, sino una condición estructural para el ejercicio pleno del derecho a la educación. La disponibilidad -o la ausencia- de electricidad incide de manera directa en la organización pedagógica, la continuidad de las trayectorias escolares y la capacidad institucional para sostener prácticas educativas significativas. En un contexto donde convergen familias de origen diaguita-calchaquí y criollo, la energía media no solo el acceso a contenidos curriculares, sino también la posibilidad de preservar, articular y proyectar saberes locales en diálogo con conocimientos globales. Desde esta perspectiva, la electrificación no debe entenderse únicamente como una política de infraestructura, sino como una política educativa, cultural y territorial. El acceso intermitente y condicionado a la electricidad revela la tensión entre los imaginarios sociotécnicos que asocian la energía solar con modernización y progreso, y la experiencia concreta de comunidades que conviven con la fragilidad del suministro. Al habilitar la conectividad y el uso de dispositivos digitales, la energía amplía horizontes culturales y lingüísticos; sin embargo, la falta de estrategias pedagógicas interculturales que integren estos recursos genera que las oportunidades tecnológicas se capitalicen de manera desigual. Así, la energía se configura como una tecnología del cuidado, capaz de resguardar la seguridad física y el bienestar emocional de la infancia, pero que también actúa como un marcador de las desigualdades territoriales.

Desde el prisma de la justicia energética, la situación de Santa Bárbara interpela la noción de transición justa: instalar sistemas fotovoltaicos no es suficiente si no se garantiza su sostenibilidad técnica, un mantenimiento regular y su apropiación comunitaria. La interculturalidad demanda que las políticas energéticas dialoguen con las realidades culturales, productivas y climáticas de cada territorio, evitando lógicas de intervención vertical que invisibilizan las formas locales de organización del hábitat y del trabajo educativo. La energía, en este sentido, no solo debe ser accesible, sino también culturalmente pertinente, pedagógicamente integrada y socialmente gestionada.

En términos de política pública, este caso revela la urgencia de articular los programas de electrificación rural con las políticas educativas y culturales, incorporando indicadores de vulnerabilidad territorial, garantizando capacitación técnica en las comunidades y dotando a las escuelas de equipamiento adaptado a sus necesidades pedagógicas y culturales. Asimismo, es clave desarrollar mecanismos de evaluación participativa que incorporen la voz de estudiantes, familias y docentes en la planificación y seguimiento de las intervenciones. La implementación de este enfoque en otros territorios rurales permitiría generar evidencia comparativa y construir estrategias diferenciadas según región, clima y matriz cultural.

Finalmente, esta investigación aporta un marco metodológico que, aun con una muestra acotada, permite captar las dimensiones materiales, simbólicas y afectivas del acceso a la energía. Al situar la experiencia infantil en el centro del análisis, se visibiliza cómo las desigualdades energéticas se traducen en desigualdades educativas y ciudadanas. En contextos de interculturalidad, garantizar un acceso estable, pertinente y sostenido a la energía no es únicamente una meta técnica, sino una apuesta ética y política por una educación que reconozca, valore y potencie la diversidad cultural como parte constitutiva del derecho a aprender.

## **FUENTES DE FINANCIAMIENTO**

Este trabajo fue financiado por el Proyecto de Investigación TIPO A N°2916/0 “Transición Energética en los Valles Calchaquíes y la Puna Salteña: análisis de políticas públicas de energía solar vinculadas con la producción del hábitat en Salta, Argentina” financiado por el CIUNSA y el Proyecto de Investigación TIPO A N°2710/0 “Caracterización y Factibilidad de Transiciones Energéticas en el noroeste argentino: Redes Inteligentes para un futuro sustentable” financiado por CIUNSA.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y a la Universidad Nacional de Salta por el financiamiento brindado. Además, expresamos nuestro profundo agradecimiento a la Escuela de Santa Bárbara por habernos abierto sus puertas y permitirnos conocer de cerca su realidad. También, agradecer la colaboración del Grupo de Estudios Socio-técnicos de la Energía y del Hábitat (GESEH) y a la Comunidad de Santa Bárbara en la Quebrada de las Conchas (Salta - Argentina).

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- García, A., y Orozco, C. (2023). Justicia energética en territorios rurales: experiencias y desafíos en América Latina. *Revista Latinoamericana de Estudios Energéticos*, 15(2), 45–68.
- González, F., Picabea, F., y Durán, P. A. (2023). Sentidos en torno a la dimensión energética en procesos de producción de hábitat en territorios indígenas en la provincia de Salta. *Revista Averma*, 26, 572–583.
- Govetto, S. C., González, F., Vilte, G., y Cornú, C. (2024). Transición Energética en comunidades indígenas rurales aisladas: sentidos en torno al acceso a la energía en El Sunchal (Salta-Argentina) a partir del programa de electrificación PERMER. *Hábitat Y Sociedad*, (17), 107–141. Recuperado de <https://doi.org/10.12795/HabitatySociedad.2024.i17.06>
- Herrera, M., y Tapia, C. (2022). Energía solar fotovoltaica y comunidades interculturales: aprendizajes desde la Puna argentina. *Cuadernos de Desarrollo Territorial*, 7(14), 85–112.
- Jasanoff, S., y Kim, S.-H. (2009). Containing the atom: Sociotechnical imaginaries and nuclear power in the United States and South Korea. *Minerva*, 47(2), 119–146. Recuperado de <https://doi.org/10.1007/s11024-009-9124-4>
- Ley de Educación Nacional. Ley N.º 26 206. (2006, 14 de diciembre). Boletín Oficial de la República Argentina, 28 de diciembre de 2006, núm. 31 062. Recuperado de <https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/ley-de-educ-nac-58ac89392ea4c.pdf>
- Meza, P., y Lagos, V. (2021). Educación rural y transición energética: una mirada desde la pedagogía crítica latinoamericana. *Revista de Educación y Sociedad*, 9(1), 33–56.
- Resolución CFE N.º 79/09. Plan Nacional de Educación Obligatoria. (2009, 28 de mayo). Consejo Federal de Educación. Recuperado de [http://www.bnm.me.gov.ar/giga1/normas/RCFE\\_79-09.pdf](http://www.bnm.me.gov.ar/giga1/normas/RCFE_79-09.pdf)
- Romero, N. H. (2020). Hacia una metodología comprensiva de “lo rural”: Lecturas situadas desde el campo de la educación. *Revista Andes*.
- Sovacool, B. K., y Griffiths, S. (2020). Culture and low-carbon energy transitions in Latin America: Sociotechnical imaginaries in solar electrification projects. *Energy Research and Social Science*, 65, 101474. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101474>

## ACCESS TO ENERGY AND RURAL EDUCATION: SOCIOTECHNICAL IMAGINARIES, USES, AND APPROPRIATIONS OF ENERGY IN CULTURALLY DIVERSE CONTEXTS

**ABSTRACT:** This article analyses access to electricity in the Rural School of Santa Bárbara, located in the Quebrada de las Conchas (Salta, Argentina), and its impact on educational practices in a rural and intercultural context. Based on surveys with students, field observations, and informal interviews, the study explores the material conditions, uses and appropriations of energy, and the sociotechnical imaginaries shaping future expectations. Adopting a qualitative and critical approach, energy is understood not only as a technical resource but also as a technology of care and a constitutive component of habitat. The findings show that although electrification through solar panels has improved living and teaching conditions, limitations remain regarding supply intermittency, local technical capacity, and the lack of pedagogical integration of energy and technological resources. It is concluded that rural electrification should be articulated with educational and cultural policies, ensuring technical sustainability, cultural relevance, and community participation. This case provides inputs for designing policies and strategies that can be replicated in other territories, recognising that access to energy in intercultural rural areas is both a technical and an ethical-political issue.

**Keywords:** solar energy, energy access, rural education, cultural diversity, energy justice.

## **MEJORAMIENTO DEL HÁBITAT EN BARRIOS POPULARES DEL GRAN LA PLATA: EXPERIENCIAS DESDE LA CONSTRUCCIÓN COLECTIVA DEL CONOCIMIENTO EN TORNO AL CONFORT AMBIENTAL A TRAVÉS DE TALLERES PARTICIPATIVOS**

**Graciela Viegas<sup>1</sup>, Jérica Belén Esparza<sup>1</sup>, Ana Belén Malianessi<sup>1</sup>, Martina Belén Santos<sup>1</sup>,  
Joel Ezequiel Asambuyo<sup>1</sup>, Sandra Ursino<sup>2</sup>, María Eugenia Durante<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Instituto de Investigaciones y Políticas del Ambiente Construido (IIPAC FAU CONICET/UNLP)

<sup>2</sup> Centro Interdisciplinario de Estudios Complejos (CIEC FAU UNLP)

Tel.: 221 4236587/90 Int. 250 email: gachiviegas@yahoo.com

**RESUMEN:** Se presenta el desarrollo de una estrategia de mejoramiento habitacional en barrios populares del Gran La Plata, realizada en el marco de un Programa de Extensión Universitaria (UNLP) y un proyecto de investigación financiado por la ANPCyT (PICT 2019-04135). A partir de un relevamiento colaborativo puerta a puerta realizado en viviendas seleccionadas del hábitat popular, se identificaron problemáticas vinculadas al confort ambiental, la seguridad eléctrica y la funcionalidad espacial, con lo cual se diseñaron talleres participativos de mejora. El objetivo de este artículo es identificar y proponer estrategias integrales de mejoramiento del hábitat en barrios populares a partir de talleres participativos orientados a fortalecer la seguridad, el confort y la funcionalidad de las viviendas. La metodología combinó herramientas participativas, recursos didácticos y propuestas contextualizadas. A partir de la experiencia se elaboraron soluciones técnicas accesibles junto a los vecinos, enfocadas en la ventilación, iluminación, orientación, instalaciones seguras y posibles ampliaciones. Los resultados destacan la participación comunitaria, la articulación institucional y el valor de enfoques interdisciplinarios y sostenibles desde una perspectiva de acceso a derechos. La estrategia podría ser replicada en otros contextos similares.

**Palabras clave:** estrategias integrales de mejoramiento habitacional, seguridad, confort, funcionalidad, talleres participativos.

### **INTRODUCCIÓN**

La región latinoamericana ha sufrido transformaciones en sus ciudades, principalmente a partir de la década del '90, donde se han observado diversos cambios en la morfología urbana. La extensión del tejido se ha configurado como parte de un proceso en donde la traza original se ha visto desbordada por una estructura urbana dispersa, desarticulada y socialmente fragmentada. El acelerado proceso de expansión que ha sufrido en las últimas décadas ha incentivado un marcado incremento de la superficie urbanizada, pero con ciertas carencias en infraestructura, servicios básicos, equipamiento o pavimentación. Esta situación, se incrementa por una marcada ausencia estatal en cuanto a la generación de líneas o mecanismos estratégicos para la generación de nuevos asentamientos urbanos (Esparza et al 2024)(Gassull 2017).

En Argentina, los barrios populares concentran un elevado déficit habitacional cualitativo, expresado en viviendas precarias, con hacinamiento, con escaso acceso a servicios básicos y condiciones de habitabilidad deficitarias (CIPPEC et al, 2023)(Ministerio de Obras Públicas, 2010). En este contexto, los procesos de mejoramiento del hábitat demandan abordajes integrales que contemplen tanto los aspectos técnicos y constructivos como los sociales, culturales y económicos de quienes habitan estos territorios. (Jaramillo, 2012; Marino y Faas, 2020). Desde los aspectos técnicos, se observan los aportes que Jimenez Romera y Silva Plata (2023) realizan acerca de los parámetros de diseño vinculados a “vivienda saludable” en relación al control de humedades, ventilación cruzada, captación de luz natural y materiales/recubrimientos que evitan acumulación de humedad. Por su parte Ginestar (2024) analizó



conjuntos habitacionales argentinos y relaciona las deficiencias constructivas (mala ventilación, condensación, filtraciones) con los problemas de salud y ofrece recomendaciones de gestión pública para incorporar criterios de salud en programas de rehabilitación de viviendas. Desde los aspectos sociales, Palero (2023) destaca la importancia del diseño participativo como la gradual construcción de consensos alrededor de un conjunto de expresiones objetivadas que pueden ser discutidas y negociadas hasta fijar una meta común: un proyecto.

### ***Caso de estudio***

En el marco del Programa de Extensión Universitaria “Atención Primaria del Hábitat en Barrios Populares” y del Proyecto de Investigación PICT “Plan de mejoramiento integral de viviendas en sectores poblacionales en riesgo socio-territorial localizados en asentamientos informales del Partido de La Plata, estrategias orientadas a la envolvente edilicia, el saneamiento y el acceso a la energía”, de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo y del Consejo Nacional Científico y Técnico (CONICET), se han desarrollado distintas experiencias territoriales con el objetivo de promover estrategias de mejora edilicia en articulación con la comunidad de dos barrios, El Molino y Puente de Fierro. Los mismos, han sido seleccionados principalmente por las capacidades organizativas, gestionarias y de acción de sus habitantes con los cuales se viene trabajando hace tiempo respecto a diferentes acciones de mejoramiento habitacional (Esparza et al 2024).

El Barrio El Molino, se encuentra en la periferia sureste de la ciudad de La Plata (Ver Figura 1). Se accede al mismo por medio de una de las principales arterias viales de la ciudad, la avenida 7, lo que lo convierte en un barrio con rápida accesibilidad al centro urbano (casco fundacional de la ciudad). Sin embargo, si bien se accede por una arteria rápida, las calles intrabarriales son de tierra y de tránsito dificultoso, principalmente los días de lluvias y tormentas, ya que el barrio presenta anegaciones e inundaciones en esas oportunidades. El estado de las viviendas es precario, pero con cierta terminación constructiva lo que permite su mejoramiento. Entre los años 2022 y 2023, a partir del acceso a un Proyecto de Obra Temprana (POT) otorgado por la Secretaría de Integración Socio Urbana (SISU), se avanzó en el trazado de veredas en cuadras estructurales para posibilitar el acceso al barrio. Respecto al abastecimiento de servicios básicos de infraestructura, el barrio cuenta con red de energía eléctrica, pero no cuenta con red de gas natural, red cloacal y solo hay red de agua potable sobre la calle de acceso principal. La recolección de residuos habituales se realiza a partir del acopio en containers que se encuentran ubicados en puntos estratégicos del barrio. En el comedor, funciona un jardín inicial, así como diferentes talleres. El mismo cumple funciones múltiples. Adyacente al mismo, se encuentra la huerta barrial para consumo y venta de verduras y hortalizas. Entre los factores de riesgo ambientales, además de los sectores inundables, en sectores aledaños al barrio, funciona una cantera activa de uso extractivo, y suelen proliferar los microbasurales por deficiencia en la recolección de residuos habituales.

En el caso del Barrio Puente de Fierro, ubicado en el sector noroeste de la ciudad de La Plata (Ver Figura 1) se conoce que: i. el comedor abastece a 50 familias; ii. Existe un CAP (Centro de Atención Primaria) de salud, el cual tiene los servicios de ginecología, pediatría, clínica obstétrica, odontología y de laboratorio; iii. las líneas de transporte que acceden al barrio y tienen conectividad con el casco urbano de la ciudad; iv. poseen certificado de vivienda; v. servicios: hay recolección de residuos por las vías principales, no hay alumbrado público, no hay servicio cloacal (utilizan pozo negro), agua potable de red (pero el tendido de cañerías pasa por sectores contaminados, por lo tanto, consumen agua de bidón), el acceso al servicio de energía eléctrica es informal y no hay medidor intralote, v. no hay equipamiento cultural como bibliotecas o centros; vi. no hay seguridad, ni apoyo educativo ni capacitaciones técnicas; vii. No hay espacios verdes recreativos en la zona. Entre los factores de riesgo, se observan áreas inundables y la proliferación de microbasurales.

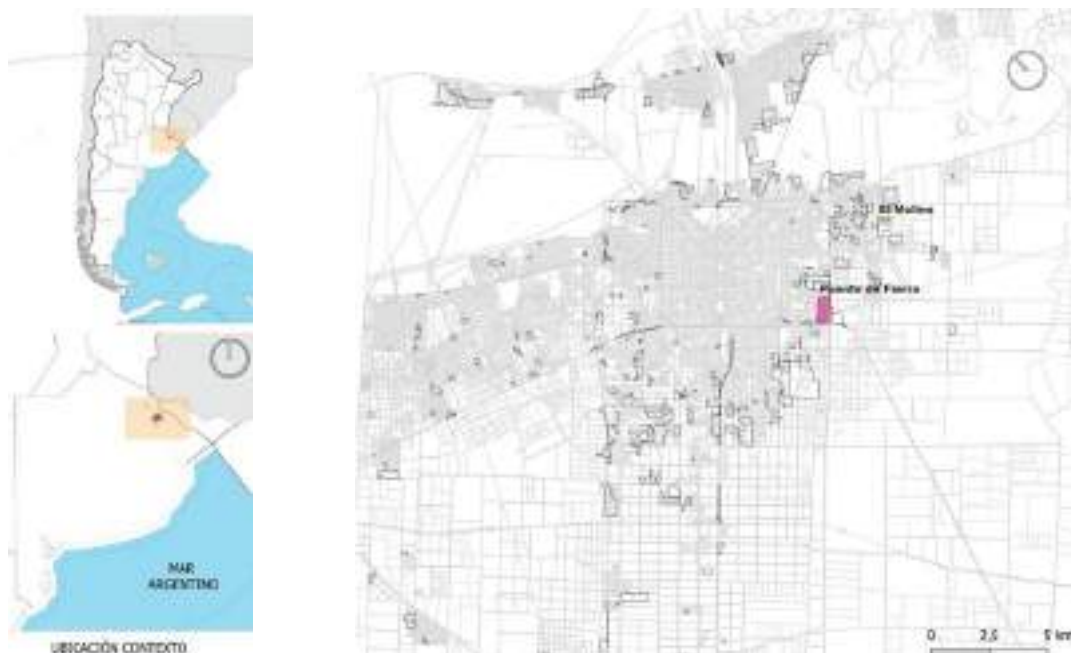


Figura 1. Localización de los barrios en el Partido de La Plata.

Fuente: Elaboración propia en base a RENABAP (2023)

En una primera etapa, en el año 2022, se realizaron mapeos colectivos, encuestas a las familias y sus viviendas, visitas técnicas y entrevistas a referentes barriales. Esta información permitió detectar deficiencias habitacionales, demandas prioritarias y posibilidades de acción colectiva. En una segunda etapa, en el año 2023, se realizó un relevamiento habitacional puerta a puerta por medio de una encuesta estructurada. En esta línea, para poder obtener información cualitativa y cuantitativa, se implementó una estrategia de triangulación metodológica. En palabras de Pi Puig: *“El sentido original de la triangulación metodológica en ciencias sociales se encuentra fuertemente asociado al proceso de validación de una inferencia o interpretación basada en una fuente de información a través de su confrontación con otra fuente de datos diferente”* (Op. cit; 2020). Esto implica una complementariedad de información, opinión e ideas de una misma situación. En este sentido, la encuesta se estructuró de tal manera que diera la posibilidad de obtener respuestas de mayor carácter estadístico (cuantitativas), y aquellas que posibilitan el estudio de las representaciones (cualitativas), así como su posible complementariedad con el resto de las herramientas utilizadas. Cabe resaltar que uno de los objetivos de este relevamiento fue la posibilidad de abordar la problemática desde una estrategia colectiva multiactoral, conformada por estudiantes, docentes, investigadores y vecinas y referentes de los barrios.

Este trabajo, permitió definir de manera conjunta entre referentes, vecinos y equipo de investigación, dos talleres teórico-prácticos: Ampliación y Mejoramiento de Viviendas y Seguridad en la Vivienda - Electricidad Segura (Esparza et al 2023). En ellos se abordaron las demandas y necesidades expuestas por los y las vecinas vinculadas con las experiencias teóricas y técnicas del equipo de trabajo respecto a este tipo de talleres y componentes. En cuanto a los antecedentes, específicamente nos referimos a desarrollos orientados desde y hacia comunidades de bajos recursos que apuntan a la mejora de la calidad de vida de los habitantes, y a los avances referidos a la seguridad de la vivienda, particularizando en la conexión eléctrica, expresados en el Manual del usuario “Electricidad Segura” (San Juan et al 2017)(UNLP 2017), información que permitió orientar los contenidos del taller.

Por lo antes dicho, este artículo sistematiza la experiencia adquirida en estos años de trabajo, definiendo las actividades a partir de una serie de acciones concretas, pautadas desde el grupo de trabajo de pertenencia: abordar y mejorar las condiciones de habitabilidad en sectores populares vulnerables (Esparza et al 2023; 2024). Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo es identificar y proponer estrategias integrales de mejoramiento del hábitat y la vivienda en barrios populares, orientadas al fortalecimiento de la seguridad, el confort ambiental y la funcionalidad de las viviendas.

## METODOLOGÍA

La metodología se basó en la implementación de talleres participativos como dispositivos de intercambio técnico-comunitario, enmarcados en el concepto o enfoque de “Atención Primaria del Hábitat” (Durante, 2022-2026). En esta línea, se promueve la apropiación del conocimiento desde una reflexión conjunta, enmarcada en un proceso de “acción”, en donde el taller se convierte en un "prácticum reflexivo". (Garzón, et al; 2005) Para ello, se plantea una metodología que apunta y enmarca conceptualmente un abordaje integral de las problemáticas del hábitat en los Barrios Populares de la ciudad de La Plata, haciendo énfasis en la vivienda. Se plantea una estrategia metodológica que permita conocer y analizar las condiciones socio-habitacionales, haciendo énfasis en la interacción entre los diferentes actores intervinientes en la producción del hábitat popular y el papel que juegan las organizaciones sociales y políticas locales. (Esparza et al, 2024) (Ver Figura 2).



Figura 2. Etapas de la propuesta metodológica sobre mejoramiento habitacional en Barrios Populares. Fuente: Elaboración propia

Cada taller fue estructurado en dos momentos: uno *expositivo*, donde se presentaron contenidos técnicos mediante paneles y material impreso; y otro *interactivo*, con material concreto de trabajo, maquetas y modelos experimentales, que promovieron la discusión con vecinos, la revisión de casos concretos y la formulación de propuestas de intervención.

El análisis posterior se realizó a partir del registro de las actividades, los materiales didácticos empleados, las observaciones de campo y los intercambios producidos durante las jornadas.

### Diagnóstico previo a la definición de los talleres

El mapeo colectivo permitió reconocer las problemáticas territoriales y ambientales en la escala del barrio. Entre ellas, se detectaron situación de riesgo y conflicto en relación a áreas inundables y de basurales, existencia de suelos extractivos, anegamientos por inundaciones, entre otros. Las encuestas, permitieron reconocer la situación constructiva y espacio-funcional de las viviendas.

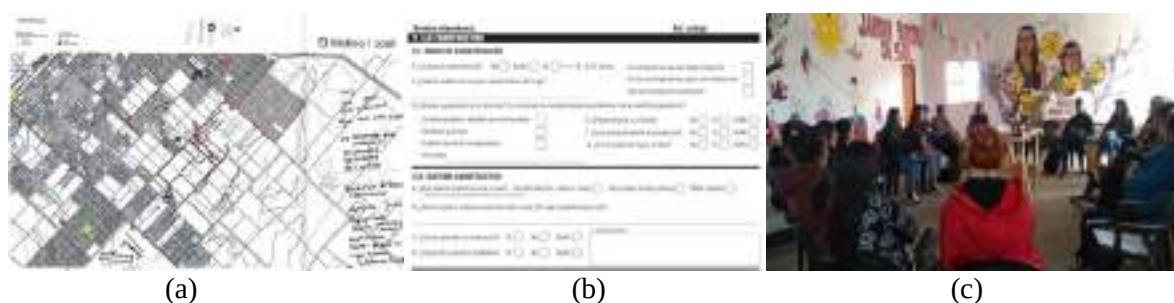


Figura 3. Relevamiento barrial. (a) Mapeo colectivo. (b) Extracto de encuesta puerta a puerta. (c) Mesa de trabajo con entrevistas e intercambio entre referentes y equipo universitario Fuente: Elaboración propia

A partir de ellos se detectaron deficiencias en cuanto a la climatización y refrigeración (confort higrotérmico), hacinamiento, falta de ventilación y deficiencias en cuanto al acceso a servicios básicos intralote. Las entrevistas (realizadas a referentes barriales), permitieron reconocer los procesos de transformación barrial y habitacional de los últimos años y en relación a este último tiempo.

Como se mencionó anteriormente, una primera aproximación a la problemática permitió reconocer profundas deficiencias en cuanto a la situación de confort ambiental y funcional en las viviendas. En la mayoría, los ambientes no tienen ventilación ni ganancia de luz solar directa, impactando de manera directa en la calidad de vida de las personas, lo que genera ambientes fríos y húmedos y en consecuencia, la proliferación de hongos y moho en pisos, paredes y techos. Esta situación, provoca daños respiratorios en los habitantes, influyendo negativamente sobre su bienestar físico y profundizando su condición de vulnerabilidad. (Smith y Vivekananda, 2020).

Previo a la organización de los talleres, se obtuvo un diagnóstico preliminar de las viviendas, lo que permitió entablar el intercambio con los vecinos. La caracterización del barrio refleja una realidad compleja en términos familiares, de salud, habitabilidad y acceso a servicios. En cuanto a la composición familiar, predomina la presencia de hogares extensos, con un 33,3% de viviendas ocupadas por cuatro integrantes y un 60,8% con más de cuatro personas, mientras que en el 11,6% conviven dos familias en un mismo espacio, lo que plantea desafíos en la habitabilidad y el bienestar cotidiano. Desde la perspectiva de la salud, el 37,7% de las familias enfrenta problemas recurrentes, el 46,4% sufre dolores físicos vinculados al esfuerzo laboral y casi la mitad de la población (49,3%) ha atravesado casos de COVID-19, evidenciando una marcada vulnerabilidad.

En cuanto a las viviendas, se observa que el 49,3% de los hogares no está satisfecho con su tamaño, además de que la mayoría carece de asesoramiento técnico adecuado, ya que solo el 2,9% recibió apoyo de arquitectos y el 24,6% de maestros mayores de obras. Predominan las construcciones de hormigón y ladrillo cerámico hueco de 0,15 m de espesor (61,8%), con presencia de grietas y deformaciones, especialmente en estructuras de hormigón y madera. Las aberturas metálicas, en su mayoría con vidrio simple (59,1%), presentan baja hermeticidad y carencia de protección climática o de seguridad (82,5%). Respecto a los servicios, más del 70% no tiene acceso a gas natural y depende de garrafas, lo que genera preocupación por la seguridad y el costo, mientras que un 39,1% carece de agua caliente, profundizando las limitaciones de confort. En la percepción subjetiva, el 48,1% de los habitantes manifiesta frío en invierno en dormitorios y un 33,3% calor en verano, con mayor percepción de frío en baños y cocinas (más del 70%), aunque la mayoría reconoce la entrada del sol (67,6%), considerándola beneficiosa para el calentamiento interior (63,5%). Sin embargo, persisten deficiencias de iluminación y asoleamiento en espacios clave como dormitorios y estar-comedor. Pese a que más del 70% de los hogares cuenta con ventilación cruzada y el 86,4% ventila regularmente sus ambientes, el 65,2% carece de rejillas en cocinas y lavaderos, y apenas el 10,1% percibe riesgos asociados a la combustión en interiores. En conjunto, estos resultados evidencian la necesidad urgente de intervenciones que fortalezcan la calidad habitacional, mejoren las condiciones de salud y promuevan una mayor conciencia en torno a la seguridad y el confort ambiental.

## **DESARROLLO**

En primera instancia se abordó en forma general una breve introducción respecto a la presentación del equipo de trabajo, las experiencias que desarrolladas previamente, puntualmente en los barrios El Molino y Puente de Fierro en el marco de los proyectos mencionados, retomando el relevamiento realizado entre los años 2022 y 2023. En este sentido, se comentaron los avances de la sistematización de dicho relevamiento, exponiendo resultados referidos a la temática del taller. Asimismo, se profundizó conceptualmente en dichos temas y focalizando en las diferentes problemáticas asociadas a la seguridad de la vivienda, el estado constructivo y de confort. Los temas fueron discutidos previamente por el equipo de investigación en la Facultad, con el propósito de estructurar las temáticas a abordar. Se organizaron en función de 4 (cuatro) ejes prioritarios: i. criterios de emplazamiento, construcción y expansión; ii. confort en la vivienda popular; iii. funcionalidad espacial en las ampliaciones; iv. Seguridad eléctrica.

### ***Momento 1: Expositivo***

La información presentada fue debatida con los y las vecinas, en uno de los barrios relevados como caso de estudio (Barrio El Molino, ubicado en la periferia sureste de la ciudad de La Plata) (Ver Figura 1), remarcando la importancia de considerar ciertas problemáticas como la falta de ventilación de los

ambientes en viviendas con estas características. Asimismo, se abordaron las temáticas de acceso al agua fría y caliente, la disposición de los desechos líquidos y sólidos, el acceso a gas para cocción y aseo personal y acceso a un sistema eléctrico seguro. Lo expuesto fue sistematizado con el fin de enmarcar lineamientos y acciones propositivas. La selección de este barrio se debió, principalmente, al vínculo estrecho que se generó entre el equipo de trabajo de la facultad y los vecinos y referentes del mismo. (Ver Figura 4)

- i. Criterios de emplazamiento, construcción y expansión: Como se mencionó, el barrio posee deficiencias respecto a su consolidación, densificación y factores de riesgo. En este sentido, el taller apuntó a reflexionar sobre el emplazamiento de las viviendas, considerando el riesgo hídrico, la topografía y el acceso a servicios.
- ii. Confort en la vivienda popular: Mejoramiento de las condiciones de confort ambiental y salud en las viviendas.
- iii. Funcionalidad espacial en las ampliaciones: También se trabajaron criterios de funcionalidad espacial, como el agrupamiento de servicios (baño, cocina, lavadero). Por un lado, para garantizar la correcta orientación de los ambientes principales y por otro, para simplificar las instalaciones y reducir costos, y la planificación de las ampliaciones considerando circulaciones, medidas mínimas y accesibilidad.
- iv. Seguridad eléctrica: Uno de los hallazgos más recurrentes fue el alto riesgo eléctrico en las viviendas, donde abundan conexiones precarias, sobrecargas, ausencia de disyuntores o tableros adecuados y uso de prolongadores peligrosos.



Figura 4. Primera parte del taller, exposición y debate de la problemática.

### **Momento 2: interactivo**

En la segunda parte de los talleres, se expusieron los condicionantes estructurales para reflexionar sobre el mejoramiento del barrio seleccionado.

#### *i. Criterios de emplazamiento, construcción y expansión*

Se propusieron criterios básicos como elevar los pisos por encima del nivel de calle, evitar encajonamientos que retengan agua y mantener superficies permeables. Respecto a las ampliaciones (necesarias debido al alto porcentaje de viviendas con hacinamiento), se abordaron temas como la necesidad de dar continuidad estructural y de envolvente respecto a lo existente, la necesidad de prever filtraciones y puentes térmicos, el uso de protecciones solares (aleros, galerías, árboles) y la modulación para un crecimiento ordenado. También se analizó la viabilidad de las estrategias de etapabilidad, que permiten planificar intervenciones graduales, según las posibilidades económicas y de mano de obra, articulando programas públicos como *Mi Pieza* y modelos de autogestión comunitaria.

Los vecinos expusieron que reconocen las falencias técnico-constructivas en cuanto a la construcción de sus viviendas, principalmente en lo relacionado a las inundaciones. El relleno de los lotes linderos



profundiza la situación de varias viviendas, así como la falta de limpieza en zanjas y la acumulación de basura y chatarra en las viviendas. Se observa ausencia de obras para la libre circulación del agua, siendo que se trata del cauce de un arroyo.

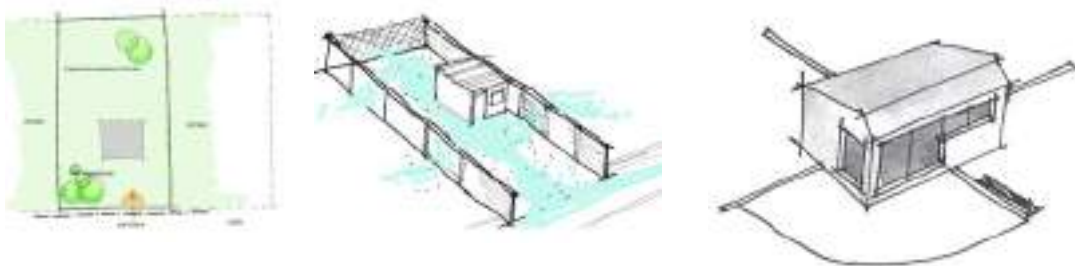


*Figura 5. Estrategias de emplazamiento de viviendas.*

*Fuente: Elaboración propia*

## *ii. Confort térmico y ambiental*

En muchos de los hogares relevados se identificaron deficiencias críticas: ventilación inadecuada, falta de iluminación natural, orientación desfavorable y problemas de humedad. Si bien la observación demuestra estas problemáticas, la percepción de las familias no lo contempla de la misma manera, con lo cual fue necesario plantear el debate. En este contexto, se enfatizó la importancia del confort higrotérmico, promoviendo estrategias simples y accesibles: ubicar ambientes principales hacia el norte, ventilar naturalmente mediante aberturas opuestas, evitar ampliaciones que obstruyan el ingreso de luz y renovar el aire para reducir la concentración de humedad y contaminantes. (Ver Figura 6).

Los vecinos expusieron que reconocen la falta de ingreso solar al interior de la vivienda, así como elementos de protección solar como pérgolas y/o vegetación en torno a la vivienda. La falta de ventilación cruzada es aprehendida en este aspecto, reconociendo que es un mecanismo eficiente de ventilación y refrescamiento, principalmente en verano.



*Figura 6. Se demostraron los beneficios de la orientación solar y la ventilación en los ambientes a través de maquetas explicativas. Croquis utilizados para las explicaciones.*

*Fuente: Elaboración propia*

### *iii. Funcionalidad espacial en las ampliaciones*

Como se ha mencionado, las viviendas relevadas poseen una relación entre cantidad y tamaño de las habitaciones deficiente respecto al número de habitantes, esto señala que las mismas poseen hacinamiento. Luego de la etapa expositiva, los habitantes señalaron las diferentes condiciones en las que vivían, produciendo un intercambio enriquecedor respecto a las posibilidades y condiciones de ampliación de sus viviendas.

Los vecinos expusieron que en sus viviendas, por falta de espacio (principalmente en los lugares de dormir) sentían cierta incomodidad y falta de privacidad, principalmente entre niños y adultos y/o entre niños con diferentes edades y actividades. Asimismo, por ese mismo problema, muchos ambientes quedan inhabilitados de luz y ventilación. Los habitantes planteaban la necesidad de ventilar espacios para disminuir los problemas de humedad existentes. En el intercambio con ellos, hemos señalado cuáles eran las mejores opciones para la ubicación de las ventanas y puertas en los diferentes ambientes respecto a la orientación y los vientos.



*Figura 7. Criterios de organización y funcionalidad espacial para las ampliaciones.  
Fuente: Elaboración propia*

### *iv. Electricidad segura: riesgos, soluciones y prácticas preventivas*

A raíz de esta exposición, y en relación al relevamiento realizado previamente, se llevó a cabo un taller específico sobre electricidad segura, el cual desarrolló y expuso contenidos vinculados a: Diseño de una instalación eléctrica mínima segura: disyuntores, llaves térmicas, circuitos diferenciados para tomas y bocas, y puesta a tierra; Identificación de riesgos frecuentes: sobrecalentamiento de cables, conexiones múltiples, enchufes deteriorados; Buenas prácticas de uso de artefactos eléctricos, considerando la demanda de energía y el estado de las instalaciones; Componentes básicos necesarios para una instalación segura, con listado de materiales y valores orientativos. (Ver Figura 8) Se promovió una apropiación comunitaria de estos conocimientos, complementada con manuales, paneles explicativos y un modelo reducido de una instalación tipo.

Los vecinos expusieron que las instalaciones suelen ser precarias, lo que ha provocado muchas veces desperfectos técnicos como cortocircuitos e incluso incendios en la vivienda. El intercambio permitió observar las condiciones en que se encuentran las instalaciones, focalizando en la seguridad de puesta a tierra, la aislación correcta de los cables y la necesidad de la instalación de cable canal para que no cuelguen al interior de las viviendas.



*Figura 8. Actividades desarrolladas con material de apoyo sobre las problemáticas de la electricidad segura. Fuente: Elaboración propia*



### **Anexos: Material complementario en el taller**

Como material complementario, cada taller se trabajó con la apoyatura gráfica y técnica de dos láminas grandes (paneles de 80 x 70 cm) que expusieron, por un lado, los resultados del relevamiento y, por otro lado, los temas centrales y de mayor urgencia, a partir de esquemas y dibujos. Entre ellos, se abordaron los temas de seguridad en la vivienda y seguridad eléctrica, así como la ampliación en la vivienda y sus criterios. Esta actividad permitió instaurar el debate sobre las problemáticas observadas, con lo cual poder considerar colectivamente los posibles plazos de resolución de estas. Por ejemplo, la extensión de las veredas hacia sectores internos del barrio y su consecuente accesibilidad en días de lluvia.

Como actividad complementaria, los y las vecinos identificaron a partir de diferentes colores, las preocupaciones principales en torno a sus viviendas. Esto permitió reconocer de manera detallada las posibles aproximaciones de mejora a las cuales podían acceder dichas personas.

Para el caso del taller de ampliación, se realiza una maqueta de una vivienda representativa (vivienda compacta, la mayoritaria en el barrio) en una escala grande, para observar las dimensiones de un terreno posible y la relación de la casa respecto a la ubicación en el mismo, definiendo espacios de patios, jardines y galerías. Esto, permite desarrollar temas como: Límites del terreno (consolidados, con cercos, alambre u otros), presencia de vegetación para sombreado, niveles de la construcción (uno, dos o más niveles), relación de medianera con lxs vecinos, cerramiento de la vivienda (donde, cómo, y por qué poner una ventana), relación de los ambientes con la buena orientación (norte, noreste, noroeste), elevación de la vivienda en el terreno y otros. También se presentaron dos manuales de conceptos y explicaciones prácticas de las problemáticas enunciadas, de mayor extensión, los cuales luego fueron sintetizados en los paneles (localización, confort, usos del espacio, construcción, gestión y financiamiento) y a partir del cual se expresan ciertas recomendaciones para la puesta en marcha para cada uno de ellos. Para el caso del taller de electricidad segura, se contó con un panel que representa una instalación eléctrica con tablero principal, *llaves térmicas y disyuntor*, un circuito de tomas, un circuito de iluminación y otro de puesta a tierra, una caja con dos tomacorrientes y una caja con una llave de luz, también con las correspondientes protecciones mecánicas (caños de plástico). También se contó con el listado de los materiales eléctricos necesarios para la instalación (con el objetivo de orientar a los asistentes al taller sobre los costos de la instalación) y manuales de “Electricidad Segura” realizados previamente por el equipo de trabajo. (San Juan, et al, 2017) (Ver Figura 9)

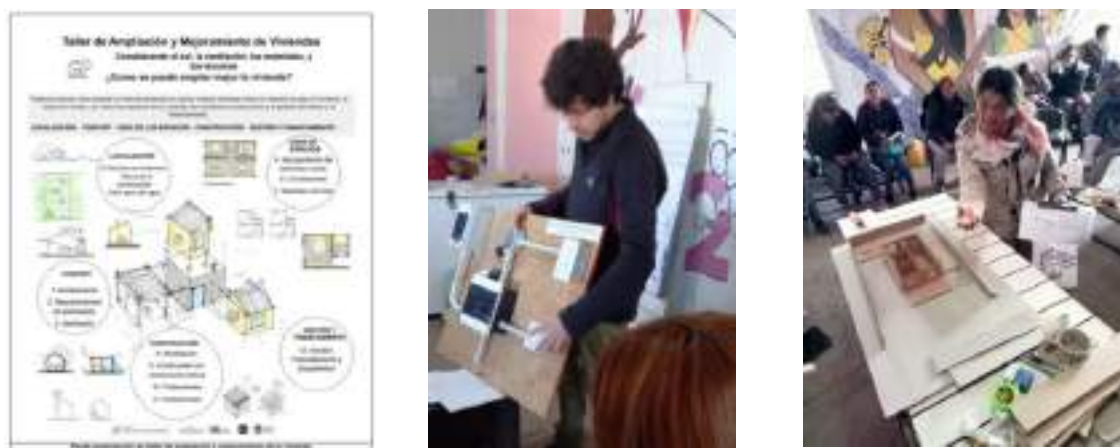


*Figura 9. Material complementario del taller, paneles, maquetas y modelos demostrativos.  
Fuente: Elaboración propia.*

### **Modalidad de acción: participación comunitaria y gestión interinstitucional**

La participación de los y las vecinas fue central en todas las instancias. A través de encuentros previos, se construyó colectivamente el contenido de los talleres, se acordaron días, horarios y modalidad de las jornadas, así como la definición de prioridades de intervención. La comunidad no fue un “destinatario” pasivo, sino actor activo en el diagnóstico, diseño y evaluación de propuestas.

Se promovió una gestión comunitaria del hábitat, fomentando el conocimiento técnico popular, la articulación entre vecinos, la planificación participativa y la cooperación con organismos del Estado, universidades y organizaciones sociales. Esta perspectiva busca garantizar no solo la realización de mejoras, sino su sostenibilidad y apropiación en el tiempo.

## CONCLUSIONES

Las experiencias desarrolladas en los barrios populares del Gran La Plata evidencian el potencial del diagnóstico colectivo de las condiciones habitacionales y la realización de los talleres técnico-comunitarios como estrategia de mejora del hábitat. A través de estos espacios se promovieron aprendizajes, diagnósticos participativos y propuestas contextualizadas que fortalecen las capacidades de los propios habitantes.

A partir del relevamiento realizado, se observó que las viviendas presentaban deficiencias respecto a su conformación funcional, así como de ventilación y asoleamiento. Por ello, la discusión se centró, en primer lugar, en la conceptualización de cada uno de los problemas detectados, los cuales han sido discutidos a partir de las experiencias propias. En segundo término, se avanzó sobre actividades prácticas realizando distintas “pruebas” tanto en maqueta de vivienda como en modelos de sistemas eléctricos seguros.

Respecto a los dos talleres, se observó que tuvieron una buena convocatoria, asistieron más de 40 personas. Las mismas se mostraron interesadas y realizaron consultas, compartieron sus experiencias al respecto, y comprendieron la importancia de la buena ubicación de los ambientes de la casa respecto al sol y la posible ventilación, así como abordar los pasos para obtener un sistema eléctrico seguro en las viviendas. Asimismo, se propuso la posibilidad de una segunda parte del taller para avanzar sobre casos puntuales de diferentes vecinos interesados en recibir asesoramiento por parte del equipo técnico. En cuanto a la ampliación de las viviendas se definió, a partir de las maquetas y mesas de trabajo, diferentes posicionamientos respecto a la vivienda en el terreno, así como altura, ubicación, orientación y posicionamiento de ventanas y puertas. Esto, permitió extraer conclusiones respecto a la ubicación de los diferentes ambientes de la vivienda respecto al terreno. En cuanto a las instalaciones eléctricas seguras, se definió el alcance de la seguridad de la vida humana y la vivienda respecto a una instalación realizada con los diferentes componentes técnicos. Los principales hallazgos de estas experiencias son su aporte a la construcción colectiva de criterios de confort, seguridad y funcionalidad habitacional, que pudieron elaborarse herramientas técnicas accesibles y replicables; y que se formaron redes comunitarias para la mejora del hábitat desde una perspectiva de derechos.

Algunas conclusiones y consideraciones particulares que surgieron del debate colectivo se orientan a avanzar en el mejoramiento habitacional a través de los siguientes aspectos prioritarios: i. En cuanto a los sistemas de conexión eléctrica, se requiere desarrollar programas educativos para promover prácticas seguras en la conexión eléctrica y fomentar la contratación de electricistas profesionales, así como establecer iniciativas de subsidios o financiamiento para mejorar la infraestructura eléctrica, asegurando la presencia de medidores, tableros, y dispositivos de seguridad; ii. En cuanto a las conexiones de gas se requiere implementar programas de acceso a gas asequibles, priorizando la instalación de medidores y llaves de corte para mejorar la seguridad y eficiencia en el uso, así como proporcionar información y capacitación sobre el uso eficiente de gas y la instalación de sistemas de calefacción y agua caliente más seguros y económicos; iii. En cuanto a la ventilación de las viviendas, se requiere promover la instalación de rejillas de ventilación en dormitorios, estares, cocinas y lavaderos para reducir los riesgos por inhalación de gases indebidos, así como reducir el contacto con los problemas de salud asociados a los hongos en las viviendas. Y fomentar campañas educativas sobre prácticas de ventilación efectivas y la importancia de mantener ventanas abiertas; iv. En cuanto a la implantación de las viviendas, se requiere fortalecer las ideas alrededor de comprender que se habita un barrio inundable y que la vivienda debería responder a ese problema desde el diseño, implantación, ubicación.

## REFERENCIAS

- CIPPEC. Boix, M. V.; Di Virgilio, M.; González Redondo, C.; Marco, M.V.; Murillo, F. (2023). Desafíos de la planificación territorial, el acceso al hábitat y a la vivienda. Asignaturas pendientes a 40 años del retorno de la democracia en Argentina. Programa Ciudades. Documento de trabajo.
- Durante, M. E., Esparza, J., Ursino, S. V. y Viegas, G. (2022-2026). Atención primaria del hábitat en barrios populares [Convocatoria 2021-desarrollo 2022-2023]. UNLP
- Esparza, Jesica Belen; Viegas, Graciela Melisa; San Juan, Gustavo Alberto; Invernizio, Carolina (2024) Escenario tendencial de la problemática habitacional en barrios populares periféricos de La Plata; Universidad Autónoma del Estado de México; Legado de Arquitectura y Diseño; 19; 35; 165-176.
- Esparza, Jesica Belen; Durante, Maria Eugenia; Viegas, Graciela Melisa; Ursino, Sandra Valeria (2024) Atención Primaria del Hábitat: Programa universitario para la mejora de la vivienda en Barrios Populares del Gran La Plata; Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Sociales. Instituto de Investigaciones Gino Germani; Quid 16; 22; 1-29.
- Esparza, Jesica Belen; Viegas, Graciela Melisa; Malianesi, Belén; Durante, Maria Eugenia; Ursino, Sandra V.; Invernizio, Carolina (2023) Relevamiento de la situación socio-habitacional y desarrollo de talleres de mejoras Barrio El Molino (Centro Comunitario Oga Guazú) y Barrio Puente de Fierro (Centros Comunitarios Expropiemos el Futuro y Casita Compartida)
- Jaramillo, S. (2012). Urbanización informal: diagnósticos y políticas: una revisión al debate latinoamericano para pensar líneas de acción actuales (N.º 11). Universidad de los Andes. <https://repositorio.uniandes.edu.co/flip/?pdf=https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/c3ced12c-4cd1-4507-8131-78d3898a3ad8/content>
- Jiménez Romera, Carlos, & Silva Plata, Lina María (2023). Vivienda saludable, parámetros de diseño arquitectónico incluidos en la normativa Latinoamericana. *Revista 180* , (52), 17-28. [https://dx.doi.org/10.32995/rev180.num-52.\(2023\).art-1091](https://dx.doi.org/10.32995/rev180.num-52.(2023).art-1091)
- Garzón, Beatriz; Auad, Ana; Abella, María Laura; Brañes, Noemí La transformación del hábitat popular desde talleres integrados de investigación acción participativa Revista INVI, vol. 20, núm. 55, noviembre, 2005, pp. 121-138 Universidad de Chile Santiago, Chile
- Gassull, V. M. (2017). El hábitat popular. Algunos aportes teóricos de la realidad habitacional de sectores desposeídos. Territorios, 36.
- Ginestar, Florencia (2024). El enfoque de la vivienda saludable en la gestión local del hábitat. el caso de viviendas colectivas en un municipio del área metropolitana de Mendoza, Argentina. *Folia Histórica del Nordeste*, (50), 151-168. <https://dx.doi.org/10.30972/fhn.50507649>
- Marino, E., & Faas, A. J. (2020). Disasters and Vulnerability: How strong is the link? *Annual Review of Anthropology*, 49, 251-266.
- Ministerio de Obras Públicas (MOP) (2010). Déficit Habitacional Cuantitativo Compuesto, Observatorio Federal Urbano
- Palero, Juan (2023). La incorporación del diseño participativo en la política habitacional argentina. REVISTARQUIS. ISSN: 2215-275X. Volumen 12, Número 2. DOI: <https://doi.org/10.15517/ra.v12i2.53820>
- Pi Puig, A. (2020). Técnicas cualitativas combinadas en un estudio de caso: reflexiones a partir de una experiencia de investigación sobre cuestiones de ambiente y basura en barrios pobres urbanos (IX Jornadas sobre Etnografía y Métodos Cualitativos). IDES.
- San Juan, G.; Lopez, E.; Tozzi, F. (2017) Modelo de gestión participativa del proyecto “Electricidad Segura”, en el Municipio de La Plata. Congreso Regional de Tecnología de la Arquitectura, CRETA,
- Smith, D., & Vivekananda, J. (2020). *A Climate of Conflict: The Links Between Climate Change, Peace, and War. International Alert.*
- UNLP-CONSEJO SOCIAL (2017). Documentos del Programa Electricidad Segura - Anexo Roles del Productor Social de Hábitat y del capacitador.

## **STRATEGIES FOR HABITAT IMPROVEMENT IN LOW-RISK NEIGHBORHOODS OF GRAN LA PLATA: EXPERIENCES FROM COLLECTIVE KNOWLEDGE CONSTRUCTION THROUGH PARTICIPATORY WORKSHOPS**

**ABSTRACT:** This article presents a housing improvement strategy for working-class neighborhoods in Greater La Plata, developed within the framework of a University Extension Program (UNLP) and a research project funded by ANPCyT (PICT 2019-04135). Based on a collaborative door-to-door survey, issues related to environmental comfort, electrical safety, and spatial functionality were identified, and participatory improvement workshops were designed. The objective of this article is to identify and propose comprehensive housing improvement strategies in working-class neighborhoods, aimed at strengthening the safety, comfort, and functionality of homes, based on the analysis of participatory workshops held in two neighborhoods. The methodology combined participatory tools, educational resources, and contextualized proposals. Based on this experience, accessible technical solutions were developed together with neighbors, focusing on ventilation, lighting, orientation, safe installations, and expansion planning. The results highlight community participation, institutional coordination, and the value of interdisciplinary and sustainable approaches from a rights-based perspective. The strategy could be replicated in other similar contexts.

**Keywords:** comprehensive housing improvement strategies, security, comfort, functionality, participatory workshops.

## **EXPERIENCIA DE LA ASIGNATURA “CONSTRUCCIONES BIOCLIMÁTICAS”: ENSEÑANZA DE LAS NORMATIVAS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN PROYECTOS DE VIVIENDA PÚBLICA DE LA PROVINCIA DE SANTA FE. REGLAMENTACIÓN DEL DECRETO N°0387/2025 PARA VIVIENDAS SOCIALES**

**Cristina Adriana Cervera<sup>1</sup>, Jéssica Anahí Álvarez<sup>2</sup>, Federico Mateo<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura - Universidad Nacional de Rosario -  
Riobamba bis, S2000EKF, Rosario, Santa Fe – Argentina. Tel.+54 (0341) 480-8538 e-mail:  
[ccervera@fceia.unr.edu.ar](mailto:ccervera@fceia.unr.edu.ar), [fmateo@fceia.unr.edu.ar](mailto:fmateo@fceia.unr.edu.ar)

<sup>2</sup>Centro Universitario Rosario de Investigaciones Urbanas y Regionales (CURDIUR) Consejo  
Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas - Universidad Nacional de Rosario (CONICET-  
FAPYD). Riobamba 220 bis, FAPYD (ala norte), 1° piso, Of. 132  
S2000EKF, Rosario, Santa Fe – Argentina. Tel.+54 (0341) 480-8532 - Int: 1320/1330/1360 e-mail:  
[alvarez@curdiur-conicet.gob.ar](mailto:alvarez@curdiur-conicet.gob.ar)

**RESUMEN:** El presente trabajo describe la experiencia docente desarrollada en el marco de la asignatura electiva “Construcciones Bioclimáticas” de la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura (FCEIA) de la Universidad Nacional de Rosario. La propuesta integra docencia e investigación mediante el análisis, diseño y evaluación de soluciones constructivas que incorporen criterios de sostenibilidad, eficiencia energética y confort higrotérmico. En el ciclo 2025, para el trabajo final integrador se toma como caso de estudio un conjunto de vivienda pública del Programa Nacional Casa Propia en la localidad de Alcorta (Santa Fe, Argentina), en el contexto de la reciente reglamentación de Ley provincial n.º 13903 sobre etiquetado de viviendas, que por primera vez incorpora requisitos específicos para viviendas sociales. La experiencia incluyó un abordaje en etapas, incorporando modificaciones constructivas y evaluaciones comparativas mediante el Aplicativo Informático Nacional de Etiquetado de Viviendas (AEV). Se trabajó con la colaboración de profesionales investigadores externos a la asignatura que permitió al estudiantado comprender el impacto de las decisiones proyectuales no sólo en el desempeño energético sino también a escala urbana, fomentando una visión crítica frente a las normativas y reforzar el rol de los profesionales de la construcción en la promoción de hábitats sostenibles y resilientes.

**Palabras clave:** eficiencia energética, etiquetado de vivienda, vivienda social.

### **INTRODUCCIÓN**

Se presenta la experiencia docente desarrollada en el marco del Espacio Curricular Electivo “Construcciones Bioclimáticas”, dictado en la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura (FCEIA) de la Universidad Nacional de Rosario. La propuesta académica tiene como eje central la incorporación de criterios sostenibles en el diseño de proyectos constructivos, a partir de la aplicación de sistemas y tecnologías que permitan reducir el impacto ambiental, minimizar los requerimientos energéticos y promover modos de producción más limpios y eficientes, manteniendo la viabilidad económica de las soluciones propuestas.

En el sector de la construcción, gran parte de los consumos energéticos en los usos finales está vinculada a demandas térmicas, como calefacción, refrigeración para acondicionamiento de ambientes. En Argentina, el 37% del consumo energético actual se atribuye al sector de la construcción, siendo el aire acondicionado el factor más significativo (Kuchen, E.; Kozak, D, 2020).

Sumado a ello, diversos estudios han observado que la demanda energética para refrigeración aumenta considerablemente en el escenario climático futuro, aproximadamente un 73 % en comparación con la



del clima actual (Saez, V. C., Quintana-Gallardo, A., Mendiguchía-Fontes, F. A., Garzón, B. S., & Guillén-Guillamón, I., 2024). Los eventos de calor extremo provocan un aumento de las temperaturas interiores en los edificios, incrementan el consumo de energía y generan con mayor frecuencia problemas de salud, especialmente en niños, personas mayores de 65 años y grupos vulnerables de bajos ingresos (Flores Larsen, Silvana & Filippín, Celina, 2020). El nivel de aislación térmica de los edificios, sus componentes y sistemas constructivos se convierten así en un factor determinante para alcanzar mayores niveles de eficiencia energética. No solo por las características de los materiales respecto a su transmitancia térmica, sino también por sus propiedades ópticas y el impacto de las mismas en la temperatura del aire exterior, que pueden contribuir al sobrecalentamiento urbano.

Frente a este escenario, la asignatura propone una estrategia formativa que permita a las y los estudiantes de la carrera de Ingeniería Civil incorporar herramientas teóricas y prácticas para el análisis, diseño y evaluación de soluciones constructivas que integren parámetros de confort higrotérmico, eficiencia energética y criterios sostenibles en la construcción. La estrategia se fundamenta en un enfoque integral que contempla aspectos técnicos, económicos, sociales y ambientales, integrados mediante el uso de modelos de simulación. Además, se enfatiza en el efecto de las soluciones habitacionales en el microclima urbano, particularmente en la mitigación del sobrecalentamiento urbano, promoviendo una visión integral que contribuya al desarrollo de edificaciones más sostenibles y resilientes en el contexto actual.

El equipo docente articula con profesionales del medio, investigadores y otros espacios académicos, con el fin de enriquecer la propuesta mediante la incorporación de saberes vinculados a nuevos materiales, tecnologías y normativas que se han incorporado recientemente en la región. La asignatura se encuentra en permanente proceso de actualización y adecuación en función de los avances normativos en la temática estudiada. En este sentido, se articula de forma activa con los marcos regulatorios vigentes a nivel local, provincial y nacional —como la Ordenanza n.º 8757/2011 de la ciudad de Rosario, la Ley provincial n.º 13903 de Etiquetado de Viviendas y la adhesión de la provincia de Santa Fe al Programa Nacional de Etiquetado de Viviendas (PRONEV)—, incorporando dichos instrumentos no sólo como contenidos teóricos, sino también como herramientas proyectuales.

Por un lado, la Ordenanza n.º 8757 de Rosario establece la obligatoriedad de utilizar planillas técnicas para verificar la transmitancia térmica en techos, paredes y cerramientos vidriados en obras nuevas y reformas. Dichas planillas deben demostrar el cumplimiento de los valores máximos permitidos tanto para la envolvente opaca como para la envolvente transparente, e incluyen también los límites del Factor de Exposición Solar (FES) en función de la orientación de las superficies vidriadas.

Por otro lado, el Aplicativo Informático Nacional de Etiquetado de Viviendas (AEV) es una herramienta online y de acceso abierto que permite evaluar la eficiencia energética de las viviendas y generar una etiqueta que indique su calificación. Dicha etiqueta se representa en una escala de letras que va de la A a la G, donde cada letra corresponde a un rango de valores del Índice de Prestaciones Energéticas (IPE). El IPE se calcula conforme a la norma IRAM 11900:2017, basada en la norma ISO 13790. En este marco, la Secretaría de Energía desarrolló el AEV, que implementa los cálculos necesarios para determinar el IPE. Además, se llevaron a cabo pruebas de implementación en distintas ciudades, con el objetivo de validar el proceso de etiquetado en su conjunto y definir las escalas de letras asociadas a los rangos de IPE en cada zona climática según Norma IRAM 11603:2012 (Abalone, R., Stagnitta, R., Scarinci, C., Larregola, J. L., & Gastón, A., 2022).

Finalmente se propone que las y los estudiantes no se limiten a cumplir normativas de manera prescriptiva, sino que las integren, desde un inicio, como insumos fundamentales para la toma de decisiones en las etapas de diseño y evaluación de las soluciones constructivas. Particularmente, se pone énfasis en la capacidad de las y los futuros profesionales para aplicar estos criterios en proyectos de vivienda pública promovidos por el Estado, considerando que es desde allí donde se deben generar las iniciativas para el cambio de paradigma.

## **METODOLOGÍA**

La asignatura se estructura en torno a cuatro unidades temáticas articuladas de manera progresiva. Durante el dictado, se promueve la participación de docentes que llevan a cabo proyectos de investigación vinculados a la temática, como así también de empresas del sector de la construcción, de manera de brindar al estudiante una visión actualizada y práctica sobre las problemáticas y nuevas soluciones en el sector de las construcciones sostenibles y el uso eficiente de la energía.

Como integración de todos los saberes adquiridos se desarrolla un trabajo final eminentemente práctico, sobre un proyecto de vivienda proporcionado por la cátedra, donde se integran los contenidos trabajados, reforzando todos los conceptos y conocimientos incluidos en el programa de la materia.

Por sus características, la asignatura se dicta en constante articulación con los avances en materia de legislación vinculada a la eficiencia energética en la construcción. De esta manera, las y los estudiantes adquieren un conocimiento práctico de las normativas y regulaciones que deberán aplicar en su futura vida profesional.

En el año 2025 se decide abordar el trabajo final integrador utilizando como caso de estudio un Proyecto de Vivienda Pública para la localidad de Alcorta (Santa Fe, Argentina), correspondiente al programa nacional “Casa Propia”, ejecutado por la Secretaría de Hábitat, Urbanismo y Vivienda de la Provincia de Santa Fe, en el marco de una licitación realizada en el año 2022. Dicho programa tiene por objetivo generar soluciones habitacionales a través de distintas líneas que abarcan la construcción de viviendas nuevas, refacciones o ampliaciones para el mejoramiento de las condiciones de hábitat, vivienda e infraestructura básica o la provisión de equipamiento comunitario. Este proyecto, tuvo como ente ejecutor la Secretaría de Hábitat, Urbanismo y Vivienda de la Provincia de Santa Fe e implica la construcción de 20 viviendas.

La elección de este caso se fundamenta en un cambio en la normativa: hasta febrero de 2025 no se encontraba reglamentado el artículo de la Ley n.º 13903 sobre Etiquetado de Eficiencia Energética de Inmuebles Destinados a Vivienda, referido específicamente a las viviendas sociales. Esta situación cambia el 28 de febrero del mismo año, cuando se publica la reglamentación a través del Decreto n.º 0387/2025 donde el Capítulo VII, Artículo 16, establece lo siguiente: “CAPÍTULO VII – VIVIENDAS SOCIALES - ARTÍCULO 16: Todo proceso constructivo de viviendas impulsado por el gobierno provincial deberá proyectarse tomando en consideración clases de eficiencia energética mínima, siendo obligatorio para aquellas viviendas cuyo plazo de inicio de obra sea a partir del 1 de enero de 2026 revistan Clase de Eficiencia Energética D y, a partir del 1 de enero de 2027, Clase de Eficiencia Energética C. A tales fines, cada jurisdicción que impulse este tipo de procesos deberá contar con personal técnico capacitado para la verificación de la eficiencia energética proyectada, encontrándose facultados para auditar tales construcciones e impulsar el etiquetado de la vivienda relevada”. En este sentido, algunos autores referencian que es importante tener en cuenta las variables de diseño que más inciden en el valor del IPE. Por ejemplo: orientaciones, materialización de la envolvente, aberturas y sus características, además de terminación de superficies, artefactos de iluminación, sistemas de climatización y empleo de energías alternativas (solares y fotovoltaicas). Eso se evidencia en los valores de transmitancia térmica en cada una de las envolventes (Sanchez Amono, Maria Paz y Sulaiman, Halimi Cristina, 2024).

En este trabajo, se analizaron los prototipos de vivienda con el objetivo de generar propuestas de adecuación de las unidades habitacionales construidas por el Estado provincial a la nueva reglamentación para viviendas sociales de la Ley de Etiquetado de Viviendas. En aquellos casos en los que dichas construcciones no alcanzaban los niveles exigibles, Clase “D” para 2026 y “C” para 2027, se sugirió la identificación y el análisis de alternativas a través de la modificación de los sistemas constructivos y/o materiales empleados, con el objetivo de cumplir con el nuevo decreto reglamentario. A partir de estudios previos se ha evidenciado que la incorporación progresiva de variantes de mejora puede alcanzar incrementos de eficiencia de hasta un 83%, lo que representa un ahorro energético significativo (Puig, Sebastián; San Juan, Gustavo Alberto, 2013). El grado de detalle de la información que genera el uso del AEV brinda la posibilidad de identificar las situaciones de mayor incidencia en el requerimiento de energía, así como de visualizar el impacto de las posibles mejoras (o combinaciones de ellas) que eventualmente se propongan, en forma pormenorizada y con gran agilidad (dada la sistematización del procedimiento de cálculo que incorpora) (Alías, Herminia María, 2023).



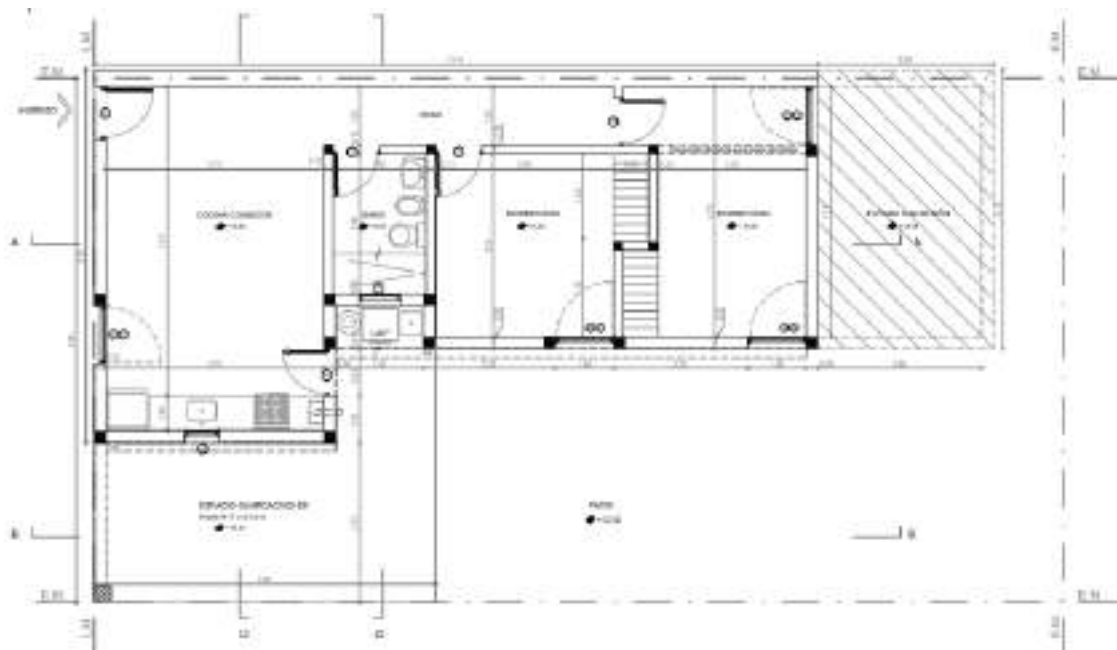


Figura 1: Planta Prototipo Alcorta. Fuente. Página Oficial provincia Santa Fe.

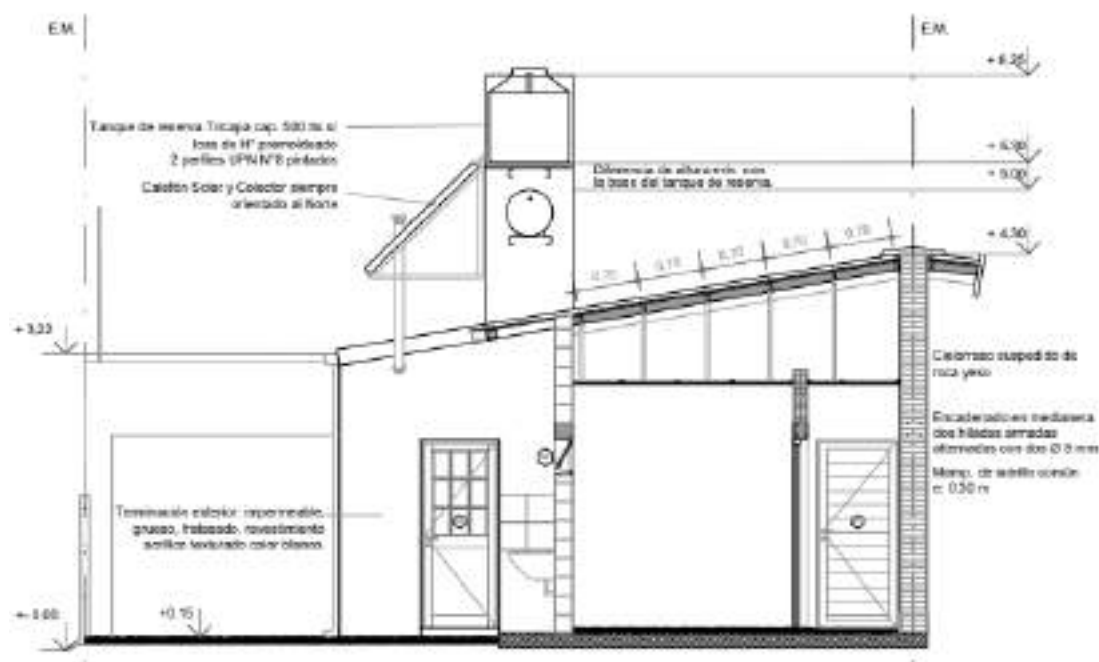


Figura 2: Corte Prototipo Alcorta. Fuente. Página Oficial provincia Santa Fe.

El material brindado a las y los estudiantes fue adquirido mediante la información de uso público que se encuentra en la página oficial de la Provincia de Santa Fe.

El trabajo fue desarrollado por siete equipos, conformados por tres a cuatro estudiantes cada uno. Cada grupo trabajó con dos unidades habitacionales pertenecientes al conjunto de viviendas, dispuestas en el terreno de forma apareada, tal como se observa en la Figura 3. Para su identificación, se asignó un nombre a cada unidad combinando el número de grupo y la orientación correspondiente. Por ejemplo: vivienda 1N y vivienda 1S.

Al finalizar, se realizó un análisis comparativo entre las distintas materialidades y orientaciones aplicadas a una misma tipología de vivienda. Además, se llevó a cabo una comparación general entre todas las unidades estudiadas por la clase en su conjunto.

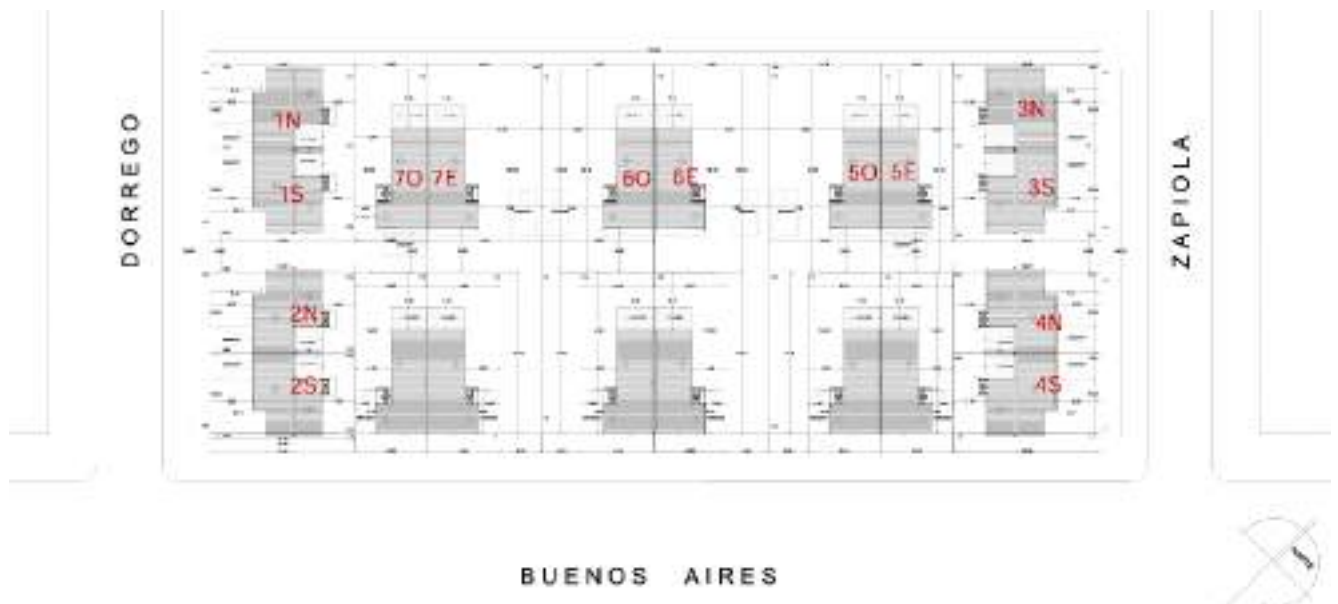


*Figura 3: Denominación unidades de Viviendas. Fuente. Material de la Cátedra.*

### **Ejercicio propuesto**

Para el análisis de las unidades de viviendas se dividió el ejercicio en diferentes etapas que se detallan a continuación:

*Etapla 0 - Materialidad original - Determinación de IPE:* Se analizó la vivienda según el Pliego de Especificaciones Técnicas (PET) y se determinó el Índice De Prestaciones Energéticas (IPE).

A partir del material provisto por la cátedra, cada grupo confeccionó un modelo en Revit (BIM) de las dos viviendas asignadas y realizó su estudio de asoleamiento (Figura 4). Posteriormente, se evaluó el desempeño energético de ambas unidades mediante el Programa Nacional de Etiquetado de Viviendas (PRONEV) a través del AEV para obtener el Índice de Prestaciones Energéticas (IPE). Todas las decisiones tomadas durante el desarrollo del trabajo fueron documentadas en los informes entregados. Como parte del análisis, se compararon los resultados de ambos prototipos, evaluando la influencia de la orientación en el desempeño energético en el IPE.



*Figura 4: Estudio Asoleamiento. Fuente. Estudiantes de la asignatura.*

*Modificación 1 - Modificación de pisos y cubiertas según Ordenanza n.º 8757 - Determinación de IPE:* En la segunda etapa se procedió a realizar modificaciones en los prototipos asignados en pisos y cubiertas, según los lineamientos establecidos por la cátedra.

Cubiertas: Se analizó su cumplimiento con la Ordenanza n.º 8757 “Aspectos Higrotérmicos y Eficiencia Energética de la ciudad de Rosario (si bien las unidades se encontraban en la localidad de Alcorta, se trabajó con la Ordenanza de Rosario como referencia para comparar los diferentes casos, considerando que ambas pertenecen a la misma zona bioclimática). En las unidades que no alcanzaron los valores requeridos, se mejoró la aislación térmica hasta cumplir con los niveles de transmitancia térmica establecidos por la normativa de Rosario. El trabajo se abordó de manera colectiva, acordándose entre todos los grupos la utilización de un mismo tipo y espesor de aislación térmica, con el objetivo de unificar criterios y facilitar la comparación de resultados.

Pisos: Se evaluó el comportamiento térmico de las superficies en contacto con el terreno conforme a los criterios establecidos por la Ordenanza n.º 8757. En aquellos casos en los que no se alcanzaban los valores exigibles, se incorporó aislación térmica hasta cumplir con los niveles requeridos de transmitancia térmica. Al igual que en el caso de las cubiertas, se acordó de forma conjunta entre todos los grupos la utilización de un mismo tipo y espesor de aislación para unificar criterios.

Con los datos obtenidos de pisos y cubiertas, modificados y acordados colectivamente, se calculó nuevamente el IPE. El criterio de unificar las soluciones constructivas en pisos y cubiertas respondió a la necesidad de focalizar el análisis comparativo en el comportamiento térmico del componente de mayor superficie de la envolvente: los muros exteriores y sus aberturas.

*Modificación 2 - Pisos y cubiertas según Ordenanza n.º 8757 + Nueva materialidad en muros exteriores de cada vivienda - Determinación de IPE:* En esta etapa, a las modificaciones realizadas en la Etapa 2 se sumó la asignación, por grupo, de distintas soluciones constructivas para los muros exteriores, que se detallan a continuación. Luego, se evaluó el desempeño de cada propuesta según los criterios establecidos por la Ordenanza n.º 8757, verificando que todas cumplieran con los requisitos exigibles. Los muros interiores se adaptan a la misma materialidad definida para los exteriores, garantizando coherencia en el sistema constructivo aplicado.

Soluciones constructivas de muros exteriores por grupo:

- Grupo 1: Ladrillo hueco portante 20/19/33 tipo “termoaislante”, con revoques tradicionales.
- Grupo 2: Ladrillo hueco de 18 cm (según pliego técnico), con 50 mm de lana de vidrio y placa de roca de yeso en el paramento interior.
- Grupo 3: Ladrillo de Hormigón Celular Curado por Autoclave (HCCA) de 20 cm con revoques tradicionales.
- Grupo 4: Panel Poliestireno Expandido (EPS) con malla electrosoldada (sistema tipo Cassaforma, M DUE, entre otros).
- Grupo 5: Ladrillo hueco de 18 cm (según pliego técnico), con 3 cm de revoque termoaislante aplicado en ambas caras.
- Grupo 6: Ladrillo hueco portante 20/19/33 tipo “termoaislante”, con 3 cm de revoque termoaislante en el exterior.
- Grupo 7: Ladrillo HCCA de 20 cm con 3 cm de revoque termoaislante en el exterior.

Para el próximo cuatrimestre la cátedra prevé unificar las soluciones constructivas de pisos y de la envolvente vertical (muros y aberturas), y modificar sólo las cubiertas con el objetivo de seguir explorando distintas configuraciones posibles y analizar su impacto en el desempeño energético considerando que la cubierta es uno de los elementos que posee mayor intercambio de energía (Puig, S. E., Alberini, R. S., & Eggel, A., 2021). Esta estrategia busca sostener un proceso de aprendizaje continuo y progresivo.

*Modificación 3: Ídem segunda modificación + Mejora de aberturas en envolvente - Determinación del Índice de Prestaciones Energéticas (IPE):* Con el objetivo de determinar el impacto de las mejoras en las aberturas, en la última versión del modelo se sustituyeron las aberturas especificadas en el pliego

(aluminio línea Herrero con vidrio simple de 4 mm) por aberturas de PVC línea Módena con DVH (4mm / 9mm / 4mm).

**Modificación 4: Ídem tercera modificación + Incorporación de colector solar - Determinación del Índice de Prestaciones Energéticas (IPE):** Si bien el enfoque principal del trabajo estuvo centrado en la evaluación de las características materiales de la envolvente a través del AEV —considerando únicamente los elementos constructivos pasivos—, en la etapa final se incorporó un sistema activo de calentamiento de agua sanitaria (colector solar), con el objetivo de analizar su impacto en el Índice de Prestaciones Energéticas (IPE). Esta instancia surgió como iniciativa de las y los estudiantes durante las clases taller, en el marco del trabajo colectivo. Por decisión de la cátedra, se resolvió incorporar dicha iniciativa al proceso como una oportunidad para ampliar el análisis energético y enriquecer el aprendizaje.

Se compararon los resultados de las diferentes etapas para evaluar el impacto de las modificaciones en la envolvente sobre el Índice de Prestaciones Energéticas (IPE), así como para determinar si las viviendas alcanzaban los niveles requeridos por las recientes modificaciones en la Ley de Etiquetado de Viviendas de la provincia de Santa Fe. Además, se llevó a cabo una comparación general entre todos los grupos y prototipos, mediante la elaboración colaborativa de una planilla comparativa con los valores obtenidos (Figura 5).

| ETAPA | GRUPO                                                                                     | 1                                                      |     | 2                                                               |     | 3                         |     | 4                                 |     | 5                                                            |     | 6                                                                     |     | 7                                      |     |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-----|-----------------------------------------------------------------|-----|---------------------------|-----|-----------------------------------|-----|--------------------------------------------------------------|-----|-----------------------------------------------------------------------|-----|----------------------------------------|-----|
|       | VIVIENDA                                                                                  | 1N                                                     | 1S  | 2N                                                              | 2S  | 3N                        | 3S  | 4N                                | 4S  | 5O                                                           | 5E  | 6O                                                                    | 6E  | 7O                                     | 7E  |
| 0     | ORIGINAL 0 - Según Pliego Especificaciones Técnicas                                       |                                                        |     |                                                                 |     |                           |     |                                   |     |                                                              |     |                                                                       |     |                                        |     |
|       | IPE ORIG. 0 (kWh/m2 por año)                                                              | 392                                                    | 387 | 356                                                             | 359 | 361                       | 364 | 338                               | 339 | 498                                                          | 498 | 511                                                                   | 474 | 409                                    | 384 |
|       | ETIQUETA ORIGINAL                                                                         | G                                                      | G   | G                                                               | G   | G                         | G   | G                                 | G   | G                                                            | G   | G                                                                     | G   | G                                      | G   |
| 1     | MATERIALIDAD MODIFICACION 1-Modificación de pisos y cubiertas según Ordenanza 8757        |                                                        |     |                                                                 |     |                           |     |                                   |     |                                                              |     |                                                                       |     |                                        |     |
|       | IPE MOD. 1 (kWh/m2 por año)                                                               | 353                                                    | 349 | 318                                                             | 321 | 318                       | 318 | 308                               | 309 | 433                                                          | 433 | 461                                                                   | 427 | 376                                    | 354 |
|       | ETIQUETA MODIFICADA 1                                                                     | G                                                      | G   | G                                                               | G   | G                         | G   | G                                 | G   | G                                                            | G   | G                                                                     | G   | G                                      | G   |
| 2     | MODIFICACION 2 - Pisos y Cubiertas según O. 8757 + Nueva Materialidad en muros exteriores |                                                        |     |                                                                 |     |                           |     |                                   |     |                                                              |     |                                                                       |     |                                        |     |
|       | MATERIALIDAD                                                                              | HUECO PORTANTE 20/19/33 TERMO-AISLANTE REVOQUE TRADIC. |     | HUECO PORTANTE S/PLIEGO + LANA VIDRIO (50 mm) + PLACA ROCA YESO |     | BCCA 20 + REVOQUE TRADIC. |     | PANEL EPS + MALLA ELECTRO-SOLDADA |     | HUECO PORTANTE S/PLIEGO + REVOQUE TERMO-AISLANTE (INT y EXT) |     | HUECO PORTANTE 20/19/33 TERMO-AISLANTE + REVOQUE TERMO-AISLANTE (EXT) |     | BCCA 20 + REVOQUE TERMO-AISLANTE (EXT) |     |
|       | IPE MOD. 2 (kWh/m2 por año)                                                               | 279                                                    | 267 | 197                                                             | 197 | 194                       | 191 | 224                               | 224 | 255                                                          | 255 | 265                                                                   | 240 | 246                                    | 225 |
|       | ETIQUETA MODIFICADA 2                                                                     | G                                                      | F   | E                                                               | E   | E                         | E   | F                                 | F   | F                                                            | F   | F                                                                     | F   | F                                      | F   |
| 3     | MODIFICACION 3 -Idem Modificación 2 + Mejora de Aberturas en envolvente                   |                                                        |     |                                                                 |     |                           |     |                                   |     |                                                              |     |                                                                       |     |                                        |     |
|       | IPE MOD. 3 (kWh/m2 por año)                                                               | 231                                                    | 221 | 174                                                             | 174 | 153                       | 151 | 194                               | 193 | 216                                                          | 216 | 210                                                                   | 172 | 191                                    | 172 |
|       | ETIQUETA MODIFICADA 3                                                                     | F                                                      | F   | E                                                               | E   | E                         | E   | E                                 | E   | F                                                            | F   | E                                                                     | E   | E                                      | E   |
| 4     | MODIFICACION 4 -Idem Modificación 3 + Incorporación de Colector Solar (energía renovable) |                                                        |     |                                                                 |     |                           |     |                                   |     |                                                              |     |                                                                       |     |                                        |     |
|       | IPE MOD. 4 (kWh/m2 por año)                                                               | 155                                                    | 145 | 157                                                             | 158 | 142                       | 140 | 121                               | 122 | 216                                                          | 216 | 198                                                                   | 172 | 172                                    | 153 |
|       | ETIQUETA MODIFICADA 4                                                                     | S                                                      | S   | E                                                               | E   | B                         | B   | B                                 | B   | F                                                            | F   | E                                                                     | E   | E                                      | E   |

Figura 5: Planilla general comparativa. Fuente. Cátedra Construcciones Bioclimáticas

## RESULTADOS

El uso de las normativas como herramientas de trabajo durante el dictado de la asignatura permitió acercar a los estudiantes a la Ordenanza n.º 8757 (normativa de carácter obligatorio en la ciudad de Rosario para obtener el permiso de construcción). Pudieron identificar los materiales en las planillas y establecer su correspondencia con los materiales disponibles en el mercado local. Respecto al uso del

AEV, lograron identificar aquellos elementos constructivos que inciden con mayor peso en la envolvente térmica y, por ende, en el requerimiento energético de la vivienda evaluada. Además, al estudiar las viviendas apareadas, se obtuvieron resultados concretos del impacto de la orientación en la calificación energética del IPE.

El trabajo permitió comprobar que la vivienda, como lo solicitaba el PET, no verificaba con las nuevas exigencias para vivienda social de la Ley de Etiquetado de Viviendas. Durante la iteración, al analizar diferentes espesores, materiales y sistemas constructivos, los estudiantes pudieron observar qué combinaciones ofrecían un mejor rendimiento térmico en los distintos elementos analizados y, en consecuencia, cuáles contribuyen en mayor medida a la eficiencia energética de la vivienda y al cumplimiento de las nuevas exigencias del Decreto Reglamentario. Además, lograron cuantificar ese nivel de mejora específica que implica la incorporación de determinados materiales y/o sistemas constructivos.

El desarrollo del trabajo en etapas progresivas puso en evidencia la importancia de evaluar el comportamiento de cada componente de la envolvente, comprendiendo que el desempeño energético de una vivienda no depende de un solo elemento, sino del conjunto de decisiones proyectuales que se toman a lo largo del diseño.

La metodología compartida en el trabajo en clases con los diferentes grupos de estudiantes, permitió la detección y corrección de errores en la carga de datos en el AEV, logrando un proceso de aprendizaje conjunto. La elaboración de una planilla grupal colaborativa posibilitó la revisión en plazos breves de un conjunto de alternativas constructivas con distintos niveles de incidencia en los requerimientos energéticos.

Se generó un material de consulta, destinado a estudiantes actuales y futuros, con el propósito de conformar progresivamente una base de datos de materiales y/o sistemas constructivos analizados. Este repositorio permitirá que los trabajos previos sirvan como punto de partida para continuar investigando alternativas constructivas orientadas a mejorar la eficiencia energética de las viviendas.

## CONCLUSIONES

Trabajar con una vivienda pública construida por el estado provincial interpeló a las y los estudiantes respecto a la importancia del rol profesional en la toma de decisiones constructivas, y en cómo dichas decisiones pueden contribuir a un uso más racional de la energía con las implicancias que ello conlleva: mejora de la calidad de las construcciones y el confort higrotérmico para los futuros usuarios, impacto positivo a nivel ambiental y menor gasto energético futuro para el estado.

La participación de profesionales e investigadores en áreas complementarias a la asignatura resultó enriquecedora para los estudiantes, al acercar problemáticas actuales y comprometiéndolos a dar soluciones reales con los recursos existentes en el mercado local.

Acercar las normativas vigentes, en conjunto con el trabajo en taller en equipos e interactuando con otros grupos, constituyó un recurso pedagógico valioso. Esto permitió que las y los estudiantes asumieran una actitud crítica y activa frente a la resolución del problema propuesto.

Se evidenció una sólida apropiación de las herramientas técnico-normativas, un aspecto necesario ante las modificaciones y nuevas exigencias de la Ley de Etiquetado de Viviendas. Se propone continuar esta línea de trabajo en los próximos cuatrimestres integrando nuevos prototipos y materiales, lo que permitirá a las y los estudiantes (futuros profesionales) analizar y optimizar las construcciones en forma integral para adaptarse a las nuevas realidades que se presentan en materia de eficiencia energética.

## REFERENCIAS

- Abalone, R., Stagnitta, R., Scarinci, C., Larregola, J. L., & Gastón, A. (2022). Propuesta de criterios de evaluación y alertas para el análisis del desempeño energético de viviendas a partir del Índice de Prestaciones Energéticas (IPE). *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente - AVERMA*, 25, 279–291. Recuperado de <https://portalderevistas.unsa.edu.ar/index.php/averma/article/view/2422> el 12 de agosto de 2025.
- Alías, H. M. (2023). Etiquetado de eficiencia energética de viviendas: Caso demostrativo de aplicación en Resistencia, Chaco. *Arquitectura y Diseño del Nordeste Argentino*, 11, 126–137. Universidad Nacional del Nordeste. Recuperado de <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/231981> el 12 de agosto de 2025.

- Casa Propia (2025). Programas y subprogramas de viviendas en toda la nación. Recuperado de <https://www.argentina.gob.ar/habitat/casapropia> el 12 de agosto de 2025.
- Decreto n.º 0387/2025 (2025). Provincia de Santa Fe. Recuperado de <https://www.santafe.gov.ar/normativa/item.php?id=292524&cod=27e844b9be88a6b3f8412f38cdfad35f> el 12 de agosto de 2025.
- Eficiencia energética Santa Fe (2025). Etiquetado de viviendas. Gobierno de Santa Fe. Recuperado de <https://www.santafe.gov.ar/ms/eficienciaenergetica/viviendas/etiquetado-de-viviendas> el 12 de agosto de 2025.
- Flores Larsen, S., & Filippín, C. (2020). Energy efficiency, thermal resilience, and health during extreme heat events in low-income housing in Argentina. *Energy and Buildings*, 231, 110576. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110576> el 12 de agosto de 2025.
- Kuchen, E., & Kozak, D. (2020). Transición energética argentina. El nuevo estándar de eficiencia energética en la evaluación de viviendas sociales. Caso de estudio: Vivienda en el Barrio Papa Francisco. *Hábitat Sustentable*, 10, 45–55. Recuperado de <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/141243> el 12 de agosto de 2025.
- Ley n.º 13903 (2019). Cap. I. Disposiciones generales. Art. 4: Índice de prestación energética. Recuperado de <https://www.santafe.gov.ar/normativa/getFile.php?id=1381640&item=213203&cod=74019c0f334b604c35007345bc9a904f> el 12 de agosto de 2025.
- Ley n.º 13903 (2019). Cap. VII. Viviendas sociales. Art. 16: Viviendas sociales. Recuperado de <https://www.santafe.gov.ar/normativa/getFile.php?id=1381640&item=213203&cod=74019c0f334b604c35007345bc9a904f> el 12 de agosto de 2025.
- Licitaciones (2025). Licitación pública CNP n.º 16/22: Construcción de 17 Viviendas - Prototipos VL 21 de 2 Dormitorios y VC 21 de 2 Dormitorios en la localidad de Alcorta – Dpto. Constitución – Programa Casa Propia – Construir Futuro. Gobierno de Santa Fe. Recuperado de <https://www.santafe.gov.ar/index.php/web/content/view/full/246195?e=0&p=1> el 12 de agosto de 2025.
- Mac Donnell, H., & Polzinetti, M. D. (2020). Manual de soluciones para viviendas energéticamente eficientes. Instituto de la Construcción en Seco. Recuperado de <https://icpa.org.ar/manual-de-soluciones-para-viviendas-energeticamente-eficientes> el 12 de agosto de 2025.
- Ordenanza n.º 8757/2011 (2011). Municipalidad de Rosario. Recuperado de <https://www.rosario.gob.ar/normativa/ver/visualExterna.do?accion=verNormativa&idNormativa=75004> el 12 de agosto de 2025.
- Programa Nacional de Etiquetado de Viviendas en Argentina (2025). Presentación y definición del Índice de Prestaciones Energéticas (IPE). Secretaría de Energía. Recuperado de <https://www.argentina.gob.ar/economia/energia/eficiencia-energetica/eficiencia-energetica-en-edificaciones/pronev-programa-nacional-de-etiquetado-de-viviendas> el 12 de agosto de 2025.
- Puig, S. E., Alberini, R. S., & Eggel, A. (2021). Viviendas sociales de la Ciudad de Santa Fe. Cómo mejorar su Etiqueta de Eficiencia Energética. Caso de estudio: Vivienda Universal. *Arquitecto*, 18, 115–123. Recuperado de <https://doi.org/10.30972/arq.0185675> el 12 de agosto de 2025.
- Puig, S., & San Juan, G. A. (2020). Intervención tecnológica en la vivienda social para maximizar la eficiencia energética, aplicando el índice de prestaciones energéticas (IPE). Caso de estudio: Vivienda Universal, Santa Fe, Argentina. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, 46, 1–13. Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente. Recuperado de <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/154665> el 12 de agosto de 2025.
- Saez, V. C., Quintana-Gallardo, A., Mendiguchía-Fontes, F. A., Garzón, B. S., & Guillén-Guillamón, I. (2024). The present and future of the use phase of social housing in Tucumán, Argentina: An LCA perspective. *Sustainability*, 16(12), 4958. Recuperado de <https://doi.org/10.3390/su16124958> el 12 de agosto de 2025.
- Sánchez Amono, M. P., & Sulaiman, H. C. (2024). Análisis comparativo mediante etiquetado energético de un proyecto de vivienda social bioclimático con su versión convencional en clima templado cálido. *Arquitectura, Urbanismo, Sustentabilidad*, 36, 46–54. Universidad Austral de Chile. Recuperado de <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/2561/29> el 12 de agosto de 2025.
- Secretaría de Energía (2025). Etiquetado de viviendas: Aplicativo informático. Ministerio de Economía de la Nación. Recuperado de <https://etiquetadoviviendas.mecon.gob.ar> el 12 de agosto de 2025.

**EXPERIENCE IN THE SUBJECT "BIOCLIMATIC CONSTRUCTIONS":  
TEACHING ENERGY EFFICIENCY REGULATIONS IN PUBLIC HOUSING  
PROJECTS IN THE PROVINCE OF SANTA FE. REGULATIONS OF DECREE  
N°0387/2025 FOR SOCIAL HOUSING**

**ABSTRACT:** This paper describes the teaching experience developed within the framework of the elective course "Bioclimatic Constructions" at the Faculty of Exact Sciences, Engineering and Surveying (FCEIA) of the National University of Rosario. The proposal integrates teaching and research through the analysis, design, and evaluation of construction solutions that incorporate criteria of sustainability, energy efficiency, and hygrothermal comfort. For the 2025 academic year, the final integrative project uses a public housing complex from the National Home Ownership Program in the town of Alcorta (Santa Fe, Argentina) as a case study. This is in the context of the recent regulation of Provincial Law n.º 13903 on housing labeling, which for the first time incorporates specific requirements for social housing. The experience included a phased approach, incorporating construction modifications and comparative evaluations using the National Housing Labeling Software Application (AEV). The project collaborated with research professionals from outside the course, enabling students to understand the impact of design decisions not only on energy performance but also on an urban scale. This fostered a critical approach to regulations and strengthened the role of construction professionals in promoting sustainable and resilient habitats.

**Keywords:** energy efficiency, housing labeling, social housing.



## NICHOS DE INNOVACIÓN Y GENERACIÓN DISTRIBUIDA CON ENERGÍAS RENOVABLES EN LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES

**Santiago Garrido<sup>1,2</sup>, Emilia Ruggeri<sup>1</sup>, María Fernández Vicente<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> Instituto de Estudios sobre la Ciencia y la Tecnología – Universidad Nacional de Quilmes  
(IESCT-UNQ-CICBA)

<sup>2</sup> Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)  
Roque Sáenz Peña 352 (B1876BXD) – Bernal  
+54 (11) 4365-7100 (Int. 5851) – [santiago.garrido@unq.edu.ar](mailto:santiago.garrido@unq.edu.ar)

**RESUMEN:** El desarrollo de sistemas de Generación Distribuida con Energías Renovables (GDER) se presenta como uno de los mecanismos más adecuados para impulsar procesos de transición energética hacia modelos sustentables en lo ambiental, económico y social. En Argentina, la mayor parte de las iniciativas para promover la GDER se han basado en esquemas de balance neto (*net metering* o *net billing*), que incentivan a los usuarios a invertir en equipos de generación. Sin embargo, estas políticas encuentran serias limitaciones derivadas de la inestabilidad macroeconómica, el escaso acceso al crédito y los elevados costos de instalación, lo que restringe la expansión de proyectos bajo este esquema. En este contexto, en la provincia de Buenos Aires se han desplegado experiencias alternativas que exploran modelos distintos al del usuario-generador individual, proponiendo formas innovadoras de financiamiento y gestión de la GDER. El objetivo de este trabajo es realizar una reconstrucción analítica crítica de dos casos implementados en la provincia: Programa Provincial de Incentivos a la Generación de Energía Distribuida (PROINGED) y el proyecto “Comunidad Solar I” de la Usina Popular de Tandil. Ambas experiencias constituyen nichos de innovación que permiten repensar los desafíos y potencialidades de la transición energética en Argentina.

**Palabras clave:** Generación distribuida, Energías renovables, Provincia de Buenos Aires, Nichos de innovación

### INTRODUCCIÓN

Actualmente, los desafíos ambientales que afectan a Argentina, requieren nuevas prácticas y conocimientos socio-técnicos que, debido a su complejidad, involucran para su resolución cambios estructurales. Estos cambios necesarios en términos de adaptación y mitigación al cambio climático generan, además, una disyuntiva frente a los desafíos económicos que enfrenta el país en términos de resolver los problemas de pobreza, desigualdades y exclusión social que se vienen sufriendo a través de crisis recurrentes en los últimos 50 años. Es por este motivo que en los últimos años se abrió un activo debate sobre cuáles deben ser las estrategias de transición a implementar que permitan responder a la crisis climática y al mismo tiempo resolver los problemas económicos y sociales vigentes. En particular, el sector energético enfrenta el reto de reducir su impacto ambiental sin perder competitividad, en un escenario donde las políticas públicas y las acciones desarrolladas por los actores sociales involucrados aún no logran articular soluciones escalables que integren innovación tecnológica, inclusión social y sostenibilidad. El desarrollo de sistemas de Generación Distribuida con Energías Renovables (GDER) es impulsado como uno de los mecanismos más adecuados para motorizar procesos de transición energética hacia modelos sustentables en términos ambientales, pero también a nivel económico y social.

En Argentina, se sancionó en 2017 la ley 27424 que reglamentó la posibilidad de implementar sistemas GDER. Sin embargo, varias provincias habían promovido normativas en este sentido, entre las que se



destacan Santa Fe, Salta, San Luis, Neuquén y Mendoza (Garrido, 2020). Todas estas iniciativas, incluyendo la ley nacional, promueven diferentes sistemas de balance neto (*net metering* o *net billing*), por lo que el principal beneficio que ofrecen a los usuarios residenciales es reducir el costo de su consumo eléctrico a través de la energía que generan y aportan al sistema. De esta manera, estas iniciativas se concentran en ofrecer incentivos económicos a los potenciales usuarios para que realicen las inversiones necesarias.

Esta última característica de las políticas de incentivos resulta ser un punto crítico para el crecimiento de la cantidad de proyectos de este estilo en Argentina, debido a la inestabilidad macroeconómica recurrente, sumado a la falta de condiciones de crédito adecuado y los altos costos de los equipos a instalar. Para superar estas limitaciones, se pueden considerar algunos modelos alternativos al del usuario-generador individual (Garrido, 2020; Chemes *et al.*, 2024) que proponen distintas formas de financiamiento y gestión de sistemas GDER.

El objetivo de este trabajo es realizar una reconstrucción analítica crítica de las diferentes políticas públicas implementadas en el país para desarrollo de sistemas GDER haciendo hincapié en dos experiencias alternativas desarrolladas en la provincia de Buenos Aires.

## ABORDAJE TEÓRICO

Las transiciones tecnológicas han sido estudiadas desde diversos enfoques dentro de los estudios de innovación y se entienden como transformaciones de gran escala orientadas a resolver problemáticas sociales —transporte, comunicación, vivienda o alimentación— (Geels, 2002). Aunque este marco abarca numerosos sectores, la mayor parte de la producción académica se ha focalizado en cuestiones relacionadas con la sustentabilidad.

Los enfoques socio-técnicos sobre las transiciones se consolidaron en la década de 1990, de la mano de la adopción del concepto de “desarrollo sostenible” por parte de la Comisión Mundial de Medio Ambiente y Desarrollo, lo que impulsó nuevas líneas de investigación (Lachman, 2013). Muchos de los investigadores que forjaron este campo participaron en proyectos dedicados a la resolución de problemas ambientales, provocando así un giro analítico: del interés por los productos o tecnologías “limpias” se pasó al estudio de sistemas sostenibles (Schot *et al.*, 1994; Unruh, 2000; Jacobsson y Johnson, 2000; Berkhout, 2002). La centralidad que adquirió el cambio climático, a su vez, dio pie a reflexiones sobre la necesidad de transformaciones estructurales profundas (Raven y Verbong, 2009).

Con este objetivo, buscando distinguirse de otro tipo de transiciones, se acuñó el concepto de “transición hacia la sustentabilidad” definido como un cambio (en términos de la co-construcción entre tecnologías, instituciones, organizaciones y subsistemas sociales y económicos) de los sistemas (y los criterios asociados para evaluar la idoneidad de los productos y servicios) hacia alternativas ambientales y sociales sostenibles que tienen una naturaleza orientada a fines u objetivos y, por lo tanto, pueden controlarse y dirigirse hasta cierto punto (Geels, 2011; Kemp and van Lente, 2011).

En sus comienzos, los estudios sobre transiciones se focalizaron en la descripción de transiciones socio-técnicas históricas, desde un nivel cognitivo, pero rápidamente reorientaron su interés hacia el nivel político-normativo, es decir, como insumo para pensar el diseño de políticas públicas (Geels y Schot, 2007). Es así como, por ejemplo, en los Países Bajos, propuestas analíticas como la “gestión estratégica de nichos” (Rip y Kemp, 1998; Geels y Raven, 2006) y la “gestión de las transiciones” (Loorbach y Rotmans, 2010) constituyen importantes referencias para el diseño de instituciones y políticas dedicadas a la planificación estatal (Elzen y Wieczorek, 2005).

Entre los principales trabajos desarrollados en el campo de las transiciones a la sustentabilidad, se destacan los estudios basados en la perspectiva multinivel (*Multi-level perspective*-MLP) que propone analizar los procesos de transición socio-técnica en tres niveles (nicho, régimen y paisaje, el término utilizado en inglés es *landscape*).

Los nichos dan cuenta de espacios protegidos en los que no operan las reglas convencionales de mercado y que, por lo tanto, permiten desarrollar y experimentar con innovaciones radicales (basadas, por ejemplo, en principios de sustentabilidad). Las condiciones de nicho se pueden generar a partir de políticas de incentivos, promocionales o incluso de CTI -ciencia, tecnología e innovación- orientadas al desarrollo de cierto tipo de tecnologías. Los nichos constituyen principalmente espacios de experimentación y aprendizaje, donde rigen reglas y prácticas diferentes a las dominantes en los regímenes socio-técnicos (Berkhout et al., 2004).

El régimen socio-técnico es el nivel clave para el análisis de los procesos de transición y se refiere al conjunto de reglas e instituciones (formales e informales), valores culturales, prácticas sociales y tecnologías que operan en un sistema determinado. En definitiva, son los regímenes los que se transforman para generar cambios sistémicos profundos que marquen una transición (por ejemplo pasar de un régimen dominado por el uso de hidrocarburos y concentrado a otro dominado por las energías renovables y distribuido). Este concepto permite superar las interpretaciones de transición entendidas como procesos de sustitución de una tecnología por otra (Geels, 2011).

El paisaje socio-técnico se refiere a los elementos de gran escala que pueden influir y afectar la dinámica de los regímenes (o incluso en los nichos), sobre los cuales los actores que participan en los procesos de cambio carecen de capacidad de gobernar. Algunos ejemplos de paisaje socio-técnico se pueden referir a fenómenos como el cambio climático o las repercusiones generadas por fenómenos como el accidente nuclear de Chernobyl, pero también a dinámicas como la caída de precios internacionales de tecnologías específicas como la fotovoltaica. Según cómo operen estos elementos, los regímenes y nichos pueden reaccionar preservando el orden vigente, adaptándose a nuevas condiciones o impulsando estrategias de transformación (Geels, 2011).

Los estudios realizados a partir del enfoque MLP entienden las transiciones como fruto de las interacciones entre estos tres niveles. En contraste con la mayoría de las explicaciones constructivistas del cambio tecnológico, los modelos multinivel tienen la ventaja de llamar la atención sobre los procesos a largo plazo y la dinámica de escalamiento. Entre los elementos clave que abordan los estudios sobre transiciones se encuentra la tensión entre la acumulación de capacidades cognitivas y su incorporación en el desarrollo tecnológico productivo (traducida en términos de relación entre nicho y régimen).

## **SISTEMAS GDER EN ARGENTINA**

A mediados del siglo XX se impuso el modelo energético predominante a nivel mundial basado en un sistema centralizado con grandes centrales de generación térmicas (alimentadas por carbón, derivados de petróleo y gas natural), plantas nucleares y grandes centrales hidroeléctricas. Desde la década de 1980, este modelo comenzó a sufrir fuertes críticas, proponiendo una nueva alternativa basada en unidades de generación más pequeñas, distribuidas y basadas en el uso de energías renovables (solar fotovoltaica, eólica, biomasa, pequeña hidroeléctrica) (Grubler, 2012; Sovacool, 2016). Esta nueva tendencia comenzó a consolidarse a comienzos del siglo XXI a través de sistemas de GDER conectadas a redes de media y baja tensión. El crecimiento del desarrollo de estos sistemas es explicado por la significativa caída de los precios de los equipos fotovoltaicos, la reducción de la incertidumbre sobre los efectos técnicos negativos que puede producir la inyección en las redes de baja tensión, y la consolidación de políticas de fomento concretas, impulsadas en diferentes países a nivel mundial (Facchini et al., 2011).

Aunque existen muchas definiciones, se puede afirmar que la generación eléctrica distribuida es la producción de electricidad cerca al punto de consumo, conectada a la red de distribución de media o baja tensión (Ackerman et al., 2001). En la mayoría de las políticas que promueven los sistemas GDER habilitan la posibilidad de que usuarios puedan generar electricidad con fuentes renovables conectadas directamente al punto de suministro de energía, inyectar excedentes a la red de baja o media tensión y obtener por ello distintos beneficios en función de la normativa vigente. A este usuario/generador se lo reconoce como “prosumidor”. Es así que muchos países generaron diferentes instrumentos basados en incentivos para los usuarios residenciales a través de dos sistemas bastante estandarizados: *net metering* y *net billing*.

En el sistema *net metering* los usuarios del sistema eléctrico pueden generar su propia energía y vender a la red sus excedentes al mismo precio al que la compran a la empresa distribuidora. De este modo, la compañía distribuidora de energía eléctrica descuenta la energía (kWh) aportada por cada usuario-generador de su factura. En el caso de *net billing*, la energía inyectada por un particular y la comprada a la distribuidora tienen precios diferentes. Puede ser que la empresa compre la energía generada por los usuarios a un precio mayor u otro menor. En los casos en que se incentiva la generación de usuarios particulares con un precio preferencial, el sistema se denomina *feed in tariff* (FIT) (Colmenar Santos *et al.*, 2015).

En Argentina, la incorporación de sistemas de GDER a escala residencial fue implementada originalmente en el marco de proyectos experimentales que buscaban poner a prueba la respuesta de las redes de distribución frente a la incorporación de diferentes puntos de generación variable como la ofrecida por los paneles fotovoltaicos. La mayoría de estas investigaciones fueron desarrolladas buscando emular experiencias de otros países, poniendo a prueba protocolos similares en las redes de distribución de baja tensión en Argentina (Facchini *et al.*, 2011; Durán *et al.*, 2014). Estos proyectos permitieron generar información y conocimientos sobre los aspectos técnicos asociados a la GDER y, a su vez, dar respuesta a distintas objeciones técnicas que planteaban diversos actores vinculados al sector eléctrico. Asimismo, hubo otra clase de proyectos que también buscaron generar nuevos conocimientos sobre la gestión de estos sistemas en los que los que se incorporan nuevos actores como los usuarios-generadores o “prosumidores”. Para los defensores e impulsores de este tipo de sistemas, la incorporación de los usuarios como generadores a los sistemas de distribución de energía eléctrica representa una oportunidad de democratización (Los Verdes, 2016).

En paralelo, se produjo un proceso de institucionalización a partir de diferentes normativas provinciales y nacionales. En 2013, la provincia de Santa Fe fue la primera en reglamentar este modelo de generación distribuida, dando lugar a las primeras experiencias de GDER conectada a la red bajo un esquema regulado. Posteriormente, Salta, San Luis, Neuquén y Mendoza avanzaron con marcos regulatorios provinciales entre 2014 y 2015, conformando una primera etapa de impulso a esta modalidad en el país. En 2017 se sancionó la Ley 27424, que estableció el Régimen de Generación Distribuida de Energías Renovables con alcance federal, permitiendo a usuarios residenciales, comerciales e industriales inyectar excedentes de energía renovable a la red con medidores bidireccionales y condiciones de remuneración específicas bajo un modelo *net metering*. Desde la entrada en vigencia de la ley nacional, las provincias se fueron adhiriendo a la norma de forma plena o parcial, junto con la inscripción de más de 300 distribuidoras y cooperativas en la plataforma nacional, con más de 2.000 prosumidores (Secretaría de Energía, 2025).

Esta corta trayectoria de GDER refleja la coexistencia de marcos normativos y la fragmentación institucional donde subsisten esquemas provinciales paralelos al régimen nacional y se observan diferencias en los niveles de implementación entre jurisdicciones.

Diversos especialistas identifican múltiples beneficios que pueden ofrecer los sistemas de GDER entre los que se destacan: la reducción de requerimientos de transporte de energía; la disminución pérdidas por transporte de energía, distribución y transformación; la regulación de la tensión (por ejemplo, en punta de línea); la reducción del uso de combustibles fósiles; la generación de empleo local; y el involucramiento de los usuarios en temas energéticos (Videla *et al.*, 2023). Sin embargo, algunos de estos autores reconocen ciertas limitaciones que presentan los modelos de balance neto ya que no contemplan ni retribuyen adecuadamente las externalidades positivas asociadas a la GDER, tales como la reducción de pérdidas en las redes eléctricas al acercar la generación al consumo, la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero y la generación de empleo local. Asimismo, destacan que estos modelos presentan limitaciones para promover la generación distribuida en contextos donde las tarifas eléctricas se encuentran subsidiadas, como ocurre en Argentina en algunos periodos, lo que restringe su efectividad como herramienta de incentivo a la transición energética (Videla *et al.*, 2023).

Otra limitación que pueden presentar estos sistemas está relacionada al sostenimiento de la infraestructura de distribución. Las diferencias entre las tarifas que pagan los prosumidores por la energía que compran y la que inyectan son blanco de debates sobre el pago del valor agregado de

distribución (VAD). La existencia de usuarios generadores en sistemas de GDER requiere una red eléctrica que se sostiene a través del pago del VAD por parte de todos los usuarios. En ese sentido, todos los usuarios del sistema eléctrico subsidian a quienes tienen los recursos económicos y las posibilidades técnicas de convertirse en prosumidores, incluyendo a usuarios que viven en edificios de departamentos o en propiedades que no cuentan con las condiciones de infraestructura para instalar un sistema fotovoltaico. De este modo, la posibilidad de incorporarse como generador en estos sistemas se reduce a quienes tienen la capacidad económica, y las condiciones edilicias, para afrontar la compra e instalación de estos equipos.

Hasta el momento, las expectativas generadas por las diferentes iniciativas impulsadas en el país no lograron alcanzar los resultados esperados (al menos en términos de capacidad instalada). Asimismo, las promesas que ofrecía la GDER como impulsora de sistemas eléctricos más democráticos e inclusivos tampoco fueron cumplidas.

Estas limitaciones no se reducen a nuestra realidad nacional exclusivamente, las limitaciones que presentan los sistemas GDER fueron identificados en otros países también. Es por esto que se impulsaron modelos alternativos a los presentados hasta el momento.

## **MODELOS DE GDER ALTERNATIVOS**

Los sistemas de GDER alternativos a los modelos basados en incentivos económicos, se pueden agrupar en 4 formas estilizadas: 1) Sistemas públicos municipales; 2) Sistemas de créditos PACE (*Property Assessed Clean Energy*); 3) Sistemas de cooperativas de generadores; y Sistemas con financiamiento de terceros (alquiler de techos).

La mayoría de los sistemas públicos municipales surgieron como una alternativa frente a la falta de interés de las empresas privadas de distribución eléctrica en implementar sistemas de GDER. Este fue el caso de varias ciudades de Estados Unidos, entre las que se destaca el caso de San Francisco en el cual el gobierno local intentó municipalizar el servicio eléctrico para impulsar una transición energética verde. Al no poder municipalizar el sistema completo, se avanzó en el desarrollo de sistemas de generación renovable públicos manteniendo el sistema de distribución en manos privadas (Hess, 2013).

Los sistemas de créditos PACE se basan en un modelo de financiamiento para adquirir e instalar sistemas de GDER (puede ser financiado por el estado o por un tercero). En este tipo de modelo, la propiedad de los sistemas es privada, de cada usuario (puede ser a través de consorcios) y el préstamo se puede establecer a través de un sistema de hipoteca o a través de un impuesto (en el caso de que el crédito lo brinde el estado). Uno de los desafíos que presenta este modelo es evitar que se convierta en un negocio financiero si se incorporan grandes bancos o instituciones crediticias (Coley y Hess, 2012).

El modelo cooperativo tiene una gran penetración en varios países de Europa como Dinamarca o Alemania, pero también hay experiencias en Estados Unidos. Los sistemas cooperativos pueden adquirir diferentes formas que van desde una sociedad entre varios usuarios que comparten una unidad de generación y se reparten sus beneficios, hasta una sociedad de asesoramiento técnico que se ocupa de facilitar trámites y costos de transacción a terceros (Bauwens et al., 2016; Hess, 2013).

Finalmente, el modelo de financiamiento de terceros es desarrollado por empresas o privados que instalan y administran sistemas de GDER en la propiedad de un tercero. En el caso de la energía fotovoltaica, funciona como un alquiler de techos. De este modo, una empresa puede contar con múltiples unidades de generación distribuidas en una ciudad logrando una potencia instalada importante, pero manteniendo los beneficios que se les suele otorgar a los pequeños generadores (Drury et al., 2012).

La mayoría de las experiencias desarrolladas bajo estos modelos tuvieron un alcance limitado y ocupan un espacio marginal entre los sistemas eléctricos en Europa y Estados Unidos. En muchos casos, estas experiencias fueron absorbidas por grandes empresas (sobre todo las desarrolladas a partir de sistemas de créditos o financiamiento de terceros). Los casos en que estos sistemas sobrevivieron lo hicieron como proyectos experimentales o demostrativos (Hess, 2013).

El principal problema que buscan resolver estos modelos es el del acceso al financiamiento. Este es justamente uno de los aspectos críticos que limitan la expansión de los sistemas de GDER en los países de América Latina, ya que los incentivos que ofrecen políticas aplicadas requieren una inversión previa. En el caso de Argentina, donde el acceso al crédito es complejo y de elevado costo, este problema se agrava. Por este motivo, resulta significativo identificar experiencias que propongan modelos que ofrezcan alternativas centradas en modelos de financiamiento alternativo.

**GENERACIÓN DISTRIBUIDA COMUNITARIA O COLABORATIVA EN ARGENTINA**

La identificación de estas dificultades de financiamiento para el desarrollo de sistemas GDER en Argentina motivó que diferentes provincias implementaran normativas para habilitar sistemas colaborativos o comunitarios (Tabla 1).

*Tabla 1: Normativas provinciales de generación distributiva o colaborativa*

| Provincia | Año  | Normativa     | Categoría       |
|-----------|------|---------------|-----------------|
| Mendoza   | 2018 | Ley 9084      | UG Colectivo    |
| Córdoba   | 2021 | Res. 1/2021   | GD Comunitaria  |
|           | 2024 | Res. 9/2024   |                 |
| Santa Fe  | 2021 | Res. 316/2021 | GD Colaborativa |
|           | 2024 | Ley 14259     |                 |
| Río Negro | 2022 | Ley 5617      | UG Colectivo    |

Fuente: Elaboración propia en base a Chemes et al., 2024.

Entre ellas, Córdoba habilitó la figura específica de Usuario Generador Comunitario (UGC) que permite que un grupo de usuarios acuerden instalar un parque de generación conjunto y compartir los beneficios generados. Estas comunidades energéticas se pueden establecer con un solo punto de generación compartida o varios puntos de suministro de energía que se asigna a diferentes puntos de demanda abastecidos por un mismo distribuidor. Hasta mediados de 2024, en la provincia de Córdoba se pusieron en marcha cerca de 10 comunidades energéticas (en su mayoría impulsadas por cooperativas eléctricas) (Chemes et al., 2024).

En el caso de la provincia de Santa Fe, desde el 2021 impulsó el desarrollo de comunidades energéticas a través del programa “ERA Energía Colaborativa” (a partir de la 316/2021), reemplazado finamente en 2024 por el programa PROSUMIDORES 4.0 a través de la Ley 14259. En ambos casos, se incorporó el requerimiento de medición inteligente estableciendo la figura de Usuario Generador Comunitario Virtual (UGCV) (Chemes et al., 2024).

Asimismo, en 2023 la Secretaría de Energía de Nación aprobó la Resolución 608/23 que reglamentó a nivel nacional generación distribuida comunitaria complementando la Ley 27424 y reconociendo los modelos UGC y UGCV propuestos por las normativas vigentes en Córdoba y Santa Fe.

Las experiencias de comunidades energéticas implementadas en Argentina proponen un modelo de GDER alternativo a los sistemas basados en usuarios generadores individuales. De este modo, permiten superar las limitaciones de financiamiento o de infraestructura para la implementación de sistemas residenciales. Por fuera de las normativas vigentes a nivel provincial y nacional, en la provincia de Buenos Aires surgieron otro tipo de experiencias que proponemos presentar a continuación.

**EXPERIENCIAS DE GDER EN LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES: PROGRAMA PROVINCIAL DE INCENTIVOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA DISTRIBUIDA (PROINGED)**

Como ya fue mencionado, las políticas GDER fueron impulsadas por diferentes provincias antes de que se aprobara una ley nacional. La mayoría de estas iniciativas proponían diferentes modelos de balance neto orientadas a la incorporación de usuarios-generadores a nivel residencial. El origen de estas medidas suele ubicarse en 2013 con la primera política provincial promovida por la provincia de Santa

Fe. Sin embargo, la primera política pública de impulso a la generación distribuida tuvo lugar en la provincia de Buenos Aires en 2009, que a diferencia de las mencionadas anteriormente no proponía implementar sistemas de GDER residenciales.

El Programa Provincial de Incentivos a la Generación de Energía Distribuida (PROINGED) es una iniciativa público-privada que surgió a partir de un convenio de cooperación entre el Ministerio de Infraestructura de la Provincia y el Foro Regional Eléctrico de la Provincia de Buenos Aires (FREBA), organismo que agrupa a las empresas distribuidoras provinciales y municipales de energía eléctrica de la provincia. El programa es financiado por el Fondo Subsidiario de Compensaciones Tarifarias (FCT) que se aplica a todos los usuarios del sistema eléctrico provincial y que se utiliza principalmente para obras de infraestructura. A partir de la creación del PROINGED, un porcentaje de esos recursos son asignados para el desarrollo de proyectos de generación distribuida y proyectos de investigación y desarrollo en eficiencia energética y generación renovable.

Desde su lanzamiento, el PROINGED ha diseñado, planificado e implementado diversos proyectos a partir de energías renovables. Dentro de ellos, se encuentran parques eólicos de baja escala e instalaciones solares térmicas y fotovoltaicas en edificios públicos, principalmente escuelas. No obstante, en donde se destaca el mayor desarrollo de proyectos es en lo referente a la generación distribuida a partir de energía solar fotovoltaica, a través del Plan de Generación Distribuida Solar. En el marco de este plan el PROINGED puso en marcha, a partir de 2014, parques solares a lo largo de la provincia de Buenos Aires, ubicados en regiones consideradas como sitios críticos de la red de distribución. Esta condición es asignada a localidades pequeñas que se encuentran en los límites de las redes de transmisión (extremos de línea) que sufren problemas de calidad del servicio eléctrico. En su mayoría, estos parques fueron instalados en las redes manejadas por pequeñas distribuidoras, en general cooperativas a las que se asignó la operación y el mantenimiento de los mismos.

Hasta el momento, el programa cuenta con 26 parques en operaciones con potencias que van de los 100 a los 500 kW y están distribuidos a lo largo de 20 partidos de la provincia con mayor incidencia en la región noroeste (Tabla 2).

*Tabla 2: Parques solares operativos del PROINGED*

| <b>Partido</b>      | <b>Localidad</b>    | <b>Año</b> | <b>Potencia instalada (kW)</b> |
|---------------------|---------------------|------------|--------------------------------|
| Adolfo Alsina       | Villa Maza          | 2019/2020  | 500                            |
| Bolívar             | Pirovano            | 2022       | 300                            |
| Brandsen            | Samborombón         | 2014       | 100                            |
| Chacabuco           | O'Higgins           | 2019/2020  | 400                            |
| Coronel Dorrego     | Oriente             | 2019/2020  | 300                            |
| Coronel Suárez      | Huangelén           | 2019/2020  | 300                            |
| Florentino Ameghino | Florentino Ameghino | 2019/2020  | 500                            |
| General Alvarado    | Mechongué           | 2022       | 300                            |
| General Arenales    | Arribeños           | 2016/2017  | 500                            |
| General Pinto       | Iriarte             | 2019/2020  | 300                            |
| General Villegas    | Villa Sauze         | 2019/2020  | 200                            |
| General Villegas    | Cañada Seca         | 2019/2020  | 500                            |
| Junín               | Agustina            | 2019/2020  | 200                            |
| Leandro N. Alem     | El Dorado           | 2019/2020  | 300                            |
| Lincoln             | El Triunfo          | 2016/2017  | 500                            |
| Lincoln             | Bayauca             | 2019/2020  | 400                            |
| Lincoln             | Martínez de Hoz     | 2019/2020  | 300                            |
| Nueve de Julio      | Facundo Quiroga     | 2019/2020  | 300                            |
| Olavarría           | Recalde             | 2016/2017  | 200                            |
| Olavarría           | Espigas             | 2016/2017  | 200                            |
| Puan                | Villa Iris          | 2019/2020  | 500                            |
| Saladillo           | Cazón               | 2022       | 330                            |



|              |                |           |              |
|--------------|----------------|-----------|--------------|
| Saladillo    | Del Carril     | 2024      | 500          |
| Saladillo    | Polvaredas     | 2024      | 250          |
| Salto        | Inés Indart    | 2016/2017 | 400          |
| Tandil       | Desvío Aguirre | 2019/2020 | 300          |
| <b>TOTAL</b> |                |           | <b>9.080</b> |

Fuente: Ministerio de Infraestructura y Servicios Públicos (2025).

A estos parques de generación solar con paneles fotovoltaicos, se debe sumar la incorporación de sistemas de acumulación con baterías de litio en los dos más recientes (Del Carril y Polvaredas en el partido de Saladillo). Además, se encuentran en proceso de licitación 5 parques solares nuevos (dos de ellos con acumulación) en las localidades de Pehuén-Có, Pipinas, Azul, San Cayetano y Alberti. De este modo se puede observar que el programa sigue creciendo y ampliando la capacidad instalada renovable con generación distribuida.

Aunque el propósito original del PROINGED estaba orientado a mejorar las condiciones de acceso al servicio eléctrico en zonas periféricas de la red de transmisión, en la medida en que se fueron ejecutando los diferentes proyectos se fue convirtiendo en una política activa para impulsar las energías renovables en la provincia. Por una parte, el programa se hizo cargo también de la licitación y puesta en marcha de sistemas aislados para escuelas en toda la provincia y de un sistema híbrido integral para abastecer de energía eléctrica a la Isla Martín García, incluyendo una nueva planta térmica, una planta fotovoltaica (Figura 1) y un sistema de acumulación.



*Figura 1: Planta solar fotovoltaica PROINGED en la Isla Martín García (PROINGED, 2025).*

Por otro lado, el programa incorporó a sus responsabilidades la promoción de actividades de investigación en eficiencia energética y energías renovables. Sobre este último punto, el PROINGED viene participando del financiamiento de proyectos de investigación a través de convocatorias específicas realizadas por la Comisión de Investigaciones Científicas de la provincia de Buenos Aires (CICPBA) y la construcción de un centro de investigaciones de referencia en el predio que la CICPBA tiene en la localidad de Gonnet, inaugurado en 2025.

El proceso de implementación del programa desde su creación presenta una articulación compleja de numerosos actores e instituciones en las diferentes etapas de su funcionamiento. Uno de los aspectos críticos es la operación y mantenimiento de los parques que queda a cargo de las distribuidoras locales que en su mayoría son pequeñas cooperativas. Esto resulta problemático debido a que, a priori, las mismas no cuentan con personal capacitado y recursos para dichas tareas. Además, a las dificultades que deben enfrentar cotidianamente este tipo de empresas, la responsabilidad de ocuparse de los nuevos parques solares puede convertirse en una carga, más que una solución. Frente a este escenario, el PROINGED incorporó a sus funciones la organización de jornadas de capacitación para la formación de los técnicos a cargo de las tareas de operación y mantenimiento. De este modo se busca garantizar el acceso a los conocimientos y las herramientas necesarias para optimizar el funcionamiento de las plantas.

El PROINGED es una experiencia que opera por fuera de las normativas implementadas en Argentina para promover sistemas de GDER. No se busca la incorporación de usuarios-generadores sino que propone la instalación de pequeños parques solares distribuidos a lo largo de la red eléctrica provincial. En materia de financiamiento, revierte la tendencia de los sistemas FIT ya que, aunque se financia con el aporte de todos los usuarios del sistema, el usufructo prioriza garantizar la calidad del servicio eléctrico de usuarios perjudicados por su ubicación geográfica. Pero, además, propone que los usuarios del sistema eléctrico conectado subsidien a quienes no tienen acceso a la red a través de los sistemas de aislados instalados en escuelas o en la Isla Martín García.

La principal limitación que presenta este programa en relación a las políticas que promueven sistemas de GDER basados en usuarios-generadores son los escasos espacios de participación que ofrecen. En los últimos años, en la provincia de Buenos Aires han surgido algunas alternativas en este sentido.

### **EXPERIENCIAS DE GDER EN LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES: “COMUNIDADES SOLARES I” DE LA USINA POPULAR DE TANDIL**

La Usina Popular y Municipal de Tandil (UPT) es una sociedad de economía mixta, cuyo objetivo es la distribución de energía eléctrica en la localidad de Tandil. Fue fundada en 1934 por un grupo de vecinos de la localidad buscando garantizar el acceso a la energía eléctrica. La empresa comenzó sus actividades en 1936 con la instalación y puesta en marcha de un grupo electrógeno de 625 kW que abastecían a 2449 clientes. En 1974 la empresa se convirtió en una empresa de capitales mixtos con un 60 % de su paquete accionario en manos de la municipalidad de Tandil y un 40 % de capitales privados. De acuerdo al nuevo estatuto, el presidente de la empresa es nombrado por el municipio (Flensburg et al., 2023; Usina Popular y Municipal de Tandil, 2025)

Con el tiempo, la empresa incorporó nuevas funciones a partir de una subsidiaria denominada USICOM, sociedad anónima cuyo capital accionario pertenece en un 100 % a la UPT. Desde USICOM se impulsan diferentes unidades de negocios que brindan servicios de emergencias médicas, obras de infraestructura urbana (viales, redes de cloacas, agua corriente y gas), gestión del relleno sanitario municipal y fibra óptica. Además, también se creó una unidad de negocios orientada al diseño e instalación de sistemas fotovoltaicos, USICOM Energías Renovables.

Esta unidad de negocios ofrece servicios para toda clase de proyectos a nivel residencial, comercial o productivo, ya sea en sistemas aislados o conectados a la red. Aunque su principal campo de acción se concentra en el área de concesión de la UPT (Tandil y alrededores), USICOM Energías Renovables ha participado en licitaciones para instalaciones en toda la provincia de Buenos Aires, entre las que se destacan las realizadas en el marco del PROINGED.

Fue justamente a través de USICOM Energías Renovables que la UPT impulsó en 2020 el proyecto GDER “Comunidades Solares I”. El mismo se trató de un proyecto asociativo en el que la UPT ofreció a usuarios interesados sumarse como socios e inversores del proyecto, comprando energía solar fotovoltaica anticipada y evitando cargos de mantenimiento, operación de los paneles y riesgos de roturas si la instalación fuese individual.

En el proyecto los socios podía adquirir módulos por el valor de U\$S 1.000 al tipo de cambio oficial del Banco Nación y con ese aporte se garantizaban 10 años de 190 kWh por mes, acreditados en la factura de energía al precio estacional que fija la Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico (CAMMESA) (Usina Popular y Municipal de Tandil, 2025). Los socios debían ser usuarios de la UPT y podían sumar varios módulos siempre que el porcentaje de generación adquirido no superara el 100 % de su consumo de energía promedio del último año. Además, los adquirentes podían realizar la transferencia de los beneficios a otro usuario que cumplieran los requerimientos antes mencionados. Finalmente, en junio de 2021 se inauguró la planta fotovoltaica de 67 kW en un predio de la UPT con planes de ampliarla con nuevos proyectos de similares características (Figura 2).



*Figura 2: Planta solar fotovoltaica del proyecto Comunidades Solares I, de la Usina Popular y Municipal de Tandil. Imagen propia.*

En esta primera etapa, el proyecto sumó como socios a usuarios particulares, empresas e instituciones públicas como la Universidad del Centro de la Provincia de Buenos Aires. A diferencia de los modelos de prosumidores convencionales, los socios pueden sumarse como beneficiarios de un sistema de GDER a menor costo, a la vez que evitan cualquier eventualidad asociada a la operación y mantenimiento. Además, habilita la participación de usuarios que no cuentan con las condiciones edilicias adecuadas para instalar un sistema fotovoltaico en su casa, incluyendo también a inquilinos. Incluso, si se produjera algún desperfecto o si la generación no fuera la suficiente para cubrir los 190 kWh contratados por todos los socios, los costos los debe asumir la UPT.

## CONCLUSIONES

El desarrollo de sistemas de GDER es presentado en la actualidad como un medio poderoso para consolidar un proceso de transición hacia un sistema sustentable y democrático de generación y distribución de la energía eléctrica. Sin embargo, las contradicciones que muestran las implementaciones de algunas experiencias de GDER en Argentina permiten observar que no siempre estos modelos garantizan ese tipo de transición.

En este sentido, se puede observar que las políticas e instrumentos implementados en Argentina se centran en diferentes variantes de sistemas de balance neto que presentan limitaciones en su aplicación. La principal debilidad que presentan estos modelos se vincula a los mecanismos de financiamiento. De este modo, se generan nuevos procesos de exclusión entre quienes tienen acceso al crédito y quiénes no. En ese marco, en este trabajo se destacaron dos iniciativas implementadas en la provincia de Buenos Aires. Tanto el PROINGED como las “Comunidades Solares I” de Tandil se ofrecen como alternativas que pueden superar estas limitaciones.

Para pensar los problemas y desafíos que enfrentan estos sistemas resulta valioso el aporte de los estudios sobre transiciones a la sustentabilidad. Sobre todo el de la perspectiva multinivel, y los estudios de las condiciones de nicho. En general, los trabajos desarrollados desde esta perspectiva identifican como nichos sustentables como espacios protegidos en los que las reglas de juego son diferentes a las vigentes en el régimen socio-técnico (en términos de rentabilidad, eficiencia, performance) lo que favorece procesos de experimentación y aprendizaje. En este sentido, las experiencias presentadas en este trabajo pueden ser comprendidos como nichos de innovación en los que se busca experimentar con

alternativas al sistema energético vigente para promover procesos de transición hacia regímenes socio-técnicos más sustentables.

## REFERENCIAS

- Ackermann, T., Andersson, G., & Söder, L. (2001). Distributed generation: A definition. *Electric Power Systems Research*, 57(3), 195-204.
- Bauwens, T.; Gotchev, B. y Holstenkamp, L. (2016). What drives the development of community energy in Europe? The case of wind power cooperatives, *Energy Research & Social Science*, 13: 136-147.
- Berkhout, F. (2002). Technological regimes, path dependency and the environment. *Global environmental change*, 12(1), 1-4.
- Berkhout, F.; Smith, A. y Stirling, A. (2004). Socio-technological Regimes and Transition Contexts. En B. Elzen, F. Geels & K. Green (Eds.): *System Innovation and the Transition to Sustainability*: Edward Elgar Publishing.
- Chemes, J., Garrido, S., Aguiar, D. y Rullo, P. (2024). Comunidades energéticas en Argentina. *Avances en Energías Renovable y Medio Ambiente*, 28, 369-380. <https://portalderevistas.unsa.edu.ar/index.php/averma/article/view/4897>
- Coley, J. y Hess, D. (2012). Green energy laws and republican legislators in the United States, *Energy Policy*, 18 (1): 576-583.
- Colmenar Santos, A.; Borge Diez, D.; Collado Fernandez, E. y Castro Gil, M. A. (2015). *Generación distribuida, autoconsumo y redes inteligentes*. Madrid: UNED.
- Drury, E.; Miller, M.; McCall, C.; Graziano, D.; Heimiller, D.; Ozik, D.; Perry, T. (2012). The transformation of southern California's residential photovoltaics market through third-party ownership, *Energy Policy*, 42: 681-690.
- Durán, J.; Socolovsky, H.; Raggio, D.; Godfrin, E.; Jakimczyk, J.; Martínez Bogado, M.; Diaz, J.; Castro, N.; Pedro, G.; Sepúlveda, O.; Argañaraz, C.; Benítez, E.; Roldán, A. y Righini, R. (2014). Proyecto IRESUD: interconexión de sistemas fotovoltaicos a la red eléctrica en ambientes urbanos estado de avance a julio de 2014 y primeras mediciones en sistemas piloto, *Avances en Energías Renovables y Ambiente Vol. 18*: 457-467.
- Elzen, B. y Wieczorek, A.J. (2005). Transitions towards sustainability through system innovation. *Technological Forecasting and Social Change* 72 (6), 651–662.
- Facchini, M.; Doña, V.; Pontoriero, D.; Morán, F. y Gómez, W. (2011). Instalación piloto de inserción de energía solar fotovoltaica conectada a red con generación distribuida en el sector residencial de la Provincia de San Juan, Cuarto Congreso Nacional - Tercer Congreso Iberoamericano: Hidrogeno y Fuentes Sustentables de Energía, HYFUSEN 2011. Recuperado el 4 de octubre de 2018 de [http://www.cab.cnea.gov.ar/ieds/images/2011/hyfusen\\_2011/trabajos/18-128.pdf](http://www.cab.cnea.gov.ar/ieds/images/2011/hyfusen_2011/trabajos/18-128.pdf)
- Flensburg, K. I., Nogar, M. L., Clementi, L. V., Caballero, G., Jacinto, G. P., & Villalba, M. S. (2023). En transición hacia las energías renovables: El caso de Tandil (Provincia de Buenos Aires, Argentina). <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/232611>
- Garrido, S. 2020. Potencialidades y limitaciones de los procesos de transición energética. La implementación de sistemas de Generación Distribuida con Energías Renovables (GDER) en Argentina. En Mombello, Laura y Spivak L'Hoste, Ana (Comp.) *Bienes de la naturaleza, sectores de interés y conocimientos en tensión. Aportes al debate ambiental desde las ciencias sociales* (pp. 253-278). Buenos Aires: Teseo. ISBN: 978-987-86-5724-0.
- Geels, F. W. 2011. The multi-level perspective on sustainability transitions: Responses to seven criticisms. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 1(1). p. , 24-40. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2011.02.002>.
- Geels, F. y Raven, R. (2006). Non-linearity and expectations in niche-development trajectories. Ups and downs in Dutch biogas development (1973–2003), *Technology Analysis & Strategic Management*, 18 (3-4): 375–392.
- Geels, F. y Schot, J. (2007). Typology of sociotechnical transition pathways, *Research Policy*, 36(3): 399–417.
- Grubler, A. (2012). *Grand Designs: Historical Patterns and Future Scenarios of Energy Technological Change*. Historical Case Studies of Energy Technology Innovation, en Grubler A., Aguayo, F., Gallagher, K.S., Hekkert, M., Jiang, K., Mytelka, L., Neij, L., Nemet, G. & C. Wilson, *The Global Energy Assessment*, Cambridge University Press: Cambridge.

- Hess, D. (2013). Industrial fields and countervailing power: The transformation of Distributed Solar Energy in United States, *Global Environmental Change*, 23(5): 847-855.
- Jacobsson, S., y Johnson, A. (2000). The diffusion of renewable energy technology: an analytical framework and key issues for research. *Energy policy*, 28(9), 625-640.
- Kemp, R., y van Lente, H. (2011). The dual challenge of sustainability transitions. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 1(1), 121-124.
- Lachman, D. A. (2013). A survey and review of approaches to study transitions. *Energy Policy*, 58, 269-276.
- Los Verdes (2014). Generación eléctrica distribuida en Argentina. Energía Limpia desde sus propios usuarios. Recuperado el 10 de julio de 2017 de <http://www.losverdes.org.ar/wp-content/uploads/2016/11/LOS-VERDES-DOCUMENTO-ENERGIA-FINAL-FINAL.pdf>
- Loorbach, D. (2010). Transition management for sustainable development. A prescriptive, complexity based governance framework, *Governance* 23 (1): 161–183.
- Ministerio de Infraestructura y Servicios Públicos de la provincia de Buenos Aires (2025). Portal energético de la provincia de Buenos Aires. <https://www.minfra.gba.gob.ar/peba/>
- Nogar, M. L., Clementi, L. V. y Jacinto, G. P. (2024). Experiencias innovadoras para la transición energética. El caso de Tandil, Argentina. *Boletín de estudios geográficos* 121. ISSN 0374-6186 | E-ISSN: 2525-1813.
- PROINGED (2025). Sitio oficial. <https://www.proinged.org.ar>
- Raven, R. y Verbong, G. (2007). Multi-Regime Interactions in the Dutch Energy Sector. The Case of Combined Heat and Power Technologies in the Netherlands 1970–2000. In *Technology Analysis & Strategic Management* 19 (4), pp. 491–507. DOI: 10.1080/09537320701403441.
- Rip, A. y Kemp, R. (1998). Technological change, en S. Rayner, E. L. Malone (Eds.): *Human Choice and Climate Change*, Columbus: Battelle Press (2): 327–399.
- Schot, J., Hoogma, R., y Elzen, B. (1994). Strategies for shifting technological systems: the case of the automobile system. *Futures*, 26(10), 1060-1076.
- Secretaría de Energía. 2025. Generación distribuida en Argentina. Reporte anual 2024.
- Sovacool, B. K. (2016). The history and politics of energy transitions: Comparing contested views and finding common ground, WIDER Working Paper, No. 2016/81, ISBN 978-92-9256-124-6, The United Nations University World Institute for Development Economics Research (UNU-WIDER), Helsinki. <http://dx.doi.org/10.35188/UNU-WIDER/2016/124-6>
- Unruh, Gregory C. (2000). Understanding carbon lock-in. In *Energy Policy* 28 (12), pp. 817–830. DOI: 10.1016/S0301-4215(00)00070-7.
- Usina Popular y Municipal de Tandil (2025). Página web. <https://www.usinatandil.com.ar/>
- Videla, M., Krautner, A., Eyras, I., Durán, J., y Plá, J. (2023). Estado actual del desarrollo de la generación fotovoltaica distribuida en Argentina. *Ciencia e Investigación*, 73(1).

## **INNOVATION NICHEs AND DISTRIBUTED GENERATION WITH RENEWABLE ENERGIES IN THE PROVINCE OF BUENOS AIRES**

**ABSTRACT:** The development of Distributed Generation with Renewable Energy (DGRE) systems stands out as one of the most suitable mechanisms to drive energy transition processes toward environmentally, economically, and socially sustainable models. In Argentina, most initiatives to promote DGRE are based on net metering or net billing schemes, which encourage users to invest in generation equipment. However, these policies face serious limitations arising from macroeconomic instability, limited access to credit, and high installation costs, which restrict the expansion of projects under this scheme. In this context, some alternative experiences deployed in the province of Buenos Aires explore models beyond the individual prosumer, proposing innovative forms of financing and management for DGRE. The aim of this paper is to carry out a critical analytical reconstruction of two cases implemented in the province: the Programa Provincial de Incentivos a la Generación de Energía Distribuida (PROINGED) and the “Comunidades Solares I” project of the Usina Popular y Municipal of Tandil. Both experiences constitute innovation niches that make it possible to rethink the challenges and potential of the energy transition in Argentina.

**Keywords:** Distributed generation, Renewable energy, Buenos Aires, Innovation niches

## APROXIMACIÓN ESPACIAL DE LA VULNERABILIDAD ENERGÉTICA EN LAS PRINCIPALES METRÓPOLIS ARGENTINAS

**Mauro Montone<sup>1</sup>, Rodrigo J. Durán<sup>1,2</sup>, Miguel A. Condori<sup>1,2</sup>, Danae A. Franco Lopera<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Av. Bolivia 5150, Salta, Argentina, 4400.

<sup>2</sup>Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de Salta (UNSa).

Tel. 0387-4516592 e-mail: [mauromontone@hotmail.com](mailto:mauromontone@hotmail.com)

**RESUMEN:** En el presente trabajo se lleva a cabo la estimación de un indicador de vulnerabilidad energética para Argentina utilizando variables censales y, a partir de su desagregación en unidades geográficas de radios censales, se realiza un análisis de su comportamiento espacial para las principales áreas metropolitanas del país. Como resultados se obtiene una incidencia general del indicador para todo el país del 12,01%, mientras que filtrando por área urbano o rural la incidencia es de un 10,46% para el primer caso y de 34,20% para el segundo, aunque en términos absolutos la cantidad de hogares incluidos en el espacio urbano resulta significativamente mayor. Para el análisis espacial se consideraron los 9 aglomerados urbanos con más de 500 mil habitantes para evaluar el grado de autocorrelación espacial. Los resultados arrojan que para todos los aglomerados urbanos el índice de autocorrelación espacial global es positivo y moderado, destacando el caso de Gran Buenos Aires que presenta el valor más elevado. En todos los casos los patrones espaciales se explican por el agrupamiento de radios censales con baja incidencia de vulnerabilidad energética. Los aglomerados explorados mediante técnicas gráficas denotan una dinámica centro-periferia.

**Palabras clave:** vulnerabilidad energética, pobreza energética, aglomerado urbano, autocorrelación espacial

## INTRODUCCIÓN

La definición de estrategias y políticas orientadas a la sustentabilidad energética ocupa un lugar prioritario en la agenda de organismos internacionales, instituciones multilaterales de financiamiento y gobiernos locales. En este escenario global, se vienen incorporando desafíos como la transición energética justa (Montañés et al., 2023; Tirado Herrero et al., 2019), las brechas de acceso y calidad (Bradbrook et al., 2008), la seguridad de los suministros (Urquiza y Billi, 2020), los conceptos interrelacionados de pobreza y vulnerabilidad energética (Bouzarovski et al., 2014; González-Eguino, 2015), entre otros. La literatura científica viene discutiendo cada vez más conceptualizaciones y métricas en las que se operacionalizan las múltiples dimensiones de estas problemáticas.

Implementar los principios de la sustentabilidad en el sector energético en el contexto regional de América Latina y el Caribe (ALyC) resulta una tarea especialmente compleja. La necesidad de llevar a cabo acciones concretas en esta dirección ha quedado establecida en diversos documentos (IEA, 2016; Kozulj, 2009; Naciones Unidas, 2012; Practical Action, 2010), aunque dejando en claro que debe priorizarse la dimensión social de los usos de la energía (Brand-Correa y Steinberger, 2017; García Ochoa, 2011). Esto por cuanto los países que integran la región presentan persistentes problemas de desarrollo: bajo crecimiento, inestabilidad política y macroeconómica, baja productividad, informalidad laboral, altos niveles de desigualdad socioeconómica (Gasparini et al., 2012). En lo que respecta al ámbito energético, pese a que en general el nivel de acceso es cercano al universal, existen brechas de acceso y especialmente de calidad a servicios y suministros (Álvarez et al., 2024; Burguillo et al., 2022;



Urquiza et al., 2019), una distribución inequitativa de las cargas económicas que los hogares afrontan por los servicios (asociado a la asignación de subsidios energéticos) (Durán, 2018; Zabaloy et al., 2023), deficiencias de vivienda (baja calidad constructiva y de los materiales) que derivan en bajo confort térmico y problemas de salud (García Ochoa et al., 2022; Ibañez Martín et al., 2019; Soares et al., 2023). Este último punto es relevante cuando se advierte la gran extensión territorial de los países de la región que se traduce en una variabilidad climática que presenta prácticamente todos los tipos de clima en una sola región (García Ochoa, 2014). De ahí que la línea de investigación en pobreza energética sea relevante para la definición de políticas y estrategias sustentables en el continente.

Pese al creciente reconocimiento a nivel global, la evidencia empírica sobre pobreza energética en ALyC, y específicamente en Argentina, es relativamente escasa en relación a otras regiones en desarrollo (Pérez-Fargallo et al., 2023). Las principales limitaciones incluyen la falta de adecuación estadísticas coherentes dentro y entre países, la necesidad de captar la dimensión espacial de los indicadores dada la heterogeneidad territorial. Investigaciones previas sobre el caso argentino, incentivadas en gran medida por las modificaciones en el régimen de subsidios a los servicios de electricidad y gas (Durán y Condorí, 2019; Poggiese, 2023; Puig, 2023), dan cuenta de que los hogares en situación de pobreza energética enfrentan conjuntamente privaciones materiales múltiples: empleo precario, bajo nivel educativo, viviendas inadecuadas y déficit de infraestructura de servicios.

El presente trabajo propone el desarrollo de un indicador de vulnerabilidad energética (IVE) para Argentina a partir de variables censales, analizando su distribución espacial en las principales áreas metropolitanas a nivel de radio censal. La relevancia del aporte se fundamenta en tres aspectos. En primer lugar, la perspectiva de vulnerabilidad permite diferenciar entre la pobreza energética como un estado que experimentan los hogares en un momento determinado respecto del conjunto de condiciones que conducen a esta circunstancia (Bouzarovski y Petrova, 2015). Se ha aprovechado la capacidad de los datos censales de dar cuenta de factores estructurales que influyen en las privaciones energéticas, utilizados en otros estudios de vulnerabilidad (Armaş y Gavriş, 2016; Desvallees, 2021; Duran y Condorí, 2021). En segundo lugar, el análisis de patrones espaciales con herramientas geoinformáticas de alta granularidad constituye una innovación metodológica en la literatura de pobreza y vulnerabilidad energética (Bouzarovski et al., 2025; Robinson et al., 2019). Por último, el énfasis en áreas metropolitanas responde a que más de la mitad de la población argentina se concentra en grandes aglomerados urbanos, cuya compacidad permite análisis detallados del comportamiento espacial de variables e indicadores.

## **METODOLOGÍA**

### ***Fuentes de datos y método para la construcción del indicador***

Para la realización del IVE se ha empleado la edición 2022 del Censo Nacional de Personas, Hogares y Viviendas (CNPHV) realizado por el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INDEC), cuya base de microdatos ha sido liberada para su descarga en abril de 2025 en su portal. Dicha base se encuentra estructurada en formato REDATAM (Recuperación de Datos para Áreas pequeñas por Microcomputador), un paquete estadístico creado por el Centro Latinoamericano y Caribeño de Demografía (CELADE) perteneciente a la CEPAL, convertido en los últimos 30 años en un estándar “de hecho” para el procesamiento de datos censales de varios países de la región además de Argentina como por ejemplo Chile, Brasil, Perú, México, entre otros.

Para la definición del indicador se empleó el software Red X Process a partir de la función de creación de comandos utilizando las cláusulas para la creación de variables nuevas a partir de las existentes en la base mediante filtros, operadores lógicos y conteos de casos para agregar variables a entidades de mayor jerarquía. Como es propio de los lenguajes de bases de datos relacionales, las variables en REDATAM están imputadas en distintas entidades estructuradas jerárquicamente. Las siete entidades que vienen trabajándose de manera estable en las últimas ediciones de censos de Argentina son: provincia, departamento, fracción censal, radio censal, vivienda, hogar y persona.

El indicador propuesto se compone a partir de la elaboración de una matriz condicional que da cuenta de las diferentes dimensiones estructurales en las que se manifiesta la pobreza y vulnerabilidad



energética que atraviesan los hogares y que son reconocidas en la literatura como pertinentes para el análisis de esta problemática en el contexto de países en desarrollo. En la Tabla 1 se describen las variables utilizadas para cada una de las dimensiones del indicador.

*Tabla 1. Dimensiones y variables del IVE*

| <b>Dimensión</b>                                                | <b>Variable censal</b>                                                                                                                                                                                                                                          | <b>Cláusula condicional</b>                                                                                                                                                                                                                                                    | <b>Referencia</b>                                                           |
|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| Vivienda térmicamente ineficiente (VTI).                        | “Material predominante de los pisos” (cod. H10).<br>“Material predominante de la cubierta exterior del techo” (cod.H11).                                                                                                                                        | El hogar presenta alguna de las siguientes condiciones:<br>Piso de tierra, ladrillo suelto, u otro material sin terminación.<br>Techo de chapa sin cielorraso.<br>Techo de chapa de cartón, barro u otro material de baja calidad; con o sin cielorraso.                       | (Buzar, 2007; Castaño-Rosa, 2018; Mafalda Matos et al., 2022).              |
| Combustibles inadecuados (CI)                                   | “Combustibles predominantemente utilizados para cocinar” (cod. H19).                                                                                                                                                                                            | El hogar utiliza algunos de los siguientes combustibles:<br>Gas en garrafa.<br>Leña o carbón.<br>Otro (excluyendo electricidad, gas de red y gas en tubo o granel).                                                                                                            | (Burguillo et al., 2022; Pachauri et al., 2004; Urquiza et al., 2019).      |
| Tecnologías de comunicación e información insuficientes (TICI). | “El hogar tiene internet en la vivienda” (cod. H24A).<br>“El hogar tiene celular con internet” (cod. A24B).                                                                                                                                                     | El hogar presenta alguna de las siguientes condiciones:<br>Falta de servicio de internet en la vivienda.<br>Falta de celular con internet.                                                                                                                                     | (García Ochoa, 2014; Soares et al., 2023; Zou et al., 2023).                |
| Vulnerabilidad socioeconómica (VSE)                             | “Relación o parentesco con el jefe(a) del hogar” (cod. P01).<br>“Sexo registrado al nacer” (cod. P02).<br>“Edad en grandes grupos” (cod. EDADGRU).<br>“Máximo nivel de instrucción alcanzado” (cod. MNI).<br>“Condición de actividad económica” (cod. CONDUCT). | El hogar presenta alguna de las siguientes condiciones:<br>Jefe/a de hogar desocupado/a cuyo máximo nivel educativo corresponde al primario completo.<br>Jefe/a de hogar inactivo mayor de 65 años.<br>Jefatura femenina de hogar monoparental y con al menos un niño a cargo. | (Amigo-Jorquera et al., 2019; Durán y Condorí, 2021; Thomson et al., 2017). |

Se estableció un umbral de privación de 3 dimensiones para el IVE. De esta manera se garantiza que el indicador considere conjuntamente privaciones estructurales vinculadas con la energía (combustibles e instalaciones menos eficientes para cocinar, baja calidad constructiva de la vivienda) junto con otras privaciones sociales generales. La definición del IVE queda estructurada en la ecuación 1:

$$IVE = \begin{cases} 1 & \text{si } \sum_j^4 x_{ij} \geq 3 \\ 0 & \text{si } \sum_j^4 x_{ij} < 3 \end{cases} \quad (1)$$

En donde:

$x_{ij}$  = es la matriz que representa la suma de privaciones de cada hogar  $i$  en la dimensión  $j\{VTI; CI; TICI; VSE\}$ .

El indicador arroja un resultado que se evalúa a nivel hogar y cuya distribución es binomial. De su agregación en distintas unidades geográficas (nacional, provincial, área metropolitana, radio censal) se estima la proporción de casos positivos para cada una. Esto es, el cociente de la cantidad de hogares que alcanzan el umbral de privación establecido por el indicador sobre el total de hogares dentro de cada espacio agregado.

### ***Método para el análisis espacial***

Para georreferenciar el indicador creado se utilizó la cartografía de radios censales actualizada y corregida por Rodríguez (2025), que corrige en un solo archivo vectorial ESRI Shapefile (.shp) los problemas de superposición y vacíos topológicos que presentan las cartografías censales de las 24 provincias proporcionadas por INDEC. La posibilidad de filtrar los radios según el aglomerado urbano al que corresponden, una novedad metodológica respecto de las ediciones anteriores de los censos, lo que permite agregar rápidamente los valores para las distintas áreas metropolitanas. Los radios censales, mínima unidad geográfica disponible para el INDEC, definida por un espacio cuyos límites coinciden con los límites geográficos reales, anidadas en unidades más grandes como las fracciones censales, dividen exhaustivamente los límites políticos-administrativos (localidades, municipios o comunas). El IVE antes definido sobre hogares, y expresada como una variable dicotómica, se agrega como un porcentaje para las distintas unidades geográficas de interés, como los radios censales y los aglomerados urbanos. La agregación de datos e integración de datos con la cartografía se realizó mediante el software y lenguaje de programación R, utilizando las librerías tidyverse (Wickham y RStudio, 2023) de manipulación de datos y sf (Pebesma et al., 2025) de codificación de archivos vectoriales espaciales. Para crear bases de datos relativa a cada aglomerado se filtró en la base REDATAM y se exportó en formato de valores delimitados por comas (.csv) para unir la base a la cartografía censal a partir del código ID que tiene cada radio. Para delimitar el alcance del análisis, se consideraron únicamente aquellos aglomerados con más de 500.000 habitantes.

Una vez determinadas las bases geoespaciales de los aglomerados, se procede con el análisis de dependencia o de autocorrelación espacial. Enmarcada en el área de estudio del Análisis Exploratorio de Datos Espaciales (AEDE), en el estudio de la autocorrelación se busca medir el grado de correlación que una misma variable tiene entre distintas unidades geográficas contiguas (Buzai y Montes Galbán, 2021; Legendre, 1993). Su uso da cuenta de la manera en la que la contigüidad espacial influye en una variable estudiada al poner atención en una unidad espacial y sus vecinas, a partir de la cual pueden establecerse los siguientes patrones: (1) similitud, cuando el valor de las unidades cercanas es próximo y por lo tanto se corrobora una autocorrelación espacial positiva; (2) disimilitud, cuando el valor de las unidades vecinas es lejano y por lo tanto se corrobora una autocorrelación espacial negativa; (3) aleatoriedad, cuando no se verifica autocorrelación espacial. Un método conocido para estimarla fue introducido por Morán (1950). El índice de asociación global  $I$  de Morán está estructurado de manera similar al coeficiente de correlación lineal  $r$  de Pearson, pero sustituyendo el valor de la segunda variable por el valor de la misma variable en una unidad espacial vecina (Ecuación 2).

$$I = \frac{N}{\sum_{i=1}^N \sum_{i'=1}^N w_{ii'}} \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{i'=1}^N w_{ii'} (y_i - \bar{y})(y_{i'} - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad \forall i \neq i' \quad (2)$$

En donde:

$N$  = es el número de unidades espaciales en una región determinada.

$y_i$  = es el valor de la variable  $y$  para la  $i$ -ésima unidad en un punto de coordenadas determinada.

$\bar{y}$  = es la media de la variable de interés.

$w_{ii'}$  = es la ponderación geográfica entre la unidad espacial  $i$  y la unidad espacial  $i'$ .

Con respecto al último elemento de la ecuación, la matriz de contigüidad (típicamente referenciada con la letra  $W$ ) especifica la intensidad de la relación entre dos unidades espaciales cualesquiera. Si bien existen diversas maneras de definir la matriz de ponderaciones  $W$ , generalmente, se define mediante la contigüidad de las unidades espaciales. Las formas más comunes de definir esta contigüidad son la matriz tipo torre y tipo reina, haciendo referencia a los movimientos de las piezas de ajedrez. En este trabajo se utiliza la matriz tipo reina, que considera las adyacencias tanto de las aristas como de los lados de las unidades espaciales. Como resultado del  $I$  de Morán se obtiene un resumen de la intensidad y dirección de la dependencia entre los valores de una variable observados en diferentes unidades espaciales, calculando los productos cruzados entre los valores de pares de unidades y ponderando por una medida de la relación de vecindad entre las unidades de cada par. Los trabajos enmarcados en el AEDE, se suele recurrir al método Montecarlo, a partir de la realización de un test de permutaciones aleatorias que considera un subconjunto de configuraciones. Los softwares y librerías de estadística espacial estilan utilizar 999 permutaciones de manera estandarizada.

El indicador de asociación espacial local (LISA, por sus siglas en inglés) de Morán (Anselin, 1995) permite desagregar la autocorrelación global y observar el comportamiento espacial de una variable en un espacio delimitado. Los resultados gráficos de este indicador, que también se obtienen mediante permutaciones aleatorias estandarizadas, suelen estructurarse en composiciones cartográficas de conglomerados. El mapa LISA de conglomerados (también llamado de clusters) arroja como resultados 5 agrupaciones según valores conjuntos: Alto-Alto (llamados puntos calientes o *hot-spot*), Bajo-Bajo (llamados puntos fríos o *cold-spot*), Alto-Bajo, Bajo-Alto y relación no significativa. Todo el análisis de autocorrelación espacial tanto global como local se realizó mediante el software de análisis de datos espaciales GeoDa 1.22 (Center for Spatial Data Science, 2025). Todos los análisis espaciales se realizaron con 999 permutaciones aleatorias con un umbral de significancia de  $p \leq 0,05$ .

## RESULTADOS

Como resultados preliminares, en la Tabla 2 se expresan la incidencia relativa tanto del IVE como de las dimensiones que lo integran teniendo en cuenta el nivel general para toda la población argentina, así como también filtrando por área urbana o rural. La incidencia total del IVE es de un 12,01%, congruente con la incidencia de privaciones estructurales. Como es de esperarse, al incluir dimensiones vinculadas a servicios de infraestructura y en un territorio extenso como el argentino la incidencia relativa del IVE en el área rural es significativamente mayor que en para el espacio urbano. Información que debe matizarse teniendo en cuenta que el 92,42% de la población argentina reside en áreas urbanas. La frecuencia absoluta para cada espacio agregado alcanza los 1.557.710 hogares para el espacio urbano, mientras que para el espacio rural son 356.132. Resulta pertinente considerar la dimensión VSE en espacio urbano, ya que esta privación tiene un nivel de incidencia significativamente mayor que en espacio rural tanto en términos relativos como absolutos.

Tabla 2. Incidencia relativa del IVE y de sus dimensiones

|                                       | IVE    | VTI    | CI     | TICI   | VSE    |
|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Argentina total                       | 12,01% | 19,52% | 40,42% | 25,67% | 30,40% |
| Argentina urbano                      | 10,46% | 18,51% | 37,45% | 23,59% | 30,66% |
| Argentina rural (disperso y agrupado) | 34,20% | 33,94% | 83,02% | 55,43% | 26,72% |

Con respecto a las contingencias de las dimensiones que conforman el umbral de indicador, es decir, privaciones en 3 dimensiones. En la Tabla 3 se muestra la tabla de contingencia para cada una de las combinaciones y la importancia de cada combinación dentro del indicador. Para todos los casos, las combinaciones que consideran las dimensiones materiales vinculadas con la calidad constructiva de la vivienda, los combustibles utilizados para cocinar y el acceso a tecnologías de información (Combinación 4) resultan la de mayor incidencia. Mientras que la Combinación 3, que contempla la yuxtaposición entre las privaciones de vulnerabilidad socioeconómica, combustibles de menor calidad utilizados para cocinar y limitaciones en las tecnologías de información, es la que se mantiene más homogénea entre los distintos tipos de agregación por tipo de área.

*Tabla 3. Contingencia e incidencia relativa de las dimensiones según tipo de espacio*

|               | <b>VSE</b> | <b>VTI</b> | <b>CI</b> | <b>TICI</b> | <b>% IVE<br/>Argentina</b> | <b>% IVE<br/>Urbano</b> | <b>% IVE<br/>Rural</b> |
|---------------|------------|------------|-----------|-------------|----------------------------|-------------------------|------------------------|
| Combinación 1 | 1          | 1          | 1         | 0           | 12,81                      | 14,50                   | 5,42                   |
| Combinación 2 | 1          | 1          | 0         | 1           | 4,62                       | 5,48                    | 0,85                   |
| Combinación 3 | 1          | 0          | 1         | 1           | 26,29                      | 27,06                   | 22,92                  |
| Combinación 4 | 0          | 1          | 1         | 1           | 39,11                      | 36,58                   | 50,17                  |
| Combinación 5 | 1          | 1          | 1         | 1           | 17,16                      | 16,37                   | 20,64                  |
|               |            |            |           |             | 100                        | 100                     | 100                    |

Circunscribiendo el análisis del indicador a los principales aglomerados urbanos de Argentina, en primer lugar, se describe que los aglomerados urbanos que cumplen con el criterio de más de medio millón de habitantes son 9 en total según el CNPHV 2022. En su conjunto contienen el 51,29% de la población total del país, representando cerca de 24 millones de habitantes distribuidos en alrededor de 8,5 millones de hogares. Para cada uno de estos aglomerados urbanos se creó una base en formato ESRI Shapefile a partir de la unión de las tablas con la cartografía censal, para luego proseguir con la evaluación de la autocorrelación espacial mediante la estimación del *I* de Morán. En el análisis de autocorrelación se consideran los resultados generales de todos estos parámetros se computan en la Tabla 4.

*Tabla 4. Valores del IVE y de su autocorrelación espacial para los 9 aglomerados urbanos*

| <b>Aglomerado Urbano</b>   | <b>Población</b> | <b>N de Hogares</b> | <b>% IVE</b> | <b><i>I</i> de Morán</b> |
|----------------------------|------------------|---------------------|--------------|--------------------------|
| Gran Buenos Aires          | 16.224.751       | 5.834.728           | 7,24         | 0,71                     |
| Gran Córdoba               | 1.705.642        | 622.028             | 6,83         | 0,65                     |
| Gran Rosario               | 1.429.209        | 533.898             | 11,25        | 0,65                     |
| Gran Mendoza               | 1.056.893        | 347.065             | 5,35         | 0,50                     |
| Gran San Miguel de Tucumán | 1.052.194        | 315.087             | 17,94        | 0,59                     |
| Gran Salta                 | 671.015          | 201.716             | 13,00        | 0,59                     |
| Gran San Juan              | 546.613          | 168.416             | 11,82        | 0,49                     |
| Gran Santa Fe              | 530.008          | 192.647             | 14,21        | 0,67                     |
| Gran Neuquén - Cipolletti  | 500.336          | 184.194             | 3,80         | 0,53                     |

Se observa que el aglomerado con mayor incidencia es el Gran San Miguel de Tucumán, de la región del Noroeste, mientras que el área metropolitana con mayor incidencia es el Gran Neuquén, perteneciente a la región patagónica. Este resultado es congruente con otras problemáticas analizadas periódicamente por el INDEC, en donde las regiones del Noroeste y Noreste argentino son las que concentran los mayores índices de pobreza, menores ingresos y grados de escolarización así como menor tasa de acceso a servicios de infraestructura.

Respecto de los patrones espaciales encontrados se observa que en todos los aglomerados la existencia de un nivel de autocorrelación espacial positiva moderado en la mayoría de los casos alrededor de 0,5.

Esto implica que los radios censales que concentran mayor proporción de hogares en situación de vulnerabilidad energética se encuentran próximos a otros radios con proporciones similares y de manera complementaria, los radios con baja incidencia de hogares vulnerables se encuentran moderadamente cercanos entre sí. Es destacable la situación del Gran Buenos Aires, cuyo nivel de incidencia del IVE es relativamente bajo, pero sin embargo presenta el valor de *I* de Morán más alto con marcada diferencia sobre los demás aglomerados.

Para analizar pormenorizadamente los patrones espaciales locales se escoge de manera ilustrativa al Gran Buenos Aires, el Gran Santa Fe y el Gran San Martín de Tucumán. La elección de estos aglomerados responde a su relevancia como metrópolis dentro de las regiones agregadas de Argentina de las que forman parte. Además, los valores presentados en estos tres casos, tanto del indicador como de su autocorrelación espacial, resultan relevantes en los términos del análisis propuesto. Los niveles de autocorrelación espacial global dan cuenta que en estas áreas metropolitanas se encuentran patrones espaciales marcados. Para todos los archivos vectoriales relativos a los tres aglomerados urbanos se configuró una matriz de pesos espaciales tipo reina y se fijó el número en 999 permutaciones a niveles de significancia de  $p \leq 0.05$ , por lo que se asegura que los patrones espaciales marcados por los clústeres de autocorrelación son estadísticamente significativos. En todos los mapas que se desarrollan a continuación, las cifras entre paréntesis de cada categoría de la leyenda indican la cantidad de radios censales que pertenecen a cada una.

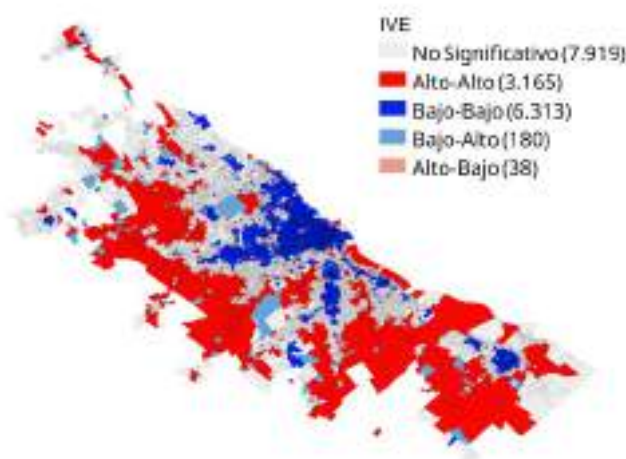


Figura 1. Mapa LISA de clúster (IVE) para el Gran Buenos Aires

En la Figura 1 se observa la salida de los mapas LISA de clúster para el Gran Buenos Aires. Los valores que se observan entre paréntesis representan el número absoluto de radios censales. Se observa que en este caso que el principal patrón espacial se explica por el clúster Bajo-Bajo (*cold-spot*) que se concentra en los radios pertenecientes a la Ciudad Autónoma de Buenos Aires y los partidos colindantes, especialmente al norte y noroeste de la ciudad. Mientras que el clúster Alto-Alto (*hot-spot*) incluye principalmente a los radios agrupados en zonas del conurbano bonaerense. La baja cantidad de radios que concentran de los clústeres de contraste (Bajo-Alto y Alto-Bajo) refuerzan el nivel de dependencia espacial global positiva.

Para el caso del Gran Santa Fe (Figura 2) la concentración de radios censales con niveles bajos se agrupa en las zonas centro-este y sureste de la capital santafesina. Mientras que los valores más altos se concentran en todo el cordón oeste incorporando tanto grupos de radios de la ciudad de Santa Fe como el sur de Recreo y el este de Santo Tomé.

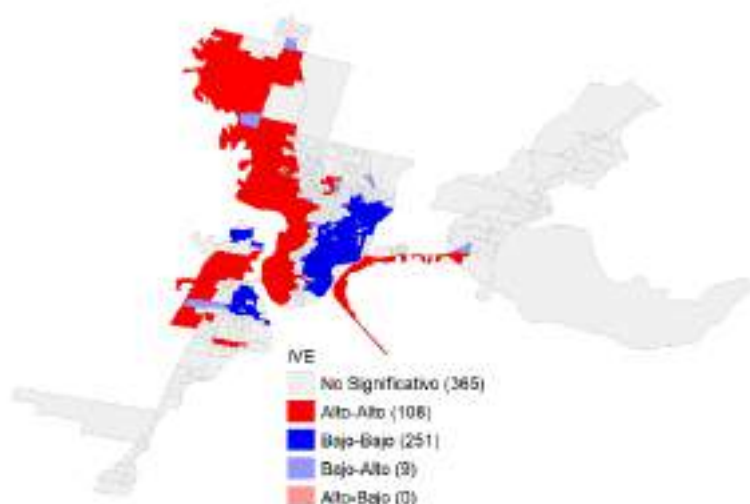


*Figura 2. Mapa LISA de clúster (IVE) para el Gran Santa Fé*

Por último, el análisis de autocorrelación del Gran San Martín de Tucumán (Figura 3) muestra una dinámica congruente con la distribución centro-periferia en donde los radios censales pertenecientes al conglomerado Bajo-Bajo se concentran en la zona céntrica de la capital tucumana, mientras que la mayoría de los radios con niveles altos de vulnerabilidad se concentran hacia el este y sureste del aglomerado urbano.

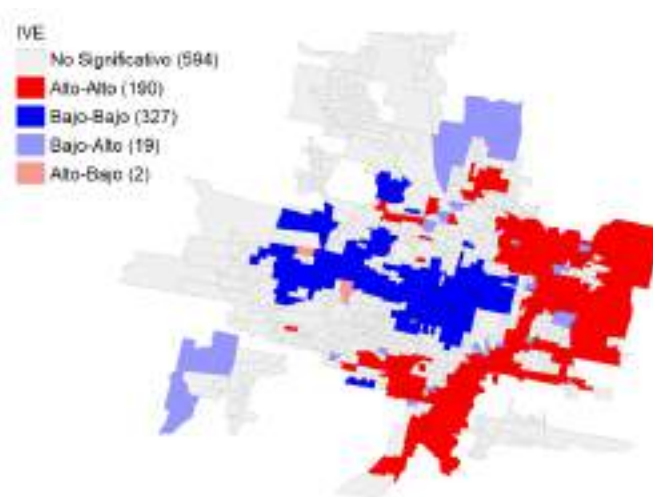


*Figura 3. Mapa LISA de clúster (IVE) para el Gran San Martín de Tucumán*

Los tres casos ilustrados para el análisis de los mapas LISA presentaban valores de autocorrelación espacial global significativos al ser mayor a 0,5. Descontando los radios sin niveles significativos de dependencia espacial, el agrupamiento más visible se da por el patrón Bajo-Bajo. Esto implica que los radios que contienen poca incidencia de hogares en situación de vulnerabilidad energética, en los términos que se ha definido el indicador, se encuentran próximos entre sí.

Una tesis posible sobre este comportamiento en las áreas metropolitanas es que en la construcción del IVE se consideraron aspectos estructurales y de acceso a servicios que la densidad poblacional y concentración de viviendas e infraestructura facilita. En ese sentido, es importante tener en cuenta la forma de estructurar la cartografía censal por parte del INDEC y los institutos provinciales de estadística: formando polígonos hasta completar exhaustivamente el territorio político. En esta práctica se estima un promedio de 300 hogares por radio, aunque en las zonas de concentración urbanística con muchos hogares, viviendas y personas suelen incluir mayores cantidades y la partición de radios es mayor. De ahí que los centros de las áreas metropolitanas tengan mayor partición en radios, de la misma manera

que en los radios que se encuentran en los perímetros de los aglomerados suelen tener superficies más grandes con menor densidad de hogares.

Congruente con las características estructurales definidas en el indicador y de los aspectos constitutivos de la cartografía censal de los aglomerados urbanos, también es esperable que los radios que concentren mayor incidencia de casos positivos se concentren hacia los perímetros de las metrópolis. La concentración de aglomerados en el clúster Alto-Alto y Bajo-Bajo expresan la dinámica centro-periferia típicamente abordados por la literatura socioeconómica y geográfica (Gasparini et al., 2012; Buzai y Montes Galbán).

## CONCLUSIONES

Se ha definido y estimado un indicador de vulnerabilidad energética para Argentina elaborado sobre la base de microdatos de la edición 2022 del CNPHV y, a partir de su agregación en diferentes unidades geográficas, se evaluó el comportamiento espacial del indicador en los principales aglomerados urbanos del país mediante técnicas AEDE. El indicador definido brinda información útil respecto de las condiciones estructurales de la pobreza y vulnerabilidad energética en Argentina.

Por las características de las variables censales, es de esperar que los un indicador de vulnerabilidad y privación generado a partir de sus variables reflejen aspectos estructurales con relativamente baja incidencia a nivel general alcanzando el 12% del total de hogares del país. Congruente con las dimensiones estructurales de privación, para el IVE se identificó una brecha urbano-rural (10,46% vs 34,20%), que da cuenta de su concentración diferencial según características territoriales generales. Sin embargo, es destacable el hallazgo de que los niveles de incidencia relativa (y absoluta) de la dimensión de vulnerabilidad socioeconómica (VSA) es mayor en las áreas urbanas que en el espacio rural. Como podría esperarse, en las demás dimensiones vinculadas con servicios de infraestructura, tecnologías e instalaciones prevalecen con una incidencia relativa mayor para las áreas rurales respecto de las urbanas.

En lo que respecta al análisis de los principales aglomerados urbanos, en donde se concentra más de la mitad de la población de todo el país, se denota una incidencia heterogénea del IVE. Contrastan los casos de Gran San Martín de Tucumán (17,94%) y de Gran Neuquén – Cipolletti (3,80%) con valores significativamente por encima y por debajo de la incidencia total para Argentina. Por otro lado, el uso de radios censales como unidad de análisis espacial permitió capturar variaciones intra-metropolitanas con mayor granularidad; un aspecto que no suele tomarse en cuenta en la literatura especializada. Todos los aglomerados presentan nivel de autocorrelación espacial global positivo y moderado, a salvedad del Gran Buenos Aires que presenta un valor marcadamente más alto que el resto.

En el análisis de la autocorrelación espacial local de los tres casos seleccionados, se observa que estos patrones de distribución espacial se explican principalmente por el agrupamiento de radios censales con incidencia baja del indicador, es decir, con pocos hogares que superen el umbral de privaciones establecido en la metodología. Los patrones centro-periferia identificados sugieren que los procesos de urbanización y desarrollo en grandes áreas metropolitanas generan gradientes de vulnerabilidad multidimensional relacionados la dimensión social de la energía. Sobre este último aspecto sería pertinente profundizar en investigaciones futuras, utilizando fuentes de datos de mayor detalle que el censo como podrían ser las encuestas de hogares e integrándolas en capas de Sistemas de Información Geográfica con otras bases externas de información relevante (mapas catastrales, geología climatológica, zonas bioclimáticas, red eléctrica, transporte público, entre otras posibles). Asimismo, en vistas de profundizar el análisis espacial, podrían incluirse las distintas bases de datos geográficas desde la propia definición de indicador,

## REFERENCIAS

Álvarez, F., Allub, L., Cont, W., Juncosa, F., Odriozola, J., y Alves, G. (2024). *Energías Renovadas: Transición energética justa para el desarrollo sostenible* [Report]. CAF. <https://scioteca.caf.com/handle/123456789/2248>



- Amigo-Jorquera, C., Guerrero-González, María José, Sannazzaro, Jorgelina, y and Urquiza-Gómez, A. (2019). Does energy poverty have a female face in Chile? *Tapuya: Latin American Science, Technology and Society*, 2(1), 378-390. <https://doi.org/10.1080/25729861.2019.1608038>
- Anselin, L. (1995). Local Indicators of Spatial Association—LISA. *Geographical Analysis*, 27(2), 93-115. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1995.tb00338.x>
- Armaş, I., y Gavriş, A. (2016). Census-based Social Vulnerability Assessment for Bucharest. *Procedia Environmental Sciences*, 32, 138-146. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.03.018>
- Bouzarovski, S., McKenzie, P., Lonie, A., Sarpotdar, A., Mattioli, G., y Martiskainen, M. (2025). The determinants of double energy vulnerability: A geospatial analysis. *The Geographical Journal*, 191(1), e12610. <https://doi.org/10.1111/geoj.12610>
- Bouzarovski, S., y Petrova, S. (2015). A global perspective on domestic energy deprivation: Overcoming the energy poverty–fuel poverty binary. *Energy Research y Social Science*, 10, 31-40. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2015.06.007>
- Bouzarovski, S., Petrova, S., y Tirado-Herrero, S. (2014). *From Fuel Poverty to Energy Vulnerability: The Importance of Services, Needs and Practices*. (SSRN Scholarly Paper No. 2743143). <https://papers.ssrn.com/abstract=2743143>
- Bradbrook, A. J., Gardam, J. G., y Cormier, M. (2008). A Human Dimension to the Energy Debate: Access to Modern Energy Services. *Journal of Energy y Natural Resources Law*, 26(4), 526-552. <https://doi.org/10.1080/02646811.2008.11435198>
- Brand-Correa, L. I., y Steinberger, J. K. (2017). A Framework for Decoupling Human Need Satisfaction From Energy Use. *Ecological Economics*, 141, 43-52. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.05.019>
- Burguillo, M., Barisone, M., y Juez-Martel, P. (2022). Which cooking and heating fuels are more likely to be used in energy-poor households? Exploring energy and fuel poverty in Argentina. *Energy Research y Social Science*, 87, 102481. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102481>
- Buzai, G., y Montes Galbán, E. (2021). *Estadística Espacial: Fundamentos y aplicación con Sistemas de Información Geográfica*.
- Buzar, S. (2007). When Homes Become Prisons: The Relational Spaces of Postsocialist Energy Poverty. *Environment and Planning A: Economy and Space*, 39(8), 1908-1925. <https://doi.org/10.1068/a38298>
- Castañero-Rosa, R. (2018). *Identificación de hogares vulnerables a partir del concepto pobreza energética: Indicador y modelo de evaluación* [Phd Thesis]. Universidad de Sevilla.
- Center for Spatial Data Science. (2025). *GeoDa (T. U. Chicago, Editor)* (Versión 1.22.0.20) [Software]. <https://geodacenter.github.io/>
- Desvallees, L. (2021). Identificación, localización y caracterización de la vulnerabilidad energética a nivel de sección censal en el municipio de Barcelona. *Scripta Nova. Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales*, 25(1), Article 1. <https://doi.org/10.1344/sn2021.25.30257>
- Durán, R. (2018). *Apuntes sobre pobreza energética. Estimaciones para Argentina, años 2003—2018*. Taller Ecologista. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.31212.59526>
- Durán, R. J., y Condorí, M. A. (2019). Evolución de la pobreza energética en Argentina durante el período 2002—2018. Oportunidades para las energías renovables. *Extensionismo, Innovación y Transferencia Tecnológica: claves para el desarrollo*, 5. <https://doi.org/10.30972/eitt.503780>
- Durán, R. J., y Condorí, M. A. (2021). Vulnerabilidad energética y socioeconómica en los hogares de Argentina. *Cuadernos Geográficos*, 60(1), Article 1. <https://doi.org/10.30827/cuadgeo.v60i1.14102>
- García Ochoa, R. (2011). *Pobreza energética y cambio climático: Una propuesta metodológica para el análisis de la relación entre energía, pobreza y medio ambiente*. El Colegio de México.
- García Ochoa, R. (2014). *Pobreza energética en América Latina* [Documento de proyecto]. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/36661>
- García Ochoa, R., Avila-Ortega, D. I., y Cravioto, J. (2022). Energy services' access deprivation in Mexico: A geographic, climatic and social perspective. *Energy Policy*, 164, 112822. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.112822>
- Gasparini, L., Cicowiez, M., y Sosa Escudero, W. (2012). *Pobreza y desigualdad en América Latina* (1a ed.). Temas Grupo Editorial. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/65474>
- González-Eguino, M. (2015). Energy poverty: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 377-385. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.013>

- Ibañez Martín, M. M., Zabaloy, M. F., y Guzowski, C. (2019). Una primera exploración de la situación de pobreza energética en Argentina: ¿Es la pobreza energética un fenómeno independiente de las privaciones multidimensionales de la población? *Asociación Argentina de Economía Política*, 1-19.
- IEA, I. E. A. (2016). *World Energy Outlook 2016 – Analysis* (Reports No. 17; p. 667). <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2016>
- Kozulj, R. (2009, octubre 1). *Contribución de los servicios energéticos a los objetivos de desarrollo del milenio y a la mitigación de la pobreza en América Latina y el Caribe*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/3720-contribucion-servicios-energeticos-objetivos-desarrollo-milenio-la-mitigacion-la>
- Legendre, P. (1993). Spatial Autocorrelation: Trouble or New Paradigm? *Ecology*, 74(6), 1659-1673. <https://doi.org/10.2307/1939924>
- Mafalda Matos, A., Delgado, J. M. P. Q., y Guimarães, A. S. (2022). Linking Energy Poverty with Thermal Building Regulations and Energy Efficiency Policies in Portugal. *Energies*, 15(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/en15010329>
- Montañés, C. C., O'Shaughnessy, E., Bednar, D., Nock, D., Carley, S., Kammen, D. M., y Konisky, D. M. (2023). Enabling and centering equity and justice in clean energy transition research. *Joule*, 7(3), 437-441. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2023.02.005>
- Moran, P. A. P. (1950). Notes on Continuous Stochastic Phenomena. *Biometrika*, 37(1/2), 17-23. <https://doi.org/10.2307/2332142>
- Naciones Unidas. (2012). *La Sostenibilidad del Desarrollo a 20 Años de la Cumbre para la Tierra: Avances, brechas y lineamientos estratégicos para América Latina y el Caribe* (Rio ++20) [Documento preparatorio].
- Pachauri, S., Mueller, A., Kemmler, A., y Spreng, D. (2004). On Measuring Energy Poverty in Indian Households. *World Development*, 32(12), 2083-2104. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2004.08.005>
- Pebesma, E., Bivand, R., Racine, E., Sumner, M., Cook, I., Keitt, T., Lovelace, R., Wickham, H., Ooms, J., Müller, K., Pedersen, T. L., Baston, D., y Dunnington, D. (2025). *sf: Simple Features for R* (Versión 1.0-21) [Software]. <https://cran.r-project.org/web/packages/sf/index.html>
- Pérez-Fargallo, A., Cerda-Fuentes, V., Delgado-Gutiérrez, E., Porras-Salazar, J. A., Pérez-Fargallo, A., Cerda-Fuentes, V., Delgado-Gutiérrez, E., y Porras-Salazar, J. A. (2023). Origen, evolución y aplicación de indicadores de pobreza energética en Iberoamérica. *Revista INVI*, 38(109), 100-133. <https://doi.org/10.5354/0718-8358.2023.70785>
- Poggiese, M. (2023). Segmentación de tarifas energéticas e incidencia distributiva en Argentina. Su vinculación con la pobreza energética. *Asociación Argentina de Economía Política*. <https://aaep.org.ar/?p=7287>
- Practical Action. (2010). *Poor people's energy outlook 2010* (p. 82).
- Puig, J. M. (2023). *Pobreza energética en Argentina* [Tesis, Universidad Nacional de La Plata]. <https://doi.org/10.35537/10915/162035>
- Robinson, C., Lindley, S., y Bouzarovski, S. (2019). The Spatially Varying Components of Vulnerability to Energy Poverty. *Annals of the American Association of Geographers*, 109(4), 1188-1207. <https://doi.org/10.1080/24694452.2018.1562872>
- Rodriguez, G. M. (2025). *Cartografía de radios censales de Argentina corregidos, completados y estandarizados de 1991, 2001, 2010 y 2022* [Dataset]. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/149711>
- Soares, R. S., Weiss, M., Lampis, A., Bermann, C., y Hallack, M. C. M. (2023). *Pobreza energética en los hogares y su relación con otras vulnerabilidades en América Latina: El caso de Argentina, Brasil, Colombia, Perú y Uruguay* (Nota técnica del BID No. IDB-TN-02623). Banco Interamericano de Desarrollo. <https://publications.iadb.org/es/pobreza-energetica-en-los-hogares-y-su-relacion-con-otras-vulnerabilidades-en-america-latina-el>
- Thomson, H., Bouzarovski, S., y Snell, C. (2017). Rethinking the measurement of energy poverty in Europe: A critical analysis of indicators and data. *Indoor and Built Environment*, 26(7), 879-901. Scopus. <https://doi.org/10.1177/1420326X17699260>
- Tirado Herrero, S., Jiménez Meneses, L., y López Fernández, J. L. (2019). ¿Una transición justa?: Los bonos sociales a debate desde una perspectiva de pobreza y justicia energética. *Presupuesto y gasto público*, 97, 155-176.
- Urquiza, A., Amigo, C., Billi, M., Calvo, R., Labraña, J., Oyarzún, T., y Valencia, F. (2019). Quality as a hidden dimension of energy poverty in middle-development countries. Literature review and case

- study from Chile. *Energy and Buildings*, 204, 109463. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109463>
- Urquiza, A., y Billi, M. (2020). *Seguridad hídrica y energética en América Latina y el Caribe: Definición y aproximación territorial para el análisis de brechas y riesgos de la población*. <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/46408>
- Wickham, H., y RStudio. (2023). *tidyverse: Easily Install and Load the «Tidyverse»* (Versión 2.0.0) [Software]. <https://cran.r-project.org/web/packages/tidyverse/index.html>
- Zabaloy, M. F., Ibáñez Martín, María María, M., y Martínez, C. K. (2023). Desigualdad energética y políticas públicas: Un análisis inicial para Argentina. *Asociación Argentina de Economía Política*, 1-28. <https://aaep.org.ar/?p=5950>
- Zou, R., Yang, J., y Feng, C. (2023). Does informatization alleviate energy poverty? A global perspective. *Energy Economics*, 126, 106971. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2023.106971>

## SPATIAL APPROACH TO ENERGY VULNERABILITY IN THE MAIN ARGENTINE METROPOLIS

**ABSTRACT:** This study estimates an energy vulnerability indicator for Argentina using census variables and conducts spatial analysis of its behavior across major metropolitan areas through disaggregation at census tract level. Results show an overall national incidence rate of 12.01%, with urban areas displaying 10.46% incidence compared to 34.20% in rural areas, though urban areas concentrate a significantly larger absolute number of affected households. Spatial analysis focused on nine urban agglomerations exceeding 500 thousand inhabitants to assess spatial autocorrelation patterns. Findings reveal positive and moderate global spatial autocorrelation indices across all metropolitan areas, with Greater Buenos Aires exhibiting the highest values. Spatial patterns are consistently explained by clustering of census tracts with low energy vulnerability incidence. Metropolitan areas examined through graphic techniques demonstrate clear center-periphery dynamics.

**Keywords:** energy vulnerability, energy poverty, urban agglomeration, spatial autocorrelation

## EVALUACIÓN DE LAS ECONOMÍAS DE ESCALA EN EL COSTO NIVELADO DE TRANSPORTE CARRETERO DE HIDRÓGENO COMPRIMIDO EN LATINOAMÉRICA

Ernesto Coutsiers<sup>1,2</sup>, Marcelo Gea<sup>3</sup>, Ramiro Rodríguez<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup> Calden Consultoría SRL

Av. Padre Mariani 478, Villa Allende (5105), Provincia de Córdoba

[www.caldenconsultoria.com](http://www.caldenconsultoria.com) +54 351 7000717, [ecoutsiers@caldenconsultoria.com](mailto:ecoutsiers@caldenconsultoria.com)

<sup>2</sup> Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de Salta

Av. Bolivia 5150, Salta (4408), Provincia de Salta

[www.exactas.unsa.edu.ar](http://www.exactas.unsa.edu.ar) +54 387 4255408, [ecoutsiers@exa.unsa.edu.ar](mailto:ecoutsiers@exa.unsa.edu.ar)

<sup>3</sup> Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Universidad Nacional de Salta

Av. Bolivia 5150, Salta (4408), Provincia de Salta

[www.inenco.unsa.edu.ar](http://www.inenco.unsa.edu.ar) +54 387-4255424, [geam@unsa.edu.ar](mailto:geam@unsa.edu.ar)

<sup>4</sup> Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba,

Av. Vélez Sarsfield 299, Córdoba (5000), Provincia de Córdoba

[www.fcefyn.unc.edu.ar](http://www.fcefyn.unc.edu.ar) +54 351 5353800

[ramiro.rodriguez@unc.edu.ar](mailto:ramiro.rodriguez@unc.edu.ar)

**RESUMEN:** El presente trabajo analiza el costo nivelado de transporte de hidrógeno LCHT para Argentina, Brasil, Chile, Colombia, México y Perú, considerando diferentes capacidades y distancias de transporte. El objetivo es determinar y estimar la economía de escala para dos tecnologías de almacenamiento: recipientes de acero y de epoxi T300. Los resultados muestran que el LCHT varía significativamente con la distancia. Para 100 km, el costo oscila entre 0,68 y 3,44 USD/kg; para 300 km, entre 1,43 y 8 USD/kg; y para 1.000 km, entre 3,99 y 24,01 USD/kg. La principal componente del LCHT, representando aproximadamente la mitad del costo, es el recurso humano (salario de los conductores). Le siguen los costos de combustible y la inversión en el tráiler y los recipientes de presión. Se encontró una fuerte economía de escala con los recipientes de acero y una economía moderada a alta con los de epoxi. Sin embargo, estas economías se limitan al peso máximo permitido del conjunto camión-tráiler. Para distancias cortas (100 y 300 km), el LCHT parece viable. No obstante, para distancias de 1.000 km, el LCHT es alto, lo que sugiere la necesidad de explorar otros métodos de transporte más económicos como hidrógeno líquido, ductos o derivados.

**Palabras clave:** Hidrógeno, hidrógeno verde, transporte de hidrógeno, economía del hidrógeno, hidrógeno en Latinoamérica.

### INTRODUCCIÓN

La conveniencia de las metodologías de transporte para hidrógeno depende del caudal ( $\text{tH}_2/\text{día}$ ) y la distancia (km). Según fue analizado por (Yang y Ogden, 2007), el costo de entrega (USD/kg) puede variar ampliamente, desde aproximadamente 0,10 USD/kg hasta casi 4 USD/kg. La opción de menor costo se logra con un caudal muy alto y una distancia corta. Se distinguen tres modos de transporte: **G** (gas comprimido en camiones), **L** (líquido criogénico en camiones) y **P** (gas por ductos).

Para el modo **G** los costos son relativamente independientes del caudal. La distancia de transporte tiene un gran efecto, ya que afecta el número de camiones, la mano de obra, el combustible y los costos de operación y mantenimiento, que es el componente más significativo del costo total. Para el modo **L**, la



mayor parte del costo (80-95%) se debe a la licuefacción y en gran medida del flujo de hidrógeno debido a las economías de escala del equipo de licuefacción, pero son menos sensibles a la distancia de transporte que los de **G**. En el modo **P**, los costos dependen en gran medida del caudal y la distancia, siendo el costo de capital del ducto el principal factor.

En este trabajo se busca dar foco en el transporte carretero con camiones que poseen tráilers con recipientes de presión, este tipo de transporte suele llamarse “Transporte virtual de hidrógeno” (en analogía con el transporte virtual de gas natural, que es llamado así para diferenciarlo del transporte por ductos). Acorde a lo presentado anteriormente, esta metodología de transporte se utiliza en los casos donde las distancias a transportar son cortas y las cantidades son bajas. La elección de este tipo de transporte es basada en que, por las características de la demanda y geografía latinoamericana, puede ser el que primero requiere desarrollarse.

Se presenta entonces la metodología para el cálculo del costo nivelado considerando diferentes distancias y modelos de tráilers para los países referenciales ya mencionados. Se analizan luego la importancia de los componentes que forman parte de este costo nivelado. Sobre el final se analiza el comportamiento en escala, la existencia y cuantificación de economías de esta naturaleza.

## METODOLOGÍA

De manera general, el modelo de cálculo del costo nivelado tiene la lógica presentada en el flujograma de la Figura 1. Se relevan las variantes de tráilers, compuestos en conjunto con los recipientes, de acuerdo con (Reddi et al., 2018). Cada modelo implica un costo de inversión, opera a cierta presión y permite el transporte de una capacidad determinada. Al costo del tráiler se le adiciona el costo del tracto (el término “tracto” en Argentina es conocido como camión) y los costos de inversión (en su proporción de uso) de la compresión. La suma de estos costos de inversión conforma el costo de capital.

A partir de la presión y la capacidad de transporte de cada tráiler se estiman la energía requerida para la compresión y el costo de energía eléctrica.

El costo de combustible se calcula según la distancia, el precio del combustible y la eficiencia del tracto. Los costos de recursos humanos (RR. HH.) dependen de cada país. Los costos operativos incluyen ambos y otros costos fijos y variables: los fijos, no relacionados con la mano de obra, se modelan como 5 % del CAPEX anual, y los variables, excluido el combustible, como 1 % (Yang y Ogden, 2007). La suma de costos de capital y operativos da el costo total, que se descuenta según la tasa de costo de capital y la vida útil de la instalación para obtener el costo nivelado de almacenamiento de hidrógeno. En la Figura 1, las variables independientes del país se muestran en azul y las específicas de cada país, en naranja.

### Costo del recurso humano

Se calcula como el producto del tiempo de recorrido por costo unitario de RR. HH., según la Ec. 1:

$$C_{HR} = CU_{HR} t_r \quad (1)$$

donde:

$CU_{HR}$ : es el costo unitario horario del piloto

$t_r$ : es el tiempo del recorrido

Para el  $CU_{HR}$  se utiliza el valor de origen (Yang y Ogden, 2007), a partir de este valor se ajusta la moneda a dólares de diciembre de 2022 con el *Producer Price Index* de acuerdo con (Federal Reserve Bank of St. Louis, 2023), generando un valor base para EE. UU. Posteriormente, para cada país se ajusta de acuerdo con la paridad de poder de compra con el índice BigMac de la revista *The Economist* tal cual lo presenta (The Economist, 2024) cuyo valor a diciembre de 2002 se obtiene de (Stadista, 2024) para los seis países de análisis. Esto se presenta en la Ec. 2:



### Costo nivelado de transporte

De acuerdo con (Yang y Ogden, 2007), el LCHT de H<sub>2</sub> se calcula como la suma de los costos anuales del equipamiento (CA\_equipamiento: capital anualizado del modo y sus unidades auxiliares) y los costos anuales de operación (CA\_operación), dividida por la cantidad de H<sub>2</sub> efectivamente entregado durante la vida útil (expresado en USD/kg). Esta formulación es análoga al enfoque de *levelized cost* usado en almacenamiento por (Abdin et al., 2022), pero aquí aplicada explícitamente al transporte/entrega. De este modo, el costo nivelado de transporte (LCHT) se define con la Ec. 3.

$$LCHT = \frac{C_{CapEx} + \sum_{i=1}^n \frac{C_{OpEx}}{(1+r)^i}}{\sum_{i=1}^n \frac{M_{H_2}}{(1+r)^i}} \quad (3)$$

donde:

- $C_{CapEx}$ : Costos de inversión (conocido como CapEx, del inglés *Capital Expenditures*)
- $C_{OpEx}$ : Costos de operar y mantener (conocido como OpEx, del inglés *Operational Expenditures*)
- $M_{H_2}$ : Masa de hidrógeno transportada
- $r$ : Tasa de costo de capital
- $i$ : Año del flujo
- $n$ : Horizonte del proyecto

### Tasa de costo de capital

La tasa de costo de capital  $r$  utilizada se desarrolla análogamente siguiendo a (Coutsiers et al., 2022) y se adopta la Tasa de Capital Medio Ponderado -WACC- por sus siglas en inglés (Weighted Average Cost of Capital) en términos reales y antes de impuestos para considerar el impuesto a la renta de manera implícito, que se muestran en la Tabla 2 para cada país analizado.

Tabla 2: Tasa de costo de capital utilizada en la estimación de LCHT. Fuente: Elaboración propia de acuerdo con la metodología de (Coutsiers et al., 2022).

| País      | WACC <sub>bt</sub> |
|-----------|--------------------|
| Argentina | 25,15%             |
| Brasil    | 12,28%             |
| Chile     | 8,25%              |
| Colombia  | 10,33%             |
| México    | 10,10%             |
| Perú      | 9,59%              |

### Costos de Inversión

Este costo se desagrega en tres componentes, de acuerdo con lo presentado en la Ec. 4.

$$C_{CapEx} = C_{CapEx,Trailer} + C_{CapEx,Tracto} + C_{CapEx,Compresión} \quad (4)$$

donde:

- $C_{CapEx,Trailer}$ : Costos de inversión de la totalidad de conjunto de tráiler que se encuentra compuesto por el tráiler propiamente dicho y el arreglo de recipientes de presión
- $C_{CapEx,Tracto}$ : Costos de inversión del tracto (también denominado camión)
- $C_{CapEx,Compresión}$ : Costos de inversión de compresión, en su componente proporcional al uso

En esta línea, se analizan las variantes presentadas en acuerdo con Reddi et al. (2018), donde se realiza un análisis técnico-económico de configuraciones de tráilers de alta presión para el transporte y reabastecimiento de hidrógeno comprimido, comparando unidades convencionales de acero (Tipo I) con diseños avanzados de material compuesto (Tipo IV). El estudio identificó las alternativas que maximizan la carga útil y minimizan el costo por kg de H<sub>2</sub> entregado, considerando las restricciones de tamaño y peso del Departamento de Transporte de los EE. UU. (DOT, por sus siglas en inglés), así como diversas distancias de transporte y capacidades de las estaciones de servicio.



Los resultados indican que los tráilers Tipo IV transportan hasta 1.100 kg H<sub>2</sub> a 7.300 psi (500 bar), superando a los Tipo I, limitados a 270 kg por normativa. En los Tipo IV, la carga útil entregable y el costo de capital guardan una relación lineal, con un promedio de 1.100 USD/kg H<sub>2</sub>; la configuración más rentable usa recipientes de 30 pulgadas en matriz 3 × 3. Más recipientes de menor tamaño aumentan la carga útil y reducen el costo de entrega en trayectos largos y estaciones de gran capacidad, pese a mayores costos de fabricación. Así, elegir bien la configuración del tráiler y la carga útil puede reducir el costo de distribución de hidrógeno hasta 16 %. La Tabla 3 resume seis casos representativos de tráilers Tipo IV con su carga útil, costos de recipientes y remolque, y uso de peso y volumen.

*Tabla 3: Valores aproximados a partir de las Figuras 5 y 6 de Reddi et al. (2018).*

| Presión de trabajo [PSI/bar] | Diámetro del recipiente [pulgadas] | Número de recipientes | Carga útil de hidrógeno [kg] | Costo del remolque y los recipientes [10 <sup>3</sup> USD] | Utilización de peso [%] | Utilización de volumen [%] |
|------------------------------|------------------------------------|-----------------------|------------------------------|------------------------------------------------------------|-------------------------|----------------------------|
| 7.300 (500)                  | 24                                 | 16                    | 1146                         | 1.100                                                      | 97                      | 59                         |
| 7.300 (500)                  | 30                                 | 9                     | 1080                         | 900                                                        | 85                      | 55                         |
| 6.600 (450)                  | 24                                 | 15                    | 1078                         | 1.100                                                      | 90                      | 50                         |
| 6.600 (450)                  | 30                                 | 9                     | 969                          | 800                                                        | 79                      | 45                         |
| 5.100 (350)                  | 30                                 | 9                     | 848                          | 700                                                        | 69                      | 41                         |
| 3.700 (250)                  | 30                                 | 9                     | 694                          | 600                                                        | 58                      | 38                         |
| 2.900 (200)                  | 30                                 | 9                     | 584                          | 500                                                        | 48                      | 35                         |

El costo de inversión de tracto es adoptado de acuerdo con (Yang y Ogden, 2007) y llevado a la moneda de cálculo del modelo. Para los costos de compresión se utiliza lo presentado por (Coutsiers et al., 2023a, 2023b) considerando un proporcional de acuerdo con el uso anual de compresión de cada tráiler.

### **Costos Operativos**

Los costos de operar y mantener se desagregan de acuerdo con la Ec. 5:

$$C_{OpEx} = C_{Comb} + C_{El} + C_{HR} + C_o \quad (5)$$

donde:

$C_{Comb}$ : Costo de combustible

$C_{El}$ : Costo de energía eléctrica, que incluye la generación, la transmisión y distribución en los casos que aplique

$C_{HR}$ : Costo de los recursos humanos

$C_o$ : Otros costos

El costo de combustible responde a la Ec. 6.

$$C_{Comb} = \eta P_{Diesel} d \quad (6)$$

donde:

$\eta$ : Rendimiento en volumen del combustible por unidad de distancia para un tracto promedio del mercado con carga completa de acuerdo con (NovaTrans, 2025)

$P_{Diesel}$ : Precio de diésel relevado de acuerdo con (CEPALSTAT, 2023)

$d$ : Distancia km.

El producto de estas dos variables con la distancia  $d$  analizada resulta en el costo del combustible.

La estimación del precio de la energía eléctrica se encuentra detallada en los trabajos (Coutsiers et al., 2023a, 2023b) desagregando las componentes de generación, transporte y distribución. En este trabajo se adoptan los componentes del precio eléctrico correspondientes a 2022 reportados por las referencias citadas; no se realiza una actualización regional/temporal adicional, por lo que los resultados deben interpretarse como orden de magnitud y podrán actualizarse en trabajos posteriores. De esta manera, el costo de energía eléctrica  $C_{El}$  se presenta en la Ec. 7.

$$C_{El} = E(P_G + M_T + M_D) \quad (7)$$

donde:

$E$ : Energía consumida  
 $P_G$ : Precio de la generación renovable  
 $M_T$ : Margen de transmisión  
 $M_D$ : Margen de distribución

El nivel de conexión del sistema considerado para estas estimaciones es de distribución en alta tensión y el precio de energía renovable corresponde con la generación Eólica Onshore de cada país, salvo el caso de Colombia donde se utilizaron los resultados de la Ronda 2019 Complementaria.

Los costos de recursos humanos fueron estimados de acuerdo con (Yang y Ogden, 2007) y corregidos con la  $PPC_c$  análogamente a lo presentado en los trabajos (Coutsiers et al., 2023a, 2023b).

Otros costos de menor impacto fijos y variables son adoptados en acuerdo con (Yang y Ogden, 2007).

### ***Economía de escala***

Para capturar la economía de escala se propuso ajustar el  $LCHT$  con la forma funcional de acuerdo con (Berthouex, 1972) y se ajustaron los parámetros  $a$  y  $b$  de la Ec. 8, presentada a continuación.

$$\text{Log}(LCHT) = a - b \text{Log}(M_{H_2}); \text{ con } b = M - 1 \quad (8)$$

donde:

$a$ : Es el parámetro de escala de costos. Representa el costo de una planta de referencia con una capacidad de 1 unidad. Este valor encapsula todos los costos fijos, como materiales, mano de obra, equipos, etc., que son independientes de la capacidad.  
 $b$ : Es el factor de economía de escala. Cuando  $b < 1$  indica que existe una economía de escala. Esto significa que a medida que la capacidad de la planta aumenta, el costo por unidad de capacidad disminuye. Si  $b = 1$ , no existiría economía de escala (el costo aumentaría linealmente con la capacidad), y si  $b > 1$ , habría una deseconomía de escala.  
 $M$ : Es el factor de economía de escala, es decir, el mismo parámetro que  $b$ . El trabajo de Berthouex usa la notación  $M$  (del inglés Multiplicative factor) o  $b$  de manera intercambiable para referirse al exponente en la relación de costos. Los parámetros  $a, b$  se obtienen mediante regresión lineal de las variables analizadas en la Ec. 8.

### ***Otros aspectos del modelado***

Deben desatacarse también otros aspectos del modelado adoptados de acuerdo con (Yang & Ogden, 2007), como lo son:

- i. Tiempos de carga y descarga: se considera 1 hora de tiempo tanto para la carga como la descarga
- ii. Disponibilidad de tracto: se considera en 80% del tiempo
- iii. Disponibilidad del sistema de carga y descarga: se considera 90% del tiempo

Estas consideraciones impactan directamente en el cálculo del  $LCHT$  de hidrógeno.

Si bien el modelo se ha programado para cualquier distancia, el análisis de este trabajo se basa en tres distancias típicas, 100, 300 y 1.000 km, que corresponden a rangos de alta competitividad, cuasi indiferencia y baja competitividad para esta tecnología de acuerdo con (Yang y Ogden, 2007).

## **RESULTADOS**

En este apartado se presentan los resultados de  $LCHT$ , sus desagregaciones, la evaluación de existencia de economía de escala y la cuantificación en el caso que aplique.

### Costo nivelado de transporte

En esta primera serie de resultados se presentan los costos nivelados de transporte de hidrógeno en promedios para diferentes rangos de capacidades, desagregados y los rangos de resultados de la muestra. Esto se realiza para cada uno de los países de la muestra y para 100, 300 y 1.000 km de distancia, tal cual se menciona anteriormente y se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4: Costo nivelado promedio de transporte de hidrógeno comparado por país, por distancia y por rango de capacidad. Fuente: Elaboración propia.

| LCHT [USD/kg] |           | Rango de Capacidad [kg] |         |         |         |         |         |         |         |           |         |
|---------------|-----------|-------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-----------|---------|
| Distancia     | País      | 100-200                 | 200-300 | 300-400 | 400-500 | 500-600 | 600-700 | 700-800 | 800-900 | 900-1.000 | > 1.000 |
| 100 km        | Argentina | 3,44                    | 2,40    | 1,69    | 1,49    | 1,31    | 1,24    | 1,15    | 1,14    | 1,05      | 1,00    |
|               | Brasil    | 3,12                    | 2,15    | 1,45    | 1,26    | 1,08    | 0,99    | 0,90    | 0,87    | 0,79      | 0,74    |
|               | Chile     | 2,75                    | 1,89    | 1,28    | 1,11    | 0,96    | 0,89    | 0,81    | 0,78    | 0,72      | 0,68    |
|               | Colombia  | 2,48                    | 1,73    | 1,20    | 1,05    | 0,93    | 0,87    | 0,80    | 0,79    | 0,73      | 0,70    |
|               | México    | 2,73                    | 1,89    | 1,30    | 1,13    | 0,99    | 0,92    | 0,84    | 0,83    | 0,76      | 0,73    |
|               | Perú      | 2,77                    | 1,91    | 1,30    | 1,13    | 0,98    | 0,90    | 0,82    | 0,80    | 0,73      | 0,69    |
| 300 km        | Argentina | 8,00                    | 5,54    | 3,85    | 3,36    | 2,92    | 2,73    | 2,51    | 2,45    | 2,23      | 2,11    |
|               | Brasil    | 7,53                    | 5,16    | 3,46    | 2,97    | 2,53    | 2,30    | 2,08    | 1,99    | 1,79      | 1,68    |
|               | Chile     | 6,59                    | 4,52    | 3,03    | 2,60    | 2,22    | 2,02    | 1,83    | 1,75    | 1,58      | 1,48    |
|               | Colombia  | 5,71                    | 3,94    | 2,70    | 2,34    | 2,02    | 1,87    | 1,71    | 1,66    | 1,51      | 1,43    |
|               | México    | 6,49                    | 4,46    | 3,02    | 2,61    | 2,24    | 2,05    | 1,87    | 1,80    | 1,63      | 1,53    |
|               | Perú      | 6,67                    | 4,58    | 3,08    | 2,65    | 2,26    | 2,06    | 1,87    | 1,79    | 1,62      | 1,52    |
| 1.000 km      | Argentina | 24,01                   | 16,55   | 11,44   | 9,92    | 8,56    | 7,96    | 7,30    | 7,07    | 6,38      | 5,99    |
|               | Brasil    | 23,02                   | 15,74   | 10,52   | 8,98    | 7,61    | 6,92    | 6,24    | 5,93    | 5,31      | 4,95    |
|               | Chile     | 20,07                   | 13,72   | 9,15    | 7,81    | 6,62    | 6,01    | 5,41    | 5,15    | 4,61      | 4,30    |
|               | Colombia  | 17,06                   | 11,72   | 7,96    | 6,86    | 5,87    | 5,40    | 4,92    | 4,73    | 4,26      | 3,99    |
|               | México    | 19,71                   | 13,50   | 9,07    | 7,77    | 6,61    | 6,03    | 5,46    | 5,22    | 4,68      | 4,37    |
|               | Perú      | 20,35                   | 13,92   | 9,31    | 7,96    | 6,75    | 6,14    | 5,54    | 5,28    | 4,73      | 4,41    |

A modo de ejemplo, para el caso particular de Brasil si se grafican las componentes del LCHT para recorrido de 300 km a diferentes capacidades, se obtiene lo presentado en la Figura 2.

### Componentes del costo nivelado de transporte

En este apartado se presentan para cada país la importancia de los componentes del costo nivelado de transporte en promedio para la totalidad de las variantes de tráilers analizadas. Además, se exhibe el rango de participación de estos componentes. En todos los casos se analizan 100, 300 y 1.000 km de distancia de transporte. Los resultados de este análisis se presentan en la Tabla 5.

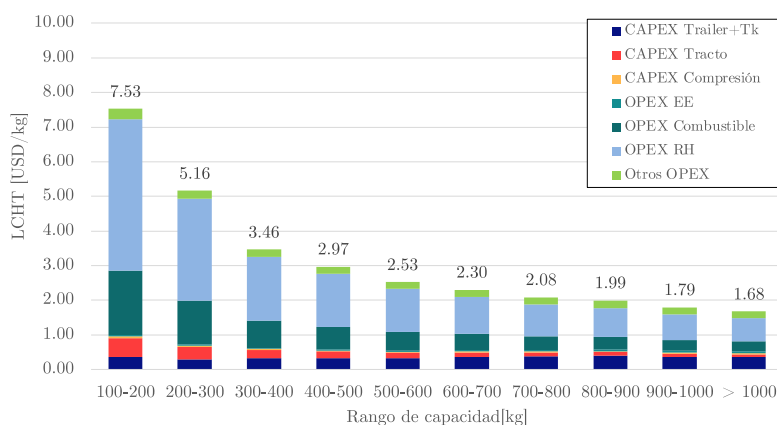


Figura 2: Costo nivelado promedio de transporte de hidrógeno para diferentes rangos de capacidad desagregado por componente. Caso Brasil con una distancia de transporte de 300 km. Fuente: Elaboración propia.

Los rangos de *LCHT* para diferentes rangos de capacidad para el caso particular de Brasil, se presentan en la Figura 3.

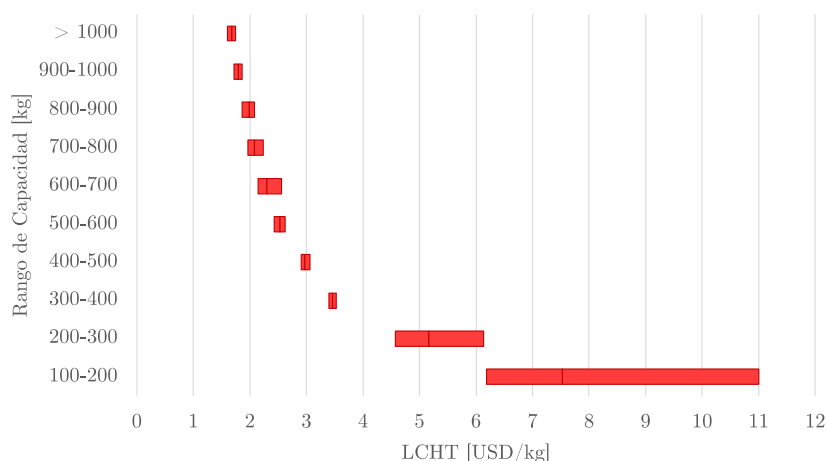


Figura 3: Rangos de costos nivelados de transporte resultantes para diferentes rangos de capacidad transportada. Caso de Brasil con una distancia de transporte de 300 km. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5: Comparado de los porcentuales promedios de importancia de los diversos componentes del costo nivelado de transporte. Estudio para 100, 300 y 1.000 km de distancia de transporte. Fuente: Elaboración propia.

| Distancia | País      | CAPEX Trailer+Tk | CAPEX Tracto | CAPEX Compresión | OPEX EE | OPEX Combustible | OPEX RH | Otros OPEX |
|-----------|-----------|------------------|--------------|------------------|---------|------------------|---------|------------|
| 100 km    | Argentina | 17,50%           | 7,16%        | 3,97%            | 7,21%   | 10,80%           | 47,14%  | 6,22%      |
|           | Brasil    | 11,65%           | 6,31%        | 2,60%            | 3,08%   | 17,14%           | 51,59%  | 7,63%      |
|           | Chile     | 9,90%            | 6,41%        | 2,21%            | 5,95%   | 17,02%           | 49,98%  | 8,53%      |
|           | Colombia  | 11,75%           | 7,18%        | 2,65%            | 10,03%  | 9,14%            | 50,45%  | 8,81%      |
|           | México    | 10,89%           | 6,61%        | 2,45%            | 8,61%   | 17,11%           | 46,08%  | 8,26%      |
|           | Perú      | 10,70%           | 6,54%        | 2,40%            | 5,86%   | 18,06%           | 48,06%  | 8,38%      |
| 300 km    | Argentina | 18,53%           | 7,39%        | 1,79%            | 3,28%   | 14,34%           | 48,69%  | 5,98%      |
|           | Brasil    | 11,69%           | 6,23%        | 1,11%            | 1,33%   | 21,75%           | 50,91%  | 6,98%      |
|           | Chile     | 10,14%           | 6,41%        | 0,97%            | 2,62%   | 21,91%           | 50,02%  | 7,95%      |
|           | Colombia  | 12,69%           | 7,53%        | 1,22%            | 4,65%   | 12,33%           | 52,93%  | 8,65%      |
|           | México    | 11,38%           | 6,71%        | 1,09%            | 3,86%   | 22,33%           | 46,78%  | 7,85%      |
|           | Perú      | 10,93%           | 6,53%        | 1,04%            | 2,57%   | 23,18%           | 47,96%  | 7,79%      |
| 1.000 km  | Argentina | 19,11%           | 7,53%        | 0,61%            | 1,12%   | 16,19%           | 49,57%  | 5,86%      |
|           | Brasil    | 11,73%           | 6,19%        | 0,37%            | 0,44%   | 23,98%           | 50,63%  | 6,66%      |
|           | Chile     | 10,28%           | 6,42%        | 0,33%            | 0,88%   | 24,33%           | 50,11%  | 7,66%      |
|           | Colombia  | 13,25%           | 7,73%        | 0,42%            | 1,62%   | 14,04%           | 54,37%  | 8,57%      |
|           | México    | 11,67%           | 6,78%        | 0,37%            | 1,32%   | 25,00%           | 47,23%  | 7,64%      |
|           | Perú      | 11,07%           | 6,53%        | 0,35%            | 0,86%   | 25,71%           | 47,98%  | 7,50%      |

### Economía de escala

Los resultados de la economía de escala se presentan para recipientes de acero y de Epoxi T300 en las Tabla 6 y Tabla 7, respectivamente.

Tabla 6: Resultados del ajuste de las funciones de costo y del indicador de economía de escala para los tráilers con recipientes de presión de acero. Fuente: Elaboración propia.

| Distancia | País      | $a$             | $b$               | $M$               | $r^2$ |
|-----------|-----------|-----------------|-------------------|-------------------|-------|
| 100 km    | Argentina | $2,53 \pm 0,02$ | $0,905 \pm 0,009$ | $0,095 \pm 0,009$ | 0,995 |
|           | Brasil    | $2,57 \pm 0,01$ | $0,941 \pm 0,006$ | $0,059 \pm 0,006$ | 0,998 |
|           | Chile     | $2,50 \pm 0,01$ | $0,936 \pm 0,006$ | $0,064 \pm 0,006$ | 0,998 |
|           | Colombia  | $2,41 \pm 0,02$ | $0,913 \pm 0,008$ | $0,087 \pm 0,008$ | 0,996 |

| Distancia | País      | $a$             | $b$               | $M$               | $r^2$ |
|-----------|-----------|-----------------|-------------------|-------------------|-------|
|           | México    | $2,47 \pm 0,02$ | $0,923 \pm 0,007$ | $0,077 \pm 0,007$ | 0,997 |
|           | Perú      | $2,50 \pm 0,02$ | $0,933 \pm 0,007$ | $0,067 \pm 0,007$ | 0,998 |
| 300 km    | Argentina | $2,94 \pm 0,02$ | $0,924 \pm 0,008$ | $0,076 \pm 0,008$ | 0,997 |
|           | Brasil    | $2,98 \pm 0,01$ | $0,952 \pm 0,005$ | $0,048 \pm 0,005$ | 0,999 |
|           | Chile     | $2,92 \pm 0,01$ | $0,951 \pm 0,005$ | $0,049 \pm 0,005$ | 0,999 |
|           | Colombia  | $2,82 \pm 0,02$ | $0,934 \pm 0,007$ | $0,066 \pm 0,007$ | 0,998 |
|           | México    | $2,89 \pm 0,01$ | $0,943 \pm 0,006$ | $0,057 \pm 0,006$ | 0,998 |
|           | Perú      | $2,92 \pm 0,01$ | $0,949 \pm 0,005$ | $0,051 \pm 0,005$ | 0,999 |
|           |           |                 |                   |                   |       |
| 1.000 km  | Argentina | $3,44 \pm 0,02$ | $0,933 \pm 0,007$ | $0,067 \pm 0,007$ | 0,998 |
|           | Brasil    | $3,47 \pm 0,01$ | $0,957 \pm 0,005$ | $0,043 \pm 0,005$ | 0,999 |
|           | Chile     | $3,42 \pm 0,01$ | $0,958 \pm 0,004$ | $0,042 \pm 0,004$ | 0,999 |
|           | Colombia  | $3,32 \pm 0,01$ | $0,944 \pm 0,006$ | $0,056 \pm 0,006$ | 0,998 |
|           | México    | $3,40 \pm 0,01$ | $0,952 \pm 0,005$ | $0,048 \pm 0,005$ | 0,999 |
|           | Perú      | $3,42 \pm 0,01$ | $0,956 \pm 0,005$ | $0,044 \pm 0,005$ | 0,999 |
|           |           |                 |                   |                   |       |

Tabla 7: Resultados del ajuste de las funciones de costo y del indicador de economía de escala para los trailers con recipientes de presión de Epoxi T300. Fuente: Elaboración propia.

| Distancia | País      | $a$             | $b$               | $M$               | $r^2$ |
|-----------|-----------|-----------------|-------------------|-------------------|-------|
| 100 km    | Argentina | $1,45 \pm 0,06$ | $0,480 \pm 0,020$ | $0,520 \pm 0,020$ | 0,924 |
|           | Brasil    | $1,79 \pm 0,04$ | $0,635 \pm 0,015$ | $0,365 \pm 0,015$ | 0,972 |
|           | Chile     | $1,65 \pm 0,04$ | $0,604 \pm 0,015$ | $0,396 \pm 0,015$ | 0,97  |
|           | Colombia  | $1,35 \pm 0,05$ | $0,498 \pm 0,018$ | $0,502 \pm 0,018$ | 0,94  |
|           | México    | $1,50 \pm 0,05$ | $0,543 \pm 0,017$ | $0,457 \pm 0,017$ | 0,956 |
|           | Perú      | $1,63 \pm 0,05$ | $0,593 \pm 0,016$ | $0,407 \pm 0,016$ | 0,967 |
| 300 km    | Argentina | $2,02 \pm 0,06$ | $0,562 \pm 0,020$ | $0,438 \pm 0,020$ | 0,943 |
|           | Brasil    | $2,32 \pm 0,04$ | $0,693 \pm 0,015$ | $0,307 \pm 0,015$ | 0,978 |
|           | Chile     | $2,23 \pm 0,04$ | $0,683 \pm 0,015$ | $0,317 \pm 0,015$ | 0,979 |
|           | Colombia  | $1,96 \pm 0,05$ | $0,598 \pm 0,017$ | $0,402 \pm 0,017$ | 0,962 |
|           | México    | $2,12 \pm 0,04$ | $0,642 \pm 0,016$ | $0,358 \pm 0,016$ | 0,972 |
|           | Perú      | $2,21 \pm 0,04$ | $0,673 \pm 0,015$ | $0,327 \pm 0,015$ | 0,977 |
| 1.000 km  | Argentina | $2,61 \pm 0,06$ | $0,607 \pm 0,020$ | $0,393 \pm 0,020$ | 0,949 |
|           | Brasil    | $2,88 \pm 0,04$ | $0,723 \pm 0,015$ | $0,277 \pm 0,015$ | 0,98  |
|           | Chile     | $2,82 \pm 0,04$ | $0,725 \pm 0,015$ | $0,275 \pm 0,015$ | 0,981 |
|           | Colombia  | $2,58 \pm 0,05$ | $0,655 \pm 0,017$ | $0,345 \pm 0,017$ | 0,967 |
|           | México    | $2,74 \pm 0,04$ | $0,696 \pm 0,016$ | $0,304 \pm 0,016$ | 0,976 |
|           | Perú      | $2,80 \pm 0,04$ | $0,715 \pm 0,015$ | $0,285 \pm 0,015$ | 0,979 |

A modo de ejemplo, en la Figura 4 se presentan los ajustes de la ecuación de economía de escala para acero y Epoxi T300 en el caso de México con 300 km de distancia transportada.

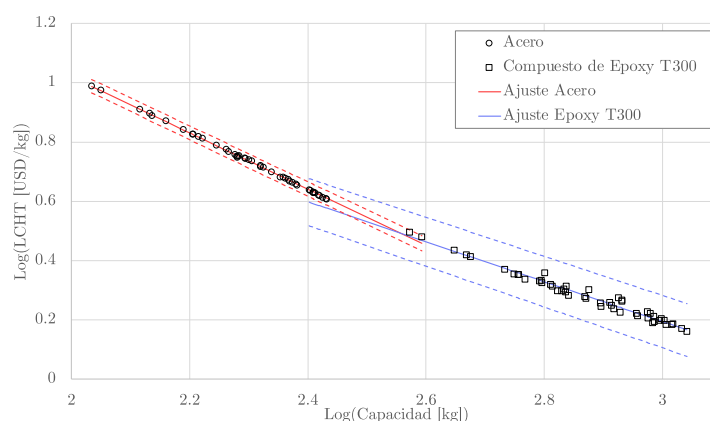


Figura 4: Resultados del LCHT y funciones de costo para el caso de Perú con una distancia de 300 km. Fuente: Elaboración propia.

## DISCUSIÓN

Los resultados muestran que el LCHT varía según la capacidad: 3,44–0,68 USD/kg para 100 km, 8–1,43 para 300 km y 24,01–3,99 para 1.000 km, en concordancia con las configuraciones de (Reddi et al., 2018). A 1.000 km, los niveles de LCHT son elevados, coincidiendo con lo reportado por (Yang & Ogden, 2007).

Un contraste de los resultados de este trabajo con (Yang y Ogden, 2007) puede observarse en la Tabla 8, donde pueden compararse el valor resultante para EE. UU. de la referencia para 300 kg y 300 km con los resultados de este trabajo para los rangos de 200-300 kg y 300-400 kg y la misma distancia.

Tabla 8: Contraste entre el LCHT obtenido de acuerdo con (Yang y Ogden, 2007) y este trabajo para un transporte de 300 kg. Fuente: Elaboración propia.

| LCHT [USD/kg]                              |           |                        |                        |
|--------------------------------------------|-----------|------------------------|------------------------|
| 300 kg / 300 km<br>(Yang y Ogden,<br>2007) | País      | 200-300 kg / 300<br>km | 300-400 kg / 300<br>km |
| 4,7                                        | Argentina | 5,54                   | 3,85                   |
|                                            | Brasil    | 5,16                   | 3,46                   |
|                                            | Chile     | 4,52                   | 3,03                   |
|                                            | Colombia  | 3,94                   | 2,70                   |
|                                            | México    | 4,46                   | 3,02                   |
|                                            | Perú      | 4,58                   | 3,08                   |

En todos los países, el LCHT muestra alta intensidad de costos operativos, superando ampliamente al costo de capital. El RR. HH. representa cerca de la mitad del LCHT, luego el OPEX de combustible ( $\approx 20\%$ ) y el CAPEX del tráiler, incluidos los recipientes de presión ( $\approx 10\%$ ). Estos valores coinciden con lo reportado por (Yang y Ogden, 2007), que destacan el peso del costo laboral en EE. UU.

En Argentina, la alta tasa de costo de capital eleva el CAPEX al 25–30 % del LCHT. En Colombia, el bajo precio del combustible reduce su impacto y otorga gran competitividad al LCHT.

Las curvas de costo se dividen en dos grupos: recipientes de acero con capacidades  $< 300$  kg  $H_2$  y de epoxi T300 con 360–1.100 kg  $H_2$ . Ambos ajustes presentan alta correlación, con  $r > 0,995$  para acero y  $> 0,92$  para epoxi T300.

Los ajustes muestran fuertes economías de escala en acero ( $M < 0,1$ ) y moderadas-altas en epoxi T300 ( $0,3 < M < 0,5$ ). Estas solo aplican dentro del rango de transporte permitido con (Reddi et al., 2018; U.S. DOT, 1994); superar ese límite exige otro conjunto tracto-tráiler y elimina la economía de escala. Brasil y Chile presentan los mejores valores y Argentina y Colombia, los peores.

## CONCLUSIONES

De acuerdo con la capacidad, el LCHT se encuentra entre 3,44 y 0,68 USD/kg para el caso de 100 km de transporte, entre 8 y 1,43 para 300 km y entre 24,01 y 3,99 para los 1.000 km.

Los niveles de LCHT resultantes en este trabajo se encuentran en línea con los valores presentados por (Yang y Ogden, 2007) para el caso de EE. UU.

La componente más importante, que explica la mitad del LCHT, en todos los casos es el recurso humano que no es más que el costo empresa de los pilotos. En segundo plano siguen el combustible y la inversión en el tráiler y los recipientes de presión. Los otros componentes tienen menor relevancia. Esta composición es también consistente con lo que se presenta por (Yang y Ogden, 2007).

Se verifican economías de escala en tráileres con recipientes de acero (muy fuertes) y epoxi T300 (moderadas-altas), válidas solo hasta el límite de peso del conjunto tracto-tráiler; superar ese límite exige más conjuntos y elimina la economía de escala.

Para distancias cercanas a 1.000 km, el LCHT es alto frente al LCOH, lo que sugiere métodos de transporte más económicos, como hidrógeno líquido, ductos o derivados, en línea con (Reddi et al., 2018; Yang y Ogden, 2007). En cambio, los niveles de LCHT resultan adecuados para distancias de 100 y 300 km.

Por último, vale mencionar que las cifras económicas están valoradas en USD a diciembre 2022. En caso de requerirse otra referencia deberán revisarse las fuentes y la moneda utilizada.

## REFERENCIAS

- Abdin, Z., Khalilpour, K., & Catchpole, K. (2022). Projecting the levelized cost of large scale hydrogen storage for stationary applications. *Energy Conversion and Management*, 270. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116241>
- Berthouex, P. M. (1972). Evaluating Economy of Scale. In *Journal (Water Pollution Control Federation)* (Vol. 44, Issue 11). <http://www.jstor.orgURL:http://www.jstor.org/stable/25037656>
- CEPALSTAT. (2023). Estadísticas e indicadores - CEPALSTAT Bases de Datos y Publicaciones Estadísticas. [https://statistics.cepal.org/portal/cepalstat/dashboard.html?indicator\\_id=1352&area\\_id=429&lang=es](https://statistics.cepal.org/portal/cepalstat/dashboard.html?indicator_id=1352&area_id=429&lang=es)
- Coutsiers, E., Gea, M., & Rodríguez, R. (2022). ESTIMACIÓN DE LA TASA DE COSTO DE CAPITAL PARA PROYECTOS DE ENERGÍA RENOVABLE EN LATINOAMÉRICA. *Avances En Energías Renovables y Medio Ambiente*, 26, 369–379. [www.caldenconsultoria.com](http://www.caldenconsultoria.com)
- Coutsiers, E., Gea, M., & Rodríguez, R. (2023a). COMPORTAMIENTO EN ESCALA DEL COSTO NIVELADO DEL ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO COMPRIMIDO EN LATINOAMÉRICA. *Avances En Energías Renovables y Medio Ambiente*. [www.caldenconsultoria.com](http://www.caldenconsultoria.com)
- Coutsiers, E., Gea, M., & Rodríguez, R. (2023b). COSTO NIVELADO DE ALMACENAMIENTO GEOLÓGICO SUBTERRÁNEO DE HIDRÓGENO EN LATINOAMÉRICA. *Avances En Energías Renovables y Medio Ambiente*. [www.caldenconsultoria.com](http://www.caldenconsultoria.com)
- NovaTrans. (2025). Cuánto Consume un Tráiler Cargado. <https://www.novatrans.es/blog/cuanto-consume-un-trailer-cargado/>
- Reddi, K., Elgowainy, A., Rustagi, N., & Gupta, E. (2018). Techno-economic analysis of conventional and advanced high-pressure tube trailer configurations for compressed hydrogen gas transportation and refueling. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(9), 4428–4438.
- U.S. Department of Transportation. Federal Highway Administration. (1994). FEDERAL SIZE REGULATIONS FOR COMMERCIAL MOTOR VEHICLES.
- Yang, C., & Ogden, J. (2007). Determining the lowest-cost hydrogen delivery mode. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(2), 268–286. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2006.05.009>

## ASSESSMENT OF ECONOMIES OF SCALE IN THE LEVELIZED COST OF COMPRESSED HYDROGEN ROAD TRANSPORTATION IN LATIN AMERICA

**ABSTRACT:** This study analyzes the levelized cost of hydrogen transport (LCHT) for Argentina, Brazil, Chile, Colombia, Mexico, and Peru, considering different transport capacities and distances. The



objective is to determine and estimate the economies of scale for two storage technologies: steel and T300 epoxi containers. The results show that the LCHT varies significantly with distance. For 100 km, the cost ranges from 0,68 to 3.44 USD/kg; for 300 km, from 1,43 to 8 USD/kg; and for 1.000 km, from 3,99 to 24,01 USD/kg. The primary component of the LCHT, representing approximately half the cost, is human resources (driver salaries), followed by fuel costs and the investment in the trailer and pressure vessels. Strong economies of scale were found with steel containers and moderate-to-high economies with epoxi containers. However, these economies are limited by the maximum allowed weight of the truck-trailer combination. For short distances (100 and 300 km), the LCHT seems viable. However, for distances of 1.000 km, the LCHT is high, suggesting the need to explore more economical transport methods such as liquid hydrogen, pipelines, or derivatives. Finally, it's worth mentioning that the economic figures are valued in USD as of December 2022. If another reference is required, the sources and currency used should be reviewed.

**Keywords:** Hydrogen, green hydrogen, hydrogen transport, hydrogen economy, hydrogen in Latin America

## **AVANCES SOBRE UN SIMULADOR DE PANELES SOLARES DE MEDIA CELDA Y ENSAYO BAJO CONDICIONES DE SOMBREADO ARBITRARIAS**

**Juan N. Cox<sup>1,2</sup>, Rodrigo T. Mentucci<sup>1,2</sup>, Ismael H. Eyra<sup>1,3</sup>, Mariela E. Videla<sup>1</sup>**

**Mónica G. Martínez Bogado<sup>1,4,5</sup>**

<sup>1</sup>Departamento Energía Solar (DES) - Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA)

<sup>2</sup>Departamento de Física - Facultad de Ciencias Exactas y Naturales - Universidad de Buenos Aires

<sup>3</sup>Centro de Investigación, Hábitat y Energía - Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo -  
Universidad de Buenos Aires

<sup>4</sup>Instituto de Nanociencia y Nanotecnología - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y  
Técnicas (CONICET - CNEA)

<sup>5</sup>Instituto de Tecnología Prof. Jorge Sábato - Universidad Nacional de San Martín (UNSAM - CNEA)

**RESUMEN:** La integración de sistemas fotovoltaicos en entornos urbanos muchas veces se encuentra limitada por el sombreado típico del paisaje, reduciendo la eficiencia de dichos sistemas. Este trabajo, se propone aportar en el área de conocimiento mediante el desarrollo de simulaciones en diferentes condiciones de sombreado sobre una cadena de paneles solares de silicio monocristalino de media celda. Se pretende contrastar las simulaciones con curvas experimentales medidas sobre un sistema fotovoltaico instalado en el Centro Atómico Constituyentes (San Martín, Buenos Aires, Argentina) y con programas comerciales. En este avance de trabajo se empleó una metodología de medición de curvas corriente-tensión de secciones del panel a fin de extraer los parámetros del modelo de diodo único de una celda. Estos parámetros se utilizaron para simular las curvas corriente-tensión y las curvas potencia-tensión de un panel sombreado con un programa en lenguaje Python de desarrollo propio. Por último, se contrastaron las curvas simuladas con curvas medidas sobre el panel en condiciones de sombreado obteniendo concordancia en la estimación del punto de máxima potencia y errores menores o iguales al 6,5% de la potencia máxima simulada.

**Palabras clave:** media celda, diodo único, sombreado, simulación, generación distribuida.

### **INTRODUCCIÓN**

En el contexto de sistemas fotovoltaicos instalados en zonas urbanas, una situación habitual es la sombra que el entorno proyecta sobre un conjunto de paneles, por ejemplo: árboles, parapetos, conductos de ventilación, cableados, edificaciones cercanas o cualquier otro elemento. En esta situación el rendimiento del sistema fotovoltaico puede disminuir significativamente su producción eléctrica. Asimismo, si la sombra perdura en el tiempo, el panel puede degradarse debido al fenómeno conocido como puntos calientes.

Por lo tanto, resulta relevante estudiar métodos computacionales que permitan modelar con precisión la respuesta de los paneles fotovoltaicos bajo diversas condiciones de sombreado, con el fin de estimar tanto la disminución en su generación energética como su degradación a nivel sistema. Si bien los simuladores actuales incorporan modelos de sombreado, estos aún presentan limitaciones para

representar de manera efectiva las complejas condiciones que surgen en entornos urbanos, donde la interacción de obstrucciones edilicias y la variabilidad espacial y horaria de las sombras introducen desafíos significativos. Estos métodos de simulación -debido a su mayor precisión en la evaluación de los efectos adversos producidos por sombras- permitirían a los proyectistas o urbanistas, tomar decisiones con antelación acerca de las diferentes posibilidades de incorporación de los planos de captación en entornos urbanos: por ejemplo, modificar inclinaciones u orientaciones con mayor precisión, o reubicar los campos de captación en superficies alternativas de mayor insolación. Finalmente, los diferentes proyectistas de la industria de la construcción podrán eliminar desde las etapas previas a la edificación fuentes de sombra que -aunque intuitivamente pudieran parecer poco significativas- suelen producir efectos adversos mayores a los previstos, como son las sombras lineales que cruzan la superficie de los campos y de los paneles en forma diagonal a sus lados principales, como las producidas por cables, tubos, postes, entre otros.

Al tratarse de un trabajo en desarrollo, se pretende extender posteriormente las simulaciones a cadenas de paneles y así poder comparar con la generación que tiene un sistema fotovoltaico instalado en el edificio 42 del Centro Atómico Constituyentes (CNEA), partido de General San Martín, provincia de Buenos Aires, Argentina. Dicho sistema está compuesto por 30 paneles de silicio monocristalino de media celda. Estos están distribuidos en dos cadenas de 15 paneles en serie que se conectan, únicamente, a la red eléctrica mediante un inversor de 25kW. Cada cadena tiene su propio seguidor de punto de máxima potencia (MPP) y cuenta con un trazador de curvas corriente tensión interno que permitirá realizar evaluaciones del modelo desarrollado en este trabajo.

Los paneles de media celda que posee el sistema son marca Jinko, modelo JKM470-7RL3 (Jinko, 2022) y se utilizaron para realizar todas las mediciones de corriente tensión. Actualmente, la mayoría de los paneles que se comercializan en el mercado actual poseen iguales características; debido a esto, se lo eligió para los primeros ensayos. La Figura 1 muestra uno de ellos junto con un esquema que describe la conexión típica de los paneles de media celda. Ésta consiste, básicamente, en ramas de  $N$  medias celdas conectadas en serie. Las ramas se conectan de a pares en paralelo, y tienen un diodo de paso asociado (también en paralelo). Por último, en un panel, este tipo de configuración se repite  $M$  veces en serie. En este caso, el número de medias celdas era  $N=26$  y el de configuraciones  $M=3$ . Cabe mencionar que la respuesta eléctrica de cada media celda es equivalente a la de una celda completa, pero con una corriente fotogenerada igual a la mitad.

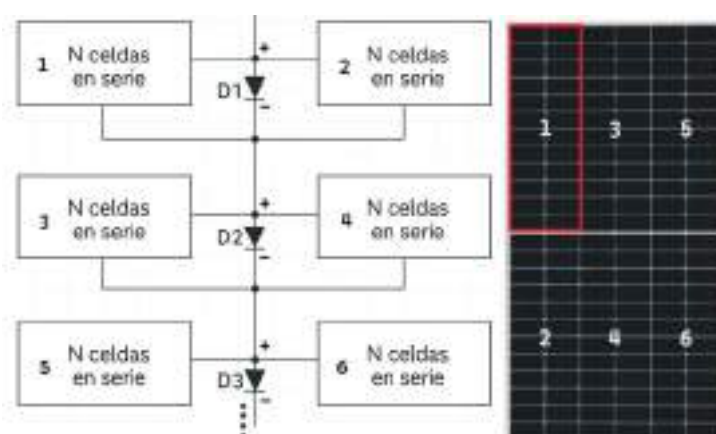


Figura 1: Esquema de conexiones eléctricas internas del panel solar de media celda.

En este trabajo se empleó una metodología de medición de 6 curvas corriente-tensión (I-V) de secciones del panel para extraer posteriormente los parámetros del modelo de diodo único de una celda (Sandia

National Laboratories, 2025). Estos parámetros se usaron para simular las curvas I-V y las curvas potencia-tensión (P-V) de un panel sombreado con un programa en lenguaje de programación Python de desarrollo propio. Por último, se compararon las curvas simuladas con curvas medidas sobre el panel en condiciones operativas normales y de sombreado.

## METODOLOGÍA

La parte experimental de este trabajo se centró en caracterizar eléctricamente un panel, simularlo y comparar estos resultados. Para la caracterización se realizaron dos tipos de experimentos: mediciones de curvas I-V del panel y medición de curva I-V del diodo de paso. Así, se extrajeron los parámetros para modelar la media celda y el diodo.

En el caso de la media celda, se empleó el modelo de diodo único. Éste propone un circuito equivalente de 4 componentes para representar una celda (Figura 2). Esos componentes son una fuente de corriente que representa la corriente fotogenerada, en paralelo con un diodo, que representa a la juntura p-n, una resistencia paralelo y una resistencia serie, asociada a pérdidas como la propia resistencia de la celda.

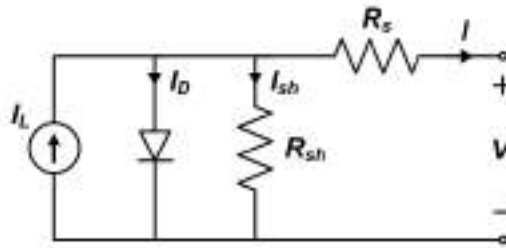


Figura 2: Circuito equivalente de una celda solar según el modelo de diodo único. (Sandia National Laboratories, 2025).

Bajo la hipótesis de homogeneidad, a igual irradiancia y temperatura cada celda tiene la misma respuesta eléctrica, se puede mostrar, por ley de Ohm, que el circuito equivalente del panel es idéntico al de la celda, a menos de factores de escala. Esta hipótesis fue fundamental para nuestro análisis porque, por un lado, permitió obtener parámetros de una media celda a partir de los parámetros de una rama de medias celdas; por otro lado, en las simulaciones, redujo el cálculo de curvas I-V sólo a aquellas medias celdas con distintas irradiancia y temperatura.

La Ec. (1) que rige el circuito equivalente del panel tiene la forma (Tian et al., 2012):

$$I = N_p I_L - N_p I_D \left[ \exp \left( \frac{V + I \frac{N_s R_s}{N_p}}{N_s a} \right) - 1 \right] - \frac{V + I \frac{N_s R_s}{N_p}}{\frac{N_s R_{sh}}{N_p}} \quad (1)$$

Donde los parámetros de la celda son:

$I_L$ = corriente fotogenerada

$I_D$ = corriente inversa de saturación del diodo

$R_s$ = resistencia serie

$R_{sh}$ = resistencia paralelo

$a$ = parámetro de idealidad modificado

$N_p$ = número de ramas en paralelo del panel

$N_s$ = número de celdas en serie en cada rama.

En total se tienen 5 parámetros a determinar ( $I_L$ ,  $I_D$ ,  $a$ ,  $R_s$  y  $R_{sh}$ ); por ende, se necesitan 5 ecuaciones. Además, cuando un panel está sombreado, dista de estar en condiciones estándar. Los parámetros del modelo deben modificarse debido a su dependencia, en particular, con la irradiancia y la temperatura. En el trabajo de DeSoto et al. (2006) se propone un sistema de ecuaciones para encontrar los parámetros en condiciones estandarizadas a partir de los datos que provee el fabricante. Asimismo, incluye las ecuaciones de corrección por irradiancia y la temperatura. En este trabajo se utilizó este enfoque para determinar los parámetros de media celda y corregirlos a condiciones de sombreado.

Para las simulaciones fue necesario sumar las curvas obtenidas con la Ec. (1). Como señala Bishop (1988), el comportamiento eléctrico de un circuito de celdas queda completamente determinado por su curva I–V, la cual resulta de combinar las curvas I–V de cada uno de sus componentes.

Cuando dos celdas se conectan en *paralelo*, sus corrientes se suman a igual tensión. En cambio, si se conectan en *serie*, se suman las tensiones a igual corriente. La Figura 3 ilustra este principio utilizando dos curvas individuales, junto con sus combinaciones en serie y en paralelo. Este procedimiento puede extenderse a otros componentes, como los diodos de paso, y así recrear paneles completos.

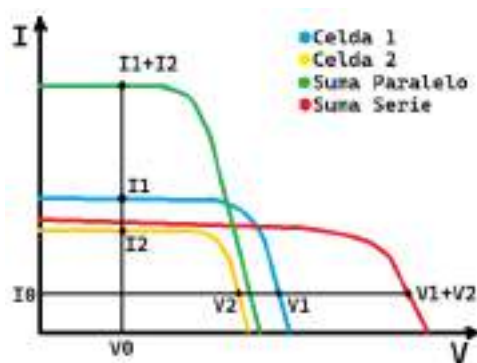


Figura 3: Suma de curvas I-V de celdas con distinta respuesta. En verde se muestra la suma de curvas en paralelo. En rojo se muestra la suma de curvas en serie.

En este trabajo se implementó este método en lenguaje Python siguiendo la arquitectura de la Figura 1. Se sumaron las curvas I-V de 26 medias celdas en serie. Luego, la curva resultante se sumó en paralelo con la de un diodo de paso. Esta última, en paralelo con la de otras 26 en serie, y así sucesivamente.

### Caracterización del panel solar

En lo que respecta a las mediciones sobre el panel, se empleó el montaje experimental mostrado en la Figura 4a. El panel fue seleccionado del sistema fotovoltaico ya mencionado. Éste no tenía defectos sobre el vidrio protector y se lo limpió previamente a realizar las mediciones. Por otra parte, debido a que dichas mediciones se realizaron en el mismo sitio, no se cumplieron las condiciones estándar de medición. Se tomaron las siguientes precauciones: realizar las mediciones en días soleados, sin nubes y en horarios donde la masa de aire relativa fuese cercana a AM1.5.

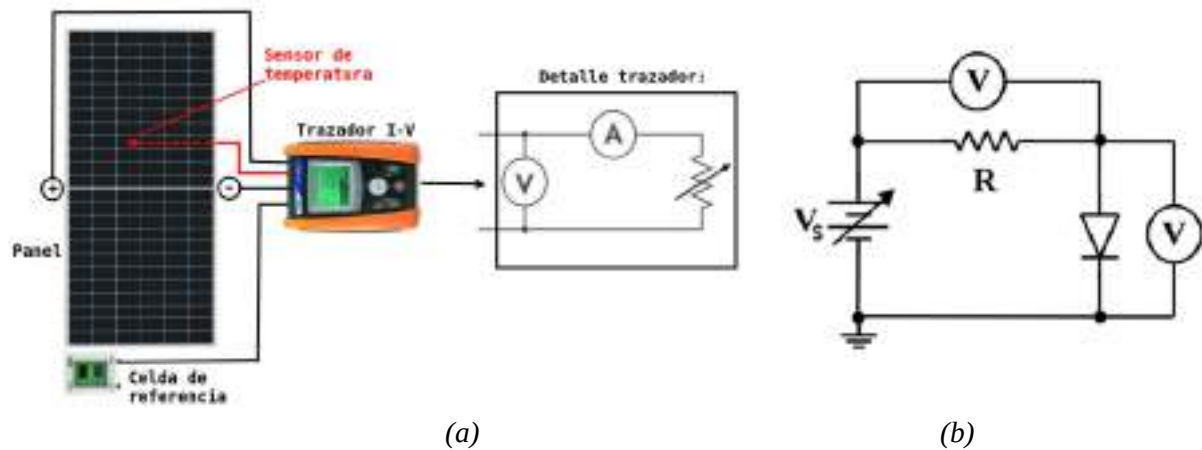


Figura 4: Esquemas experimentales para la caracterización de las ramas y los diodos de paso. (a) Esquema de la configuración experimental para medición de curvas I-V del panel. (b) Circuito de medición de la curva I-V del diodo.

La adquisición de datos se realizó con un trazador de curvas HT Solar i-V (HT, 2017). Este dispositivo se conecta a ambos bornes del panel y cuenta con una resistencia interna variable. Ésta le permite barrer las distintas rectas de carga en las que trabaja el panel solar. Para cada una de éstas mide, a cuatro terminales, la tensión y la corriente en dichos bornes. A su vez, el dispositivo cuenta con una celda de referencia calibrada (para medir irradiancia) y un sensor de temperatura. La celda de referencia se colocó sobre un panel aledaño, obteniendo así misma inclinación ( $20^\circ$ ) e irradiancia. El sensor de temperatura se adhirió a la cara posterior de una celda en la zona central del panel.

Las curvas I-V se corrigieron a condiciones estándar con las ecuaciones de la normativa IRAM (2018). En ellas, los valores de  $R_s$  y  $K$  (factor de corrección de curva) son necesarios para corregir la tensión, pero no estaban disponibles *a priori*. Por ello, se asumió  $R_s \sim 1\Omega$  en base a paneles similares (National Renewable Energy Laboratory, 2025) y se despreciaron los términos con  $K$ , ya que el efecto sobre la tensión resultaba despreciable en el rango de temperaturas de trabajo. Dichas correcciones eran de orden  $\leq 10^{-2}$ .

Por otra parte, se caracterizó al diodo de paso con un circuito como el de la Figura 4b. Dicho diodo se extrajo de otro panel del mismo modelo. En este caso, los distintos puntos de la curva se obtuvieron con una fuente de tensión regulable ( $V_s$ ). Esto permitió conocer el comportamiento del diodo tanto en polarización directa como inversa, pudiendo observarse la tensión de ruptura. A partir de ésto se eligió un modelo adecuado para la simulación.

#### **Determinación de parámetros para modelado**

Se exploraron tres formas de medir curvas I-V para obtener los parámetros del modelo de diodo único de las celdas. Una de ellas era caracterizar cada media celda por separado. Sin embargo, medir 156 curvas era excesivo para una aplicación práctica. La segunda opción fue medir curvas del panel entero, pero estas curvas incluían el efecto de los diodos de paso y suponían la misma respuesta eléctrica en cada rama del panel. Finalmente, se decidió medir la curva I-V de cada rama por separado, tapando las 5 restantes. Así, se mide sobre 26 medias celdas en serie, minimizando el efecto de los diodos de paso y permitiendo variaciones en la respuesta eléctrica entre ellas. Entonces, en total se obtuvieron 6 mediciones.

A continuación, se calcularon los parámetros de cada rama resolviendo el sistema de 5 ecuaciones presentadas en DeSoto et al. (2006). Para ello, se emplearon los tres puntos característicos de la curva I-V: el punto de máxima potencia, y los extremos ( $I_{SC}$ ,  $V_{OC}$ ). Estos últimos se obtuvieron por extrapolación lineal ya que debido a las correcciones (IRAM, 2018) no se podían inferir directamente. Un ejemplo de curva medida, junto con su ajuste, se muestra en la Figura 5, en la sección de Resultados.

La optimización de parámetros se resolvió con una rutina en Python basada en la función `root()` del módulo `scipy.optimize` (Virtanen et al., 2020). Como condición inicial se utilizaron los valores sugeridos por la función `fit_desoto()` de la librería `pvl` (Anderson et al., 2023). Se empleó el algoritmo de Levenberg-Marquardt, dado que fue el único que logró convergencia sistemática a valores físicamente razonables, comparables con valores correspondientes a paneles similares reportados en la literatura (National Renewable Energy Laboratory, 2025).

### ***Efectos del sombreado y simulaciones***

En cuanto al efecto del sombreado, se ensayaron diversas configuraciones: desde la obstrucción parcial de unas pocas celdas, hasta la obstrucción completa de varias zonas del panel en simultáneo. Para cada configuración se registraron la curva I-V, la temperatura del panel y la irradiancia. Las obstrucciones se realizaron con láminas de membrana asfáltica, únicamente orientándolas longitudinal o transversalmente, al igual que la distribución de celdas en el panel. Si bien no representan la variedad de sombras reales, sí permitieron estudiar la respuesta y sensibilidad del simulador de manera controlada. Además, este método es relativamente sencillo de reproducir en comparación con una sombra urbana arbitraria. Por otro lado, en términos de máxima potencia, un panel al 50 % de irradiancia es equivalente a la mitad del mismo panel a plena irradiancia.

Es necesario aclarar que, en este estudio, la duración del sombreado no se tuvo en cuenta. Por lo tanto, se asumió que la temperatura en todas las celdas era la misma que la del módulo. En el momento de simular, el único parámetro que se modificó para estimar la curva I-V de la media celda es la irradiancia que ésta recibía. La variación de sus parámetros se hizo según las ecuaciones de DeSoto et al. (2006).

Por último, obtenidos los parámetros de media celda y diodo, se reconstruyó la curva del panel, sumando celda por celda como se describió previamente. Debido a que la Ec. (1) es implícita para  $I$ , se requirió encontrar puntos fijos para obtener cada punto ( $V$ ,  $I$ ). La hipótesis de homogeneidad permitió resolver dicha ecuación sólo para las medias celdas con distinta irradiancia. Se incrementó la densidad de puntos en la región de máxima potencia dado que a fines prácticos es la región que más interesa describir. La suma de curvas a igual irradiancia se obtuvo multiplicando la curva individual por la cantidad de celdas. La suma de curvas con distinta irradiancia se hizo interpolando linealmente cada una de ellas.

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

En esta sección se presentan los resultados de las mediciones realizadas, una breve discusión de los valores obtenidos y la comparación de las mediciones con las simulaciones.

### ***Parámetros para las simulaciones***

Se obtuvieron los parámetros del modelo para las seis ramas de 26 medias celdas en serie que tiene un panel. Para obtener los parámetros de media celda, se aplicaron las relaciones de escalado de la Ec. (1), considerando  $N_S = 26$  y  $N_P = 1$ :  $a_{26} = 26a$ ,  $R_{S-26} = 26R_S$  y  $R_{SH-26} = 26R_{SH}$ . En la Figura 5 se muestra como ejemplo la curva I-V corregida de una rama junto con su ajuste.



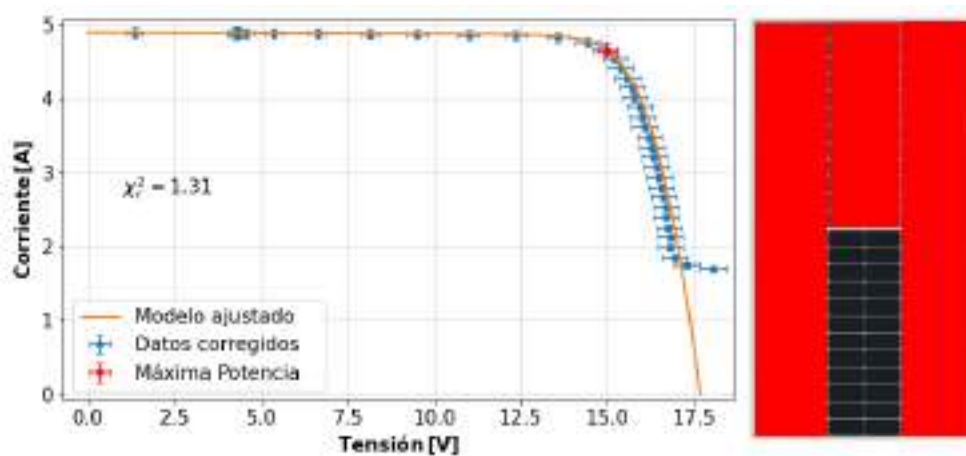


Figura 5: Curva I-V corregida (por irradiancia y temperatura) de un conjunto de 26 medias celdas, junto con el ajuste correspondiente al modelo de diodo único. A la derecha se muestra el patrón de sombreado utilizado para obtener esa medición.

La optimización numérica convergió en todos los casos, arrojando parámetros del orden de magnitud y comparables con valores reportados para paneles similares (National Renewable Energy Laboratory, 2025). Las soluciones de cada rama se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1: Parámetros de media celda para cada rama del panel. La última fila corresponde a la media y error estándar que se obtienen para cada parámetro.

| Rama                 | $I_L$ [A]                       | $I_D$ [A]                                         | $a$ [mV]                         | $R_s$ [m $\Omega$ ]         | $R_{SH}$ [ $\Omega$ ]         |
|----------------------|---------------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| 1                    | 5,02                            | $7,36 \times 10^{-12}$                            | 25,2                             | 6,82                        | 6,42                          |
| 2                    | 4,74                            | $6,98 \times 10^{-12}$                            | 25,0                             | 7,32                        | 12,91                         |
| 3                    | 5,22                            | $7,65 \times 10^{-12}$                            | 24,8                             | 7,29                        | 6,93                          |
| 4                    | 4,90                            | $7,23 \times 10^{-12}$                            | 24,9                             | 5,86                        | 21,64                         |
| 5                    | 4,84                            | $7,08 \times 10^{-12}$                            | 24,8                             | 5,00                        | 4,94                          |
| 6                    | 5,13                            | $7,58 \times 10^{-12}$                            | 25,0                             | 9,11                        | 30,14                         |
| <b>Media y Error</b> | <b><math>5,0 \pm 0,2</math></b> | <b><math>(7,3 \pm 0,3) \times 10^{-12}</math></b> | <b><math>25,0 \pm 0,2</math></b> | <b><math>7 \pm 1</math></b> | <b><math>14 \pm 10</math></b> |

Se puede observar de la última fila de la Tabla 1 que la resistencia paralelo presenta una dispersión comparable a su media. Esto podría deberse a que las celdas no son homogéneas. No obstante, como indica Green (1995), una forma de evaluar cuánto afecta este parámetro a la curva de la celda es compararlo con la resistencia característica de la celda,  $(V_{OC}/I_{SC})_{celda} \sim 0,14 \Omega$ . Para la menor de las resistencias paralelo (fila 5, Tabla 1) se tiene que es mayor a 30 veces la resistencia característica. Por lo tanto, en general se supondrá que su influencia es pequeña. De este modo, y como las mediciones de cada rama se consideraron equivalentes, se decidió simular cada media celda empleando los parámetros promedio de la Tabla 1 (fila 7).

Por otra parte, se midió la curva I-V del diodo de paso para seleccionar un modelo adecuado para la simulación. La Figura 6a muestra dicha curva. Se observó la tensión de ruptura del diodo en  $(-54,0 \pm 0,5)$  V. Además, la mayor tensión a la que puede someterse un diodo en polarización inversa es la de 26 medias celdas en serie ( $\sim 18$  V). Por lo tanto, se encuentra fuera del rango de ruptura. Esto permitió utilizar un modelo más simple como el de Shockley (Alley y Atwood, 1973), que no contempla este fenómeno.

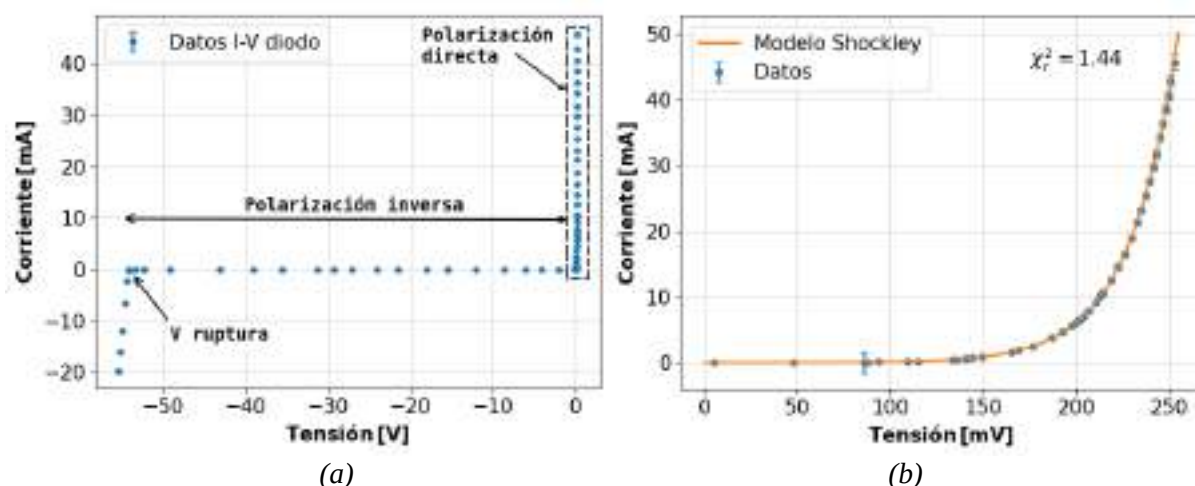


Figura 6: Caracterización del diodo de paso. (a) Curva I-V completa del diodo de paso. (b) Curva I-V en región de polarización directa y ajuste con modelo de Shockley.

Entonces, la región de interés de la curva I-V para la simulación es la asociada a la polarización directa (Figura 6b). Se realizó un ajuste no lineal de los datos con la ecuación  $I = I_0[\exp(V/nV_{th}) - 1]$  (Shockley). Los parámetros obtenidos se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2: Parámetros de diodo de paso empleados para simulaciones.

| $I_0$ [A]                        | $\frac{1}{nV_{th}}$ [V <sup>-1</sup> ] |
|----------------------------------|----------------------------------------|
| $(3,04 \pm 0,02) \times 10^{-6}$ | $38,10 \pm 0,05$                       |

Finalmente, ya teniendo caracterizados ambos componentes constitutivos del panel, se pudieron realizar simulaciones sobre el panel completo y compararlas con las mediciones de curva I-V.

### Simulaciones con sombreado

Se realizaron seis tipos de obstrucción distintas del panel para representar una variedad de casos no realistas, pero que permitieran probar el potencial alcance de la simulación. En las Figuras 7 y 8 se comparan dos de las curvas I-V, P-V medidas con las simuladas.

La Figura 7 muestra el caso de un panel con unas pocas celdas sombreadas parcialmente. La obstrucción parcial permitió estudiar la sensibilidad de la simulación serie dentro de una rama del panel. A su vez, la repetición del patrón en otras ramas da más generalidad y permitió estudiar la sensibilidad de la simulación al acoplamiento de las ramas en paralelo.

La Figura 8 es un caso que permitió estudiar la respuesta de la simulación cuando la diferencia de corriente generada por las distintas ramas en paralelo es más significativa. Además, esta figura permite apreciar el efecto de los diodos de paso simulados.

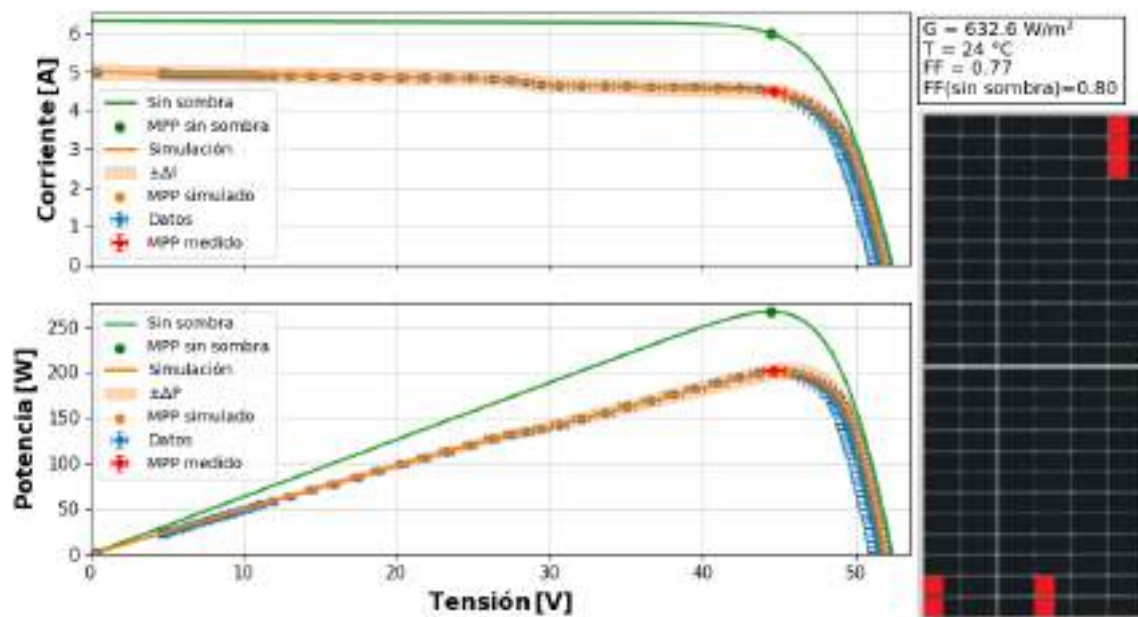


Figura 7: Curva I-V (superior) y P-V (inferior) con su correspondiente esquema de medias celdas cubiertas a la derecha. En ambos se identifica en rojo su punto de máxima potencia.

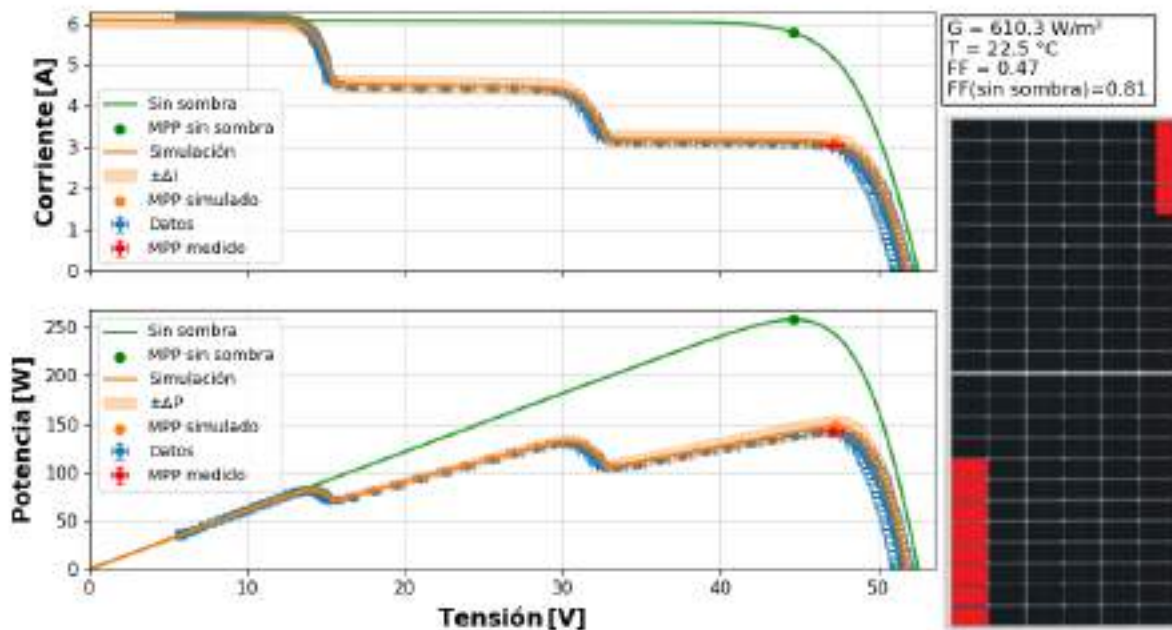


Figura 8: Curva I-V (superior) y P-V (inferior) con su correspondiente esquema de medias celdas cubiertas a la derecha. En ambos se identifica en rojo su punto de máxima potencia.

Para la medición de la Figura 7 se obtuvo una potencia máxima simulada de  $(201 \pm 9)$  W, mientras que para la medición de la Figura 8 se obtuvo una potencia máxima simulada de  $(150 \pm 10)$  W. Además, en dichas Figuras se puede ver que los puntos de máxima potencia ( $V_{MPP}$ ,  $P_{MPP}$ ) se encontraron dentro del rango de incerteza de la máxima potencia medida con el trazador (puntos rojos de las Figuras 7 y 8). Lo mismo ocurrió para el resto de las configuraciones de sombreado probadas; estos resultados se pueden observar en la Tabla 3. Cabe agregar que los errores de las potencias simuladas se calcularon asumiendo máxima precisión en la tensión, y propagando linealmente los errores a partir de la Ec. (1) y utilizando las incertezas de los parámetros encontradas en la Tabla 1. Estos fueron como máximo 6,5% de  $P_{MPP}$ .

Tabla 3: Comparación entre los puntos de máximas potencias medidas y simuladas para las seis configuraciones probadas.

| <b>P<sub>MPP</sub> Medida [W]</b> | <b>P<sub>MPP</sub> Simulada [W]</b> | <b>V<sub>MPP</sub> Medida [V]</b> | <b>V<sub>MPP</sub> Simulada [V]</b> |
|-----------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| <b>201 ± 4</b>                    | <b>201 ± 9</b>                      | <b>44,6 ± 0,6</b>                 | <b>45,3</b>                         |
| <b>142 ± 3</b>                    | <b>150 ± 10</b>                     | <b>47,1 ± 0,7</b>                 | <b>47,2</b>                         |
| <b>207 ± 4</b>                    | <b>210 ± 9</b>                      | <b>45,2 ± 0,7</b>                 | <b>45,3</b>                         |
| <b>131 ± 3</b>                    | <b>139 ± 9</b>                      | <b>43,2 ± 0,6</b>                 | <b>44,4</b>                         |
| <b>170 ± 4</b>                    | <b>173 ± 6</b>                      | <b>28,7 ± 0,5</b>                 | <b>29,3</b>                         |
| <b>135 ± 3</b>                    | <b>141 ± 9</b>                      | <b>45,2 ± 0,7</b>                 | <b>45,9</b>                         |

## CONCLUSIONES

En este trabajo se desarrolló un procedimiento experimental y computacional para simular la respuesta de un panel solar de media celda bajo diversas condiciones de sombreado a partir del modelo de diodo único. Para esto, se realizaron 6 mediciones de curvas I-V en las distintas ramas del panel. Los parámetros del modelo de diodo único se obtuvieron resolviendo el sistema propuesto por DeSoto et al. (2006), utilizando como entrada los puntos característicos de la curva ( $I_{SC}$ ,  $V_{OC}$  y máxima potencia) corregidos por irradiancia y temperatura, según las recomendaciones de la norma IRAM (2018). Si bien los ajustes dieron parámetros físicamente razonables, comparables con otros módulos reportados (National Renewable Energy Laboratory, 2025), se observó una dispersión significativa en el parámetro de  $R_{SH}$ . Esto podría mejorarse midiendo múltiples veces las curvas I-V de cada rama, lo que permitiría reducir el error estándar de la celda promedio. Otra opción podría ser emplear el método de determinación de  $R_S$  de la IRAM (2018) y obtener el resto de parámetros con 4 ecuaciones. Más aún, podrían usarse otros conjuntos de cinco puntos de la curva obtenida con el trazador de curvas I-V. Sin embargo, como la menor de las resistencias paralelo encontradas era mayor a 30 veces la resistencia característica de la media celda, los parámetros promedio resultaron útiles para una primera aproximación del comportamiento eléctrico del panel.

Con los parámetros característicos ya definidos, se desarrolló un programa en lenguaje Python que simula la curva I-V completa del panel a partir de su arquitectura interna. El programa desarrollado logró simular adecuadamente las curvas I-V de distintas configuraciones de sombreado y para el caso particular del punto de máxima potencia, en todas las configuraciones de sombreado probadas, el resultado obtenido se encontró en concordancia con las potencias máximas medidas. No obstante, cabe mencionar que los errores de dichas simulaciones alcanzaron el 6,5% del valor de  $P_{MPP}$ . Una forma de mejorarlo, nuevamente, sería aumentar el muestreo de curvas I-V de cada rama y reducir el error estándar de los parámetros del modelo de diodo único.

En conjunto, los resultados indicaron que este enfoque permitiría reproducir el comportamiento de un panel solar parcialmente sombreado, utilizando 5 parámetros y sin requerir una descripción detallada de cada celda individual. Esto podría resultar útil tanto para el análisis de rendimiento como para la predicción de escenarios críticos de degradación o sobrecarga térmica del panel sombreado.

Entre otros trabajos futuros se plantea extender las simulaciones a cadenas de paneles, contrastarlas empíricamente con sombras urbanas típicas en el sistema fotovoltaico del Centro Atómico Constituyentes y también comparar su respuesta con la de los programas comerciales.

## AGRADECIMIENTOS

Al Departamento Energía Solar – CNEA, en especial, Juan C. Plá, Elena M. Godfrin, Julio C. Durán y Alejandro Krautner por su asesoramiento a lo largo de todo el proceso de confección de este trabajo.

## REFERENCIAS

- Alley, C. y Atwood, K. (1973). Ingeniería Electrónica, 3<sup>a</sup> Edición, Capítulo 3: Diodos. Limusa.
- Anderson, K. et al. (2023). Pvlb python: update 2023 [consulta: julio de 2025]. Pvlb Python Development Team. <https://pvlb-python.readthedocs.io/>
- Bishop, J. W. (1988). Computer Simulation of the Effects of Electrical Mismatches in Photovoltaic Cell Interconnection Circuits. *Solar Cells*, 25, 73-89.
- DeSoto, W., Klein, S. A., & Beckman, W. A. (2006). Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance. *Solar Energy*, 80(1), 78-88.
- Green, M. A. (1995). *Solar Cells: Operating Principles, Technology, and System Applications*. Prentice Hall.
- HT. (2017). Solar I–Vw, Solar I–Ve User Manual [Manual de usuario del trazador].
- IRAM. (2018). Energía solar, Módulos fotovoltaicos, Parte 6-comportamiento en condiciones de ensayo normalizadas - STC(MQT 06.1). Instituto Argentino de Normalización y Certificación.
- Jinko Solar. (s.f.). Tiger Mono-facial 450-470 Watt [Hoja de datos del panel].
- NREL. (2025). PV Performance Modeling & Data [consulta: julio de 2025]. National Renewable Energy Laboratory. <https://github.com/NREL/SAM/tree/patch/samples/CEC%5C%20Module%5C%20and%5C%20Inverter%5C%20Libraries/CEC%5C%20Modules/CEC%5C%20Modules%5C%202024-11-14>
- Vitrenan, P. et al. (2020). SciPy: Scientific Computing Tools for Python [consulta: julio de 2025]. SciPy Community. <https://www.scipy.org>
- SNL. (2025). Single-Diode Model of Solar Cell [consulta: julio de 2025]. Sandia National Laboratories. <https://pvpmc.sandia.gov/modeling-guide/2-dc-module-iv/single-diode-equivalent-circuit-models/>
- Tian, H. et al. (2012). A Detailed Performance Model for Photovoltaic Systems: Preprint.

## PROGRESS ON THE DEVELOPMENT OF A HALF-CELL SOLAR MODULE SIMULATOR AND TESTING UNDER ARBITRARY SHADING CONDITIONS

**ABSTRACT:** The integration of photovoltaic systems in urban environments is often limited by typical landscape shading, which reduces their efficiency. This work aims to contribute to this area of knowledge by developing simulations under different shading conditions on a string of half-cell monocrystalline silicon solar panels. The objective is to compare the simulations with experimental curves measured on a photovoltaic system installed at the Constituyentes Atomic Center (San Martín, Buenos Aires, Argentina) and with commercial software. In this work, a methodology for measuring current-voltage curves of panel sections was used to subsequently extract the parameters of the single-diode model of a cell. These parameters were used to simulate the current-voltage and power-voltage curves of a shaded panel using a proprietary Python program. Finally, the simulated curves were compared with curves measured on the panel under shaded conditions, obtaining high agreement in the estimation of the maximum power point and errors less than or equal to 6.5% of the simulated maximum power.

**Keywords:** half-cell, single-diode, shading, simulation, distributed generation.

## MÉTODO PARA ESTIMAR LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA FOTOVOLTAICA EN ARGENTINA

**Emmanuel Ferreira<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Departamento Energía Solar. Comisión Nacional de Energía Atómica. Av. Gral. Paz 1499, (1650) San Martín. Argentina

<sup>2</sup>Escuela de Ciencia y Tecnología, Universidad Nacional de San Martín (UNSAM), Martín de Irigoyen 3100, (1650) San Martín. Argentina  
e-mail: edavidf1995@gmail.com

**RESUMEN:** Este estudio propone una metodología para estimar la energía solar generada por los usuarios-generadores registrados bajo la Ley Nacional 27.424 de Argentina, en el marco del desarrollo de la energía fotovoltaica distribuida en el país. La metodología combina modelos desarrollados en Estados Unidos y Brasil y se aplica posteriormente a la provincia de Córdoba, la jurisdicción con mayor capacidad instalada de sistemas fotovoltaicos distribuidos en Argentina. Los resultados obtenidos en una muestra aleatoria representativa de instalaciones reflejaron que la generación total de energía se aproxima estrechamente al máximo teórico. Este último corresponde a la producción energética anual máxima, calculada considerando las condiciones óptimas de los ángulos de orientación e inclinación. Los datos analizados sugieren una tendencia que probablemente se mantenga en el conjunto de los sistemas registrados. La producción promedio anual se calculó en 1.388 kWh por kWp para Río Cuarto y la región suroeste, y en 1.332 kWh por kWp para el resto de la provincia de Córdoba.

**Palabras clave:** energía solar, generación distribuida fotovoltaica, usuarios-generadores, Ley 27.424.

### INTRODUCCIÓN

La gran extensión territorial de Argentina y la concentración del consumo eléctrico en los centros urbanos hacen de la generación fotovoltaica (FV) distribuida una solución viable para mejorar la eficiencia energética y reducir el uso de combustibles fósiles.

La principal regulación nacional sobre generación distribuida (GD) en Argentina es la Ley 27.424, "Régimen de fomento a la generación distribuida de energía renovable integrada a la red eléctrica", promulgada en 2017 y reglamentada en 2018. Esta ley establece un modelo de facturación neta (*net billing*), en el que los usuarios consumen la energía que generan e inyectan el excedente a la red, recibiendo una compensación al precio del mercado mayorista.

A junio de 2025, 18 provincias se han adherido a esta ley (Secretaría de Energía, 2025), con un total de 29.187 usuarios-generadores y una potencia instalada de poco más de 92 MW. Córdoba lidera con el 33 % de esta capacidad, seguida por Buenos Aires (21 %) y San Juan (10 %).

Según la Ley Nacional 27.424, para que un usuario de la red de distribución eléctrica pueda convertirse en usuario generador, es necesario que finalice exitosamente el trámite exigido en la reglamentación. En Argentina, el bajo valor asignado a la energía inyectada a la red y la ausencia de incentivos específicos han llevado a que un número considerable de usuarios opte por esquemas de autoconsumo con limitadores de inyección, evitando además declarar sus instalaciones ante la autoridad regulatoria. Esta situación sugiere que las estimaciones basadas únicamente en los usuarios-generadores

formalmente registrados subestiman la cantidad real de energía solar generada. No obstante, la metodología propuesta constituye un aporte para el análisis del sector.

Si bien ya existen estimaciones de la energía producida por las instalaciones de GD fotovoltaica (FV) en países como EE. UU. y Brasil, todavía no existen para Argentina. Ambos países fueron elegidos debido al libre acceso a la información relacionada con los procedimientos y la abundancia de la documentación disponible en línea. En este trabajo se aplicará la estimación propuesta a la provincia de Córdoba y se analizarán los resultados.

#### **Estimación de energía FV distribuida en EE. UU.**

El método de estimación utilizado por la *U.S. Energy Information Administration* (EIA, 2025, p.25) consiste en aplicar dos modelos. El primer modelo consiste en una regresión que estima la potencia fotovoltaica instalada mensual a partir de reportes anuales, dado que no se dispone de datos mensuales de dicha potencia para todas las instalaciones. A continuación, se integran los datos mensuales disponibles con las estimaciones mensuales correspondientes, obteniéndose así valores mensuales consolidados para todas las instalaciones. Se utiliza un segundo modelo para estimar la GD de energía con la potencia instalada FV total estimada anteriormente como dato de entrada, mediante el software de simulación *PVWatts*.

Se usaron también como datos de entrada las características relevantes de las 100 *Metropolitan Statistical Areas* (MSA) de mayor población, que se ponderaron según datos de orientación (inclinación y azimut) provenientes del conjunto de datos de *California Solar Initiative* para obtener las producciones típicas (kWh/kWp) para cada una de las 100 MSA. Usando datos de insolación del *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) se calcula un valor promedio para cada condado. Luego con los valores de potencia y energía por estado y sector, se calcula una tasa de kWh/kWp para cada estado y sector.

A la potencia total informada en el reporte de generación eléctrica anual, se le resta la potencia FV calculada mediante regresión y de las instalaciones conocidas como *Third Party Owned* (TPO), empresa con acuerdo contractual con cliente de electricidad para operar un generador que no es medido por la empresa de servicios públicos del cliente. De esta manera, se obtiene una nueva potencia “neta” que representa la capacidad de generación que no está asociada con los recursos de GD o con la capacidad operada por TPO.

Se multiplica la nueva potencia “neta” por la tasa de kWh/kWp obtenida previamente y a este valor de energía obtenido se le suma la energía vendida informada por los TPO para una estimación final de generación. Con la estimación final de la generación y la potencia total se define una nueva tasa “combinada” kWh/kWp.

#### **Estimación de energía FV distribuida en Brasil**

El modelo de estimación utilizado por la *Empresa de Pesquisa Energética* (2022, p.66) de Brasil se realiza mediante la cuantificación de la contribución energética de cada sistema de generación existente presente en la base de datos de *Agência Nacional de Energia Elétrica* (ANEEL, s.f.).

Se implementa un modelo que tiene en cuenta: potencia instalada, factor de capacidad (cociente entre la generación real en un período dado, típicamente 1 año, y la generación que habría tenido el sistema si hubiese funcionado las 24 horas del día a su potencia nominal), número de días de operación de la potencia total instalada en el año base, factor de degradación diario de la tecnología de generación utilizada y el número total de días en operación desde su instalación hasta el final del año base.

$$FC = \frac{PR \cdot GTI}{(24 \cdot I_{STC})} \quad (1)$$

Para estimar el factor de capacidad de los sistemas fotovoltaicos se utiliza la Ec. (1) que tiene en cuenta; el *Performance Ratio* (PR) dado por un valor de 0 a 1 que incorpora pérdidas por temperatura, suciedad, conversión CC/CA y eficiencia del inversor, la irradiancia global sobre plano inclinado (GTI) obtenida a partir del Atlas Brasileño de Energía Solar – 2ª Edición (Pereira et al., 2017) con una resolución



espacial de 10 km × 10 km, donde el ángulo de inclinación es la latitud del sitio, la irradiancia en condiciones estándar ( $I_{STC}$ ) igual a 1 kW/m<sup>2</sup> y el factor de degradación anual de la tecnología fotovoltaica igual al 0,5% por año (Jordan y Kurtz, 2012).

## METODOLOGÍA

### ***Conjunto de datos utilizados***

Los procedimientos de estimación presentados en la sección anterior, aunque diferentes entre sí, se ajustan a la disponibilidad de información en cada país. Ambos fueron analizados en detalle, ya que se tomaron elementos de cada uno para desarrollar un nuevo enfoque metodológico viable de aplicar con los datos actualmente disponibles en Argentina. Del caso de Estados Unidos, se incorporó el uso del simulador SAM (EIA, 2025) en particular la herramienta *PVWatts* y la referencia a producciones típicas. Por su parte, del modelo brasileño se adoptó la premisa de que es posible generalizar la estimación asumiendo condiciones óptimas en términos de inclinación y orientación de los módulos o al menos un valor cercano al óptimo, que maximice la generación de energía.

### ***Registro de usuarios-generadores***

Para el presente trabajo se contó con un extracto de la base de datos de los usuarios-generadores registrados en la Ley 27.424 hasta marzo de 2024, cuando la potencia instalada en la provincia de Córdoba era de 14,6 MW aproximadamente. Estos datos se ingresan en la plataforma digital de acceso público (PDAP) durante el proceso de pedido de medidor bidireccional. El extracto contenía 30 campos de los cuales fueron utilizados en el análisis los que se detallan a continuación:

1. Número de expediente electrónico (Nro. EE): Número de expediente en el sistema de gestión documental electrónica (GDE), con toda la información recibida hasta el momento.
2. Provincias: Se cuentan todas las provincias adheridas a la Ley N.º 27.424 y la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (CABA).
3. Localidad: Ciudades, localidades o barrios de las provincias y CABA incluidas en la Ley N.º 27.424.
4. Potencia Total Generación: Potencia de generación de energía declarada por el usuario-generador e instalador, la cual fue aprobada por la distribuidora correspondiente.
5. Potencia Acople: Potencia de acople (potencia nominal del equipo de acople, el inversor FV) aprobada por la distribuidora en el formulario 2B, necesario para registrarse como usuario-generador.
6. Distribuidor: Nombre de la empresa que brinda servicio eléctrico al usuario-generador.

### ***Histogramas de potencia***

Con el objetivo de analizar la distribución en potencia de las instalaciones y evaluar la frecuencia de ocurrencia en cada rango y región considerada, se definieron intervalos de clase de 2 kW en el rango de 0 a 50 kW (0–2 kW, 2–4 kW, etc.), junto con clases adicionales para los rangos de 50 a 100 kW, 100 a 200 kW y mayores a 200 kW (Figura 1).



Figura 1: Histograma de potencia con cuatro rangos para la provincia de Córdoba.

### Selección de datos de radiación solar

En este trabajo, se evaluaron comparativamente tres fuentes de datos de radiación solar para cuantificar su impacto en la precisión de las estimaciones energéticas.

La Tabla 1 presenta un extracto de una de las tablas comparativas de radiación global en el plano inclinado (GTI). En ella pueden observarse los valores de GTI para 3 localidades de la provincia de Córdoba provistos por Meteonorm (Meteotest, 2015) y Global Solar Atlas (World Bank Group, 2020), mientras que en el Atlas de Radiación Solar de la República Argentina de Grossi Gallegos y Righini (2007) los mapas representan rangos de GTI mediante zonas delimitadas por intervalos.

Esta característica resulta especialmente útil, ya que permite utilizar un valor de referencia para áreas extensas. Para efectos de la comparación en la Tabla 1 y debido a la naturaleza regional del Atlas, se adoptó el valor promedio del rango más representativo para cada zona, considerándolo el criterio más conservador y aplicable a nivel de provincia. Por ejemplo, el valor correspondiente a la ciudad de Córdoba puede aplicarse a la mayoría de las localidades de la provincia, y el de Río Cuarto para el resto, evitando así la necesidad de asignar valores individuales a cada localidad y permitiendo incluir al Atlas en una comparación con fuentes que ofrecen datos puntuales.

Tabla 1: Algunas localidades de la zona 1 de la provincia de Córdoba que tienen usuarios-generadores certificados

| Localidad     | Promedio de Irradiación anual en plano inclinado con ángulo óptimo (kWh/m²) |                               |                       |
|---------------|-----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|-----------------------|
|               | Meteonorm 7.2                                                               | Global Solar Atlas (SOLARGIS) | Atlas Grossi-Gallegos |
| Agua de Oro   | 1973                                                                        | 2063                          | 1750-1800             |
| Alcira        | 1950                                                                        | 2115                          | 1750-1800             |
| Alejo Ledesma | 1938                                                                        | 2032                          | 1750-1800             |

Se tendrán en cuenta los valores de GTI anuales para definir zonas geográficas y los de radiación solar global (GHI) mensuales determinados por Hugo Grossi Gallegos y Raúl Righini, publicados en los mapas del Atlas de Radiación Solar de la República Argentina para las simulaciones. Además, se consideró a los valores de radiación medidos en superficie terrestre como los más precisos.

### Orientación (azimut) e inclinación (cenit) del campo fotovoltaico

Como parte del análisis, se incluyeron también los ángulos de inclinación y orientación de los paneles solares, aunque con menor peso que las variables principales (potencia fotovoltaica y radiación solar).

Si bien estos parámetros no estaban incluidos en la base de datos de usuarios-generadores, podían recuperarse mediante el número de expediente, accediendo al formulario técnico correspondiente a cada instalación. Dado el volumen de datos y la disponibilidad limitada de esta información, se optó por realizar una selección aleatoria de instalaciones con el fin de caracterizar los ángulos de inclinación y orientación de los paneles.

En el formulario los valores de orientación posibles se definen con las etiquetas “N”, “NE”, “E”, “SE”, “S”, “SO”, “O” y “NO” cuyos valores numéricos corresponden a  $N=0^\circ$  hasta  $NO=315^\circ$ , con intervalos de  $45^\circ$  en sentido horario. Los valores de inclinación se definen de  $0^\circ$  a  $90^\circ$  con intervalos de  $5^\circ$  (la PDAP no permite intervalos menores a  $5^\circ$  al ingresar los datos de la instalación). Un ángulo de inclinación  $0^\circ$  corresponde a un panel en posición horizontal y  $90^\circ$  en posición vertical.

### **Zonas de irradiación**

Para todas las zonas definidas mediante los valores de GTI, se usó la GHI correspondiente a la estación más cercana a la localidad con mayor potencia instalada y mayor población (UNLu, 2025). La Figura 2 reproduce un mapa de radiación solar publicado en un artículo de Grossi Gallegos y Righini (2011). La provincia de Córdoba cuenta con tres zonas diferenciadas de radiación, dos de las cuales están identificadas en la Figura 2. La zona 1 es la más abarcativa y representativa en cantidad de potencia instalada, la zona 2 es la de mayor radiación solar y ocupa el suroeste de la provincia, existe una tercera zona más al norte, en donde no hay instalaciones declaradas. La zona 1 cuenta con 143 localidades diferentes y la zona 2 con 19.



*Figura 2: Irradiación solar anual sobre plano inclinado óptimo en la provincia de Córdoba. Se observan las dos zonas de radiación solar.*

Para las zonas 1 y 2 se seleccionaron valores de GHI correspondientes a las estaciones de Córdoba y Río Cuarto, respectivamente. Se clasificó a las instalaciones FV primariamente según su zona, luego se definieron zonas de GHI dentro de las provincias o regiones y por último dentro de cada zona se dividieron por intervalos de potencia de generación.

### **Simulaciones**

Para la simulación se emplearon datos meteorológicos horarios generados con PVsyst 6.8.8 (a partir de Meteonorm 7.2), validados con el Atlas de Radiación Solar de Argentina y exportados a formato SAM para su uso en PVWatts. El análisis abarcó 709 instalaciones en la zona 1 y 80 en la zona 2 de Córdoba.

Dada la distribución no normal de los datos, se diseñó una estrategia de muestreo para las instalaciones de hasta 200 kW. Primero, se ponderó cada rango de potencia según su contribución a la potencia total instalada. Se seleccionaron para el análisis los rangos cuya potencia es superior al 4 % del total. De estos rangos relevantes, se tomó una sub-muestra aleatoria de aproximadamente un tercio de las instalaciones, un tamaño considerado suficiente para capturar la variabilidad de diseño (inclinación/orientación) de forma computacionalmente eficiente.

Las simulaciones en PVWatts se ejecutaron de dos formas: para potencias mayores a 200 kW, se usaron los parámetros angulares declarados de cada instalación; para las instalaciones seleccionadas menores a 200 kW, se calculó su generación promedio.

Luego, se comparó la generación promedio de la muestra con un valor máximo teórico (obtenido con orientación e inclinación óptimas) para cada rango. Este cociente sirvió para crear un factor de corrección, que se aplicó a los segmentos de potencia menores a 200 kW.

Por último, se calculó la producción específica anual (kWh/kWp.año) para cada zona GHI sumando la energía generada y la potencia total del parque fotovoltaico. La Figura 3, presentada a continuación, detalla este proceso.

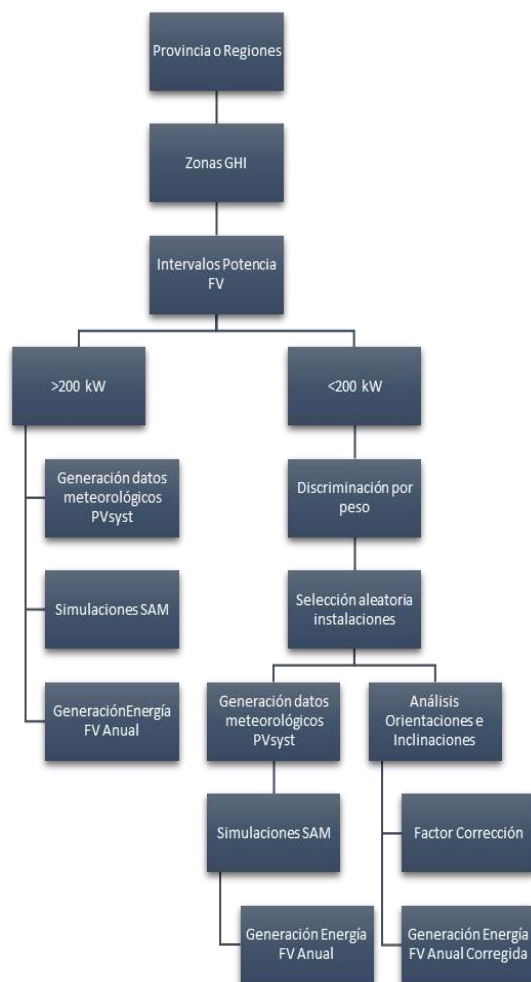


Figura 3: Diagrama de procesos para obtener la estimación de energía generada anualmente por todos los usuarios-generadores.

## RESULTADOS PARA LA PROVINCIA DE CÓRDOBA

El método propuesto se aplicó a la provincia de Córdoba por tener la mayor cantidad de potencia instalada.

### **Selección del número de instalaciones**

En la Tabla 2, resaltadas en color amarillo las celdas con el número de instalaciones seleccionadas por intervalo de potencia (cuya potencia es superior al 4 % del total). Por nuestra metodología siempre seleccionamos todas las instalaciones en el intervalo de potencias mayores a 200 kW (en Tabla 2, marcadas con color verde) para cada zona de GHI.

*Tabla 2: Extracto de datos de instalaciones FV registradas en la zona 1 de la provincia de Córdoba.*

| Intervalos de potencias (kWp) | Cantidad instalaciones certificadas | Potencia media intervalo (kWp) | Producto entre potencia media e instalaciones (kWp) | Potencia de intervalo sobre potencia total | Instalaciones seleccionadas (=33%) |
|-------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------|
| 0-2                           | 109                                 | 1,6                            | 169                                                 | 1,3 %                                      | 36                                 |
| 2-4                           | 185                                 | 2,8                            | 523                                                 | 4,1 %                                      | 62                                 |
| 4-6                           | 126                                 | 5,0                            | 635                                                 | 5,0 %                                      | 42                                 |
| ⋮                             | ⋮                                   | ⋮                              | ⋮                                                   | ⋮                                          | ⋮                                  |
| 48-50                         | 5                                   | 48,7                           | 244                                                 | 1,9 %                                      | 2                                  |
| 50-100                        | 44                                  | 65,9                           | 2901                                                | 22,6 %                                     | 15                                 |
| 100-200                       | 20                                  | 134,8                          | 2696                                                | 21,0 %                                     | 7                                  |
| >200                          | 5                                   | 348,7                          | 1743                                                | 13,6 %                                     | 2                                  |
| Total                         | 709                                 | 1127,8                         | 12810                                               | 100 %                                      | 124                                |

Obtenido el número de instalaciones a seleccionar, se utilizaron diferentes funciones aleatorias para tomar los registros a analizar de la base de datos de usuarios-generadores.

#### ***Análisis de orientaciones e inclinaciones y factor de corrección***

Luego de armado el conjunto de registros se realizó un análisis de las orientaciones e inclinaciones de las instalaciones para evaluar la energía generada por rango y zona GHI, teniendo en cuenta diferentes configuraciones angulares.

La Tabla 3 muestra la energía media anual generada por las instalaciones FV seleccionadas en la zona 1 de la provincia de Córdoba. Los datos corresponden a instalaciones con una potencia promedio superior a 200 kW. El valor máximo de energía media anual generada está resaltado en amarillo.

*Tabla 3: Diferentes combinaciones de ángulos de inclinación y orientación, junto con la energía generada por las mismas para el intervalo de potencias >200 kW en zona 1 de la provincia de Córdoba.*

| Orientación | Inclinación | Energía media anual generada (MWh) |
|-------------|-------------|------------------------------------|
| 0           | 30          | 524                                |
| 0           | 25          | 523                                |
| 45          | 25          | 516                                |

En la Tabla 4 se exponen los valores de referencia de las instalaciones fotovoltaicas seleccionadas. Estos datos se utilizan para la estimación de la energía media anual generada en el rango de potencias superiores a 200 kW, dentro de la Zona 1 de la provincia de Córdoba. La columna DC / AC es el cociente entre “Potencia FV” y “Potencia inversor”.

*Tabla 4: Valores relevantes de las instalaciones seleccionadas para la estimación de la energía generada en el intervalo de potencias >200 kW en zona 1 de la provincia de Córdoba.*

| Orientación | Potencia FV (kWp) | Inclinación | DC / AC | Potencia inversor (kW) | Energía anual generada (MWh) | Energía media anual generada (MWh) |
|-------------|-------------------|-------------|---------|------------------------|------------------------------|------------------------------------|
| 0           | 828               | 25          | 1,10    | 750                    | 1136                         | 509                                |
| 90 y 270    | 264               | 15          | 1,20    | 220                    | 323                          |                                    |
| 45          | 108,8             | 5 y 10      | 1,36    | 80                     | 287                          |                                    |
|             | 108,8             | 20 y 25     | 1,36    |                        |                              |                                    |
| 0           | 213,8             | 20          | 0,88    | 243                    | 290                          |                                    |
| Total       | 1523.4            |             |         |                        | 2036                         |                                    |

El factor de corrección se obtuvo a partir del cociente entre los valores de la columna “Energía media anual generada” de la Tabla 4 y el valor máximo resaltado en amarillo en la misma columna de la Tabla 3. Este procedimiento se aplicó de forma individual a cada intervalo de potencias y a cada zona de irradiación solar.

La desviación así obtenida se utilizó para verificar que es posible estimar todas las instalaciones FV con la combinación óptima de orientación e inclinación (azimut = 0° e inclinación = 30° en la Tabla 3) para todos los valores de “Potencia FV” y “DC / AC” (Tabla 4). En la Tabla 5 se presentan todos los factores de corrección expresados en porcentajes.

*Tabla 5: Factores de corrección para cada zona e intervalo de potencias.*

| Intervalo Potencia/Zona GHI | Factor de corrección |                |
|-----------------------------|----------------------|----------------|
|                             | Zona 1 Córdoba       | Zona 2 Córdoba |
| 2-4 kW                      | 97,4 %               | -              |
| 4-6 kW                      | 98,2 %               | -              |
| 50-100 kW                   | 97,6 %               | 99,1 %         |
| 100-200 kW                  | 94,1 %               | -              |
| >200 kW                     | 97,2 %               | 100,0 %        |
| Promedio                    | 96,9 %               | 99,5 %         |

### **Producción específica**

Los datos se presentan con la cifra de producción específica porque es independiente de la potencia FV instalada. Con los datos de los reportes de avance de implementación de la Ley 27.424 (Argentina.gob.ar, 2025), que tienen una actualización mensual, se pueden calcular los valores estimados de energía generada anualmente como el producto de la producción específica por la potencia total de las instalaciones FV.

*Tabla 6: Producción específica anual de energía fotovoltaica para cada zona GHI.*

| Irradiación sobre plano inclinado (GTI)/zona GHI | Producción específica anual (kWh/ (kWp.año)) |                |
|--------------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------|
|                                                  | Zona 1 Córdoba                               | Zona 2 Córdoba |
| Orientación e inclinación óptimas (GTIopt)       | 1375                                         | 1431           |
| GTIopt con factor de corrección (GTIcorr)        | 1332                                         | 1388           |

## **CONCLUSIONES**

Si bien hay diferencias en los valores de los factores de corrección para los diferentes intervalos de potencia y zonas de irradiación, se puede ver claramente que los datos tienden hacia un valor cercano a 100%, en el caso de Córdoba se encuentran entre un 96-98%. En el caso de la zona 2 de Córdoba es probable que el promedio de los factores de corrección se aleje de este valor por la poca cantidad de instalaciones FV que se encuentran registradas actualmente, por esta razón se consideró un factor de corrección de 97% para la zona 2. El factor de corrección debería ser casi el mismo para locaciones con valores de latitud similares. Cuanto más alejadas del ecuador se encuentren las regiones en las que se desea estimar la energía generada, menores tienden a ser los valores probables de los factores de corrección y mayores los márgenes de incertidumbre, es decir, con una variabilidad más elevada en los resultados.

## **REFERENCIAS**

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). (s.f.). Geração distribuída. Recuperado el 2 de agosto de 2025, de [http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/GD\\_Fonte.asp](http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/GD_Fonte.asp)

- Argentina.gob.ar. (s.f.). Reportes de avance implementación de la Ley 27.424. Recuperado el 2 de agosto de 2025, de <https://www.argentina.gob.ar/economia/energia/generacion-distribuida/reportes-de-avance-implementacion-de-la-ley-27424>
- Empresa de Pesquisa Energética. (2022). Balanço Energético Nacional: Manual de Preenchimento. <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-578/BEN%20-%20Manual%202022.pdf>
- Grossi Gallegos H. y Righini R. (2011). Mapa de energía solar colectada anualmente por un plano inclinado. Un ángulo óptimo en la República Argentina. En Cuarto Congreso Nacional - Tercer Congreso Iberoamericano Hidrógeno y Fuentes Sustentables de Energía - HYFUSEN 2011 (pp. 1-6). Luján, Argentina: GERSolar-INEDES; Universidad Nacional de Luján.
- Grossi Gallegos H., y Righini R. (2007). Atlas de energía solar de la República Argentina. CYT-AR. [https://cyt-ar.com.ar/cyt-ar/images/b/b6/Atlas\\_de\\_energ%C3%ADa\\_solar\\_de\\_la\\_Rep%C3%ABlica\\_Argentina\\_-\\_Grossi\\_Gallegos%26\\_Righini.pdf](https://cyt-ar.com.ar/cyt-ar/images/b/b6/Atlas_de_energ%C3%ADa_solar_de_la_Rep%C3%ABlica_Argentina_-_Grossi_Gallegos%26_Righini.pdf)
- Jordan D. C., y Kurtz S. R. (2012). Photovoltaic Degradation Rates - An Analytical Review (NREL/JA-5200-51664). National Renewable Energy Laboratory. <https://www.nrel.gov/docs/fy12osti/51664.pdf>
- Meteotest. (2015). Meteotest Version 7.2: Global meteorological database for solar energy and applied climatology [Software]. Bern, Switzerland: Meteotest.
- Pereira E. B., Martins F. R., Gonçalves A. R., Costa R. S., Lima F. J. L. de, Rüther R., Abreu S. L. de, Tiepolo G. M., Pereira S. V., y Souza J. G. de. (2017). Atlas Brasileiro de Energia Solar (2ª ed.). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). <https://doi.org/10.34024/978851700089>
- Secretaría de Energía. (2025). Reporte anual 2024: Generación distribuida en Argentina [PDF], Secretaría de Energía, Ministerio de Economía (Argentina). Recuperado el 11 de agosto de 2025, de [https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/reporte\\_anual\\_2024.pdf](https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/reporte_anual_2024.pdf)
- U.S. Energy Information Administration (2025). Electric Power Monthly: Appendix C - Technical notes. Washington, DC: U.S. Department of Energy. Recuperado de <https://www.eia.gov/electricity/monthly/pdf/AppendixC.pdf>
- Universidad Nacional de Luján (UNLu). (s.f.). Valores medios de la irradiación solar global diaria (MJ/m<sup>2</sup>·día). Recuperado el 2 de agosto de 2025, de [https://www.unlu.edu.ar/~gersol/backup/Atlas\\_Solar/valores-medios.html](https://www.unlu.edu.ar/~gersol/backup/Atlas_Solar/valores-medios.html)
- World Bank Group. (2020). Global Solar Atlas [Dataset]. Solargis. <https://globalsolaratlas.info/>

## METHOD FOR ESTIMATING DISTRIBUTED PHOTOVOLTAIC GENERATION IN ARGENTINA

**ABSTRACT:** This study presents a methodology to estimate solar energy produced by prosumers registered under Argentina's National Law 27424, within the broader framework of distributed photovoltaic deployment in the country. The method is applied to Córdoba province - the province with the highest installed distributed photovoltaic capacity in Argentina - by integrating established models from the United States and Brazil. Analysis of a representative random sample of installations indicates that actual energy output closely approaches theoretical maxima, a pattern likely representative of all registered systems. Estimated average annual production is 1388 kWh/kWp for Río Cuarto and the southwestern region, and 1332 kWh/kWp for the rest of Córdoba.

**Keywords:** solar energy, distributed photovoltaic generation, prosumers, Argentine Law 27424.