

PROPUESTA DE OPTIMIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO HIGROTÉRMICO – LUMÍNICO, DE UN EDIFICIO ESCOLAR DE LA REGIÓN N.E.A., A PARTIR DE MONITOREO Y SIMULACIÓN EN PERÍODO DE OTOÑO.

M.L. Boutet¹; A.L. Hernández²; G.J. Jacobo³

Cátedra Estructuras II. Área de la Tecnología y la Producción. Facultad de Arquitectura y Urbanismo. Universidad Nacional del Nordeste (U.N.N.E.) – Av. Las Heras 727 – 3500 Resistencia, Chaco / Tel: +54 0362 425573/
e-mail: lauraboutet@yahoo.com.ar / gjjacobo@arq.unne.edu.ar

Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO) – CONICET. Universidad Nacional de Salta (UNSa.), Avda. Bolivia N° 5.150 - 4400, Salta Capital / Tel. 0387-4255424 / Fax 0387-4255389 / e-mail: alejoher65@gmail.com

Recibido 14/08/13, aceptado 25/09/13

RESUMEN: En el presente trabajo se describe el comportamiento higrotérmico y lumínico de un edificio escolar de Nivel Primario, localizado en la ciudad de Resistencia, Chaco, que fue monitoreado durante un año. Se analizan los resultados de las mediciones realizadas durante el período de otoño 2012 y su contrastación con simulaciones mediante Simedif, Ecotect y su interface Radiance, en condiciones reales de ocupación. Se obtuvo un ajuste promedio entre datos de temperatura medidos y simulados del orden de 0.5 °C, a partir del cual se simula para el mismo periodo otoñal, el comportamiento térmico del edificio con una envolvente optimizada mediante la regulación de sus áreas vidriadas. Con la propuesta de optimización se verificaron mejores condiciones de confort higrotérmico, así como mejores niveles de iluminancia y uniformidad en la distribución espacial de la luz natural, lo cual se reflejaría en un ahorro del consumo eléctrico para iluminación.

Palabras clave: energía solar, acondicionamiento pasivo, aventanamientos

INTRODUCCION

En el marco de un Acuerdo de Trabajo suscripto entre la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad Nacional del Nordeste (FAU – UNNE) y el Ministerio de Educación, Cultura, Ciencia y Tecnología de la Provincia del Chaco (MECCyT), se realizaron 63 monitoreos del comportamiento higrotérmico y lumínico de ocho edificios escolares de la ciudad de Resistencia, mediante instrumental de última generación aportado por el Ministerio. Los monitoreos incluyeron además, entrevistas y encuestas a docentes y alumnos y charlas informativas. La finalidad es transferir los resultados de la investigación como base científica para la formulación e implementación de nuevos programas de infraestructura escolar, mediante el aprovechamiento de la *Energía Solar Pasiva* a fin de disminuir los consumos eléctricos en el sector educativo.

Una de las principales interrelaciones en el diseño de edificios con aprovechamiento de energía solar, es el área de vidrio en relación al área de piso y al área de fachada de un local. La Normativa de infraestructura escolar vigente, basada en las Normas IRAM, establece que si la iluminación de un local está dada fundamentalmente sobre la base de la luz diurna, es conveniente que, desde el punto de vista lumínico, la relación máxima entre área vidriada (considerada a partir de 1 m de altura) y área de piso no sea excesiva, recomendándose como máximo: 18% en locales con orientación al Este u Oeste y 25% en locales con orientación al Norte o Sur. MCEN (1996).

En el caso de la ciudad de Resistencia, cuya trama urbana se encuentra a media orientación (45 grados con respecto al Norte geográfico) por lo que las ventanas de los edificios colectan radiación solar en cualquier época del año, no sería válida la aplicación de los valores recomendados por la normativa. Además, ésta limita los tamaños de aventanamientos definiendo la relación de áreas vidriadas por área de piso. Sin embargo, la geometría demuestra que, a igual área de piso, un aula de base rectangular tiene más área de paredes expuestas al sol que uno de base cuadrangular de la misma altura. Esto puede originar mayores flujos de calor a través de los muros asoleados en el primer caso y, por consiguiente, dar lugar a sobrecalentamientos durante el otoño en un clima “muy cálido – húmedo” como el de la Región N.E.A. Por tal motivo, la investigación se orienta a la determinación de criterios para dimensionar áreas adecuadas de vidriado por área de piso y área de fachada expuesta, que permitan lograr las condiciones de habitabilidad higrotérmica y lumínica necesarias.

Partiendo de dichas consideraciones, son objetivos del presente trabajo:

- Analizar los resultados de las mediciones efectuadas durante el período de otoño 2012 de un prototipo representativo del nivel Primario;
- Obtener un modelo térmico del edificio a través del ajuste de los datos simulados mediante *SIMEDIF*, *ECOTECT* y su interface *RADIANCE* en condiciones reales de ocupación y
- Utilizar el modelo obtenido para simular el comportamiento térmico y lumínico del prototipo, en el mismo período otoñal, pero con una envolvente mejorada mediante la regulación de sus áreas vidriadas.

¹ Arq. Esp., Prof. Univ., Becaria Doctoral CONICET – UNNE (Doctorado en Ciencias. Área Energías Renovables, UNSa.)

² Dr. Lic. en Física, Prof. Univ., Investigador INENCO – UNSa. – CONICET; Director de Tesis.

³ MSc. M.Ing. Arq., Prof. Univ., Investigador FAU – UNNE; Co-director de Tesis

METODOLOGÍA DE MEDICIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS

Equipo de Medición. Para la medición de las variables meteorológicas se utilizó una *Micro Estación ONSET (USA) H21-002* que incluye: *Sensor de Radiación Solar, Piranómetro de Silicio HOBO S-LIB-M003, Sensor de Temperatura y Humedad Relativa ONSET S-THB-M002 con abrigo meteorológico HOBO MOD. M-RS3 y Sensor de velocidad y dirección de viento. Veleta y Anemómetro ONSET MOD. S-WCA-M003.* La escuela que se presenta en este trabajo se halla a una distancia de 2,6 Km de la micro estación. Para la medición de variables internas se utilizaron *20 adquirentes de Datos HOBO (USA) para T°/%RH/LUZ MOD.U12-012,* que fueron fijados en una las paredes de cada aula seleccionada (generalmente la opuesta al pizarrón) a 2,10 m de altura y en la parte central, equidistantes a las ventanas laterales, quedando protegidos de la radiación solar directa y de los equipos de climatización y separados de la pared mediante una placa de MDF, para que no tomen la temperatura superficial de la misma. Las mediciones de iluminancia son representativas del promedio de iluminación natural y artificial del local, no siendo objetivo registrar iluminancias sobre el plano de trabajo (0,80 cm), como es recomendado, sino obtener un promedio del local que permita orientar el análisis de los datos de temperatura y humedad, pudiendo atribuir los sobrecalentamientos a la incidencia solar directa, cuando haya aumentos excesivos de iluminancia, o derroche de energía, cuando quedan las luces prendidas de noche.

Prototipos Seleccionados. Se seleccionaron 7 establecimientos a partir de un universo de 60 prototipos escolares de la ciudad de Resistencia, de nivel inicial, primario, secundario y terciario, que han sido referentes en distintos períodos de gestión de gobierno, repitiéndose significativamente en la Región NEA. Estas unidades de análisis fueron sistematizadas en un banco de datos técnicos verificando situaciones diferenciadas de: implantación (céntrica, barrial, periurbana), orientación, conformación tipológica (partido lineal abierto con galerías y partido compacto de doble y simple crujía, de una a tres plantas) y soluciones tecnológico-constructivas (tecnología tradicional pesada y semi pesada). El criterio de selección de los prototipos a monitorear se basó en que estos tienen como factor común, una alta exposición a la radiación solar directa.

Cronograma de Monitoreos. Se ejecutó un cronograma de medidas en forma ininterrumpida desde el mes abril de 2012 hasta el mes de marzo de 2013 inclusive, monitoreándose los siete edificios agrupados por su cercanía, en tres grupos (uno cada decena de cada mes). Dicha programación responde a la necesidad de obtener una buena base de datos para realizar un análisis estadístico, como así también, el máximo aprovechamiento del número de sensores disponibles, alternando los locales medidos. El prototipo que se presenta en este trabajo se monitoreó durante la segunda decena de cada mes, con una frecuencia de muestreo de 10 minutos. Para mostrar los resultados de las mediciones, se seleccionó el periodo de otoño 2012, por ser esta la época más desfavorable para la actividad escolar, pues la atmósfera aún es cálida y las ventanas ya colectan radiación solar. Específicamente se detalla el monitoreo del mes de junio en el que se presentaron los casos más críticos de sobrecalentamiento y enfriamiento.

Análisis Estadístico. A fin de determinar parámetros que permitan analizar los datos recabados y evaluar las áreas vidriadas adecuadas según área de piso y de fachada expuesta a la radiación solar, se efectuaron correlaciones a partir de la definición de índices higrotérmicos y dimensionales, para cada local monitoreado. Éstos proporcionaron una medida del grado de discomfort térmico por sobrecalentamiento o enfriamiento y por exceso o defecto de humedad relativa, según la temperatura de cada local monitoreado respecto del mismo discomfort producido en el clima exterior, como así también el confort temporal, para determinar cuáles aulas dentro de un edificio se comportaron mejor. Para el cálculo de dichos índices se tomó como referencia el rango de confort determinado por Jacobo (2001): *Temperatura Máxima con HR = 20%-50%: 29,5 °C; Temperatura Mínima con HR = 20%-50%: 25,0 °C; Temperatura Mínima con HR = 80%: 20,0 °C.* En base a estos valores de referencia se diferenció una zona de confort de invierno de 20 a 25° C y una zona de confort de verano de 25 a 29°C.

DESCRIPCION DEL CASO DE ESTUDIO

El prototipo bajo estudio es la Escuela de Educación Primaria N° 1058, localizada en el complejo educativo del Barrio San Miguel de la ciudad de Resistencia (27,45° Lat. Sur; 59,05° Long. Oeste; Alt. 52 msnm) en la Provincia del Chaco, que pertenece a la zona bioambiental "I-b", *muy cálida* (IRAM 11603, 1996). Se inserta en una zona residencial de baja densidad edilicia (Fig. 1) e incluye además una escuela secundaria y un jardín de infantes, que fueron monitoreados simultáneamente.



Fig. 1. Localización de la Escuela Primaria y fotos de sus fachadas altamente expuestas a la radiación solar directa.

Estos prototipos son representativos de la producción oficial de arquitectura escolar de ejecución actual en la provincia del Chaco, a través del Programa Nacional 700 Escuelas y Más Escuelas, caracterizados por la aplicación de tecnología

tradicional de mampostería de ladrillos portantes, al exterior vistos con junta enrasada y revocados a la cal completos en todos los interiores de locales; estructura de H°A°; cielorrasos interiores de placas de yeso con aislación térmica de lana de vidrio de 38 mm, acompañando la pendiente bajo cubierta metálica, AU-L1 Pte. 30%; aberturas de chapa doblada N° 16 y vidrios laminados 3+3 mm. La Escuela de Nivel Primario N° 1058 es un prototipo de planta abierta con desarrollo lineal en "E" tipo peine, en torno a patios y SUM. Incluye 10 aulas comunes dispuestas en 3 alas transversales y un ala longitudinal donde se disponen 4 aulas comunes y 4 aulas especiales (biblioteca, sala de informática y 2 talleres). Funciona en dos turnos (mañana y tarde) con un promedio de 20 alumnos por aula. En el mismo edificio, desde mayo de 2012 funciona el Instituto Terciario UEP N° 172, en dos turnos (tarde y noche) con una matrícula de 1001 alumnos con edades de 18 a 60 años.

Cada aula posee 4 ventanas ubicadas en caras opuestas (ventilación cruzada), con las siguientes características (Fig. 2): a) *Cara expuesta SE o NE*: Ventanas de 2 paños superiores tipo ventiluz 0.45 x 2.00 m y 2 paños corredizos de 1.15 x 2.00 m (con parasoles); b) *Cara con galería NO o SO*: Ventanas de 2 paños corredizos de 1.20 x 2.00 m. En esta misma cara se ubican las puertas, que poseen 2 paños fijos superiores de 0.46 x 1.50 m y dos hojas de abrir a batiente de 2.05 x 1.50 m. Como dispositivos de protección, las aulas poseen parasoles de chapa de 0.80 x 2.00 m que cubren un 50% de las ventanas hacia el SE y NE y galerías hacia el NO y SO. Según el caso, se incorporaron cortinas internas. En algunas aulas, al no disponer de cortinas, los usuarios colocaron papeles de diario o afiches en los vidrios para bloquear la radiación solar directa.

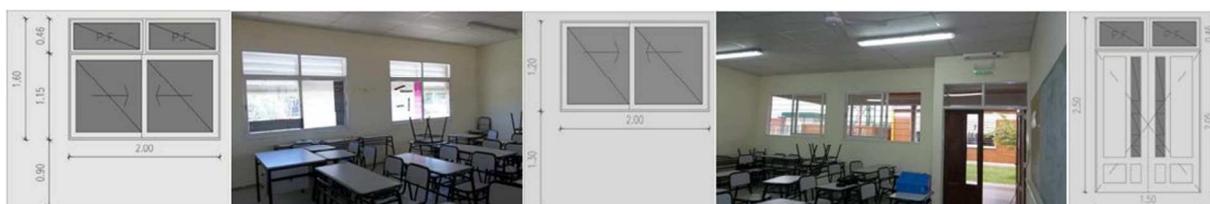


Figura 2. Detalles y fotos de las aberturas de un aula tipo.

En la Tabla 1 se exponen algunos indicadores dimensionales de los módulos de aulas comunes del caso de estudio, cuyas referencias son: A_{exp} , área de fachadas y techos asoleados descontando A_v , A_v , área total de vidrio en ventanas y puertas por donde pasa radiación solar directa, considerando la reducción que corresponde a la protección brindada por parasoles y galerías. $\bar{\alpha}$, absortancia solar promedio ponderada de todas las superficies asoleadas. F_v , factor de vidriado que se calcula para cada local distinguiéndolos según la orientación cardinal en que se encuentren las ventanas y puertas vidriadas. F_{fv} , factor de forma volumétrico de cada local, que mide la proporción entre el área de pérdida de calor y el volumen de aire a calefaccionar/refrigerar. F_{fp} , factor de forma de planta de cada local, cociente entre el ancho del piso y el largo del piso.

Aulas Tipo	Vol. (m ³)	Alt. (m)	Área de piso (m ²)	Aexp. (m ²)	Av, a (m ²)	Av, b (m ²)	Fv, a	Fv, b	$\bar{\alpha}$	FFv (m ⁻¹)	FFp
Aula común 5	139	3	46.4 (6.95 x 7.00)	90.7	2	4.24	0.012	0.025	0.53	0.67	0.99
Aula común 7	139	3	46.4 (6.95 x 7.00)	127.27	2	4.24	0.006	0.013	0.38	0.93	0.99

Tabla 1: Indicadores dimensionales de aulas tipo.

Estas aulas comunes tienen 4 luminarias de 2 tubos fluorescentes 36 W cada uno y dos ventiladores de techo. Datos proporcionados por la Empresa Facturadora Provincial (SECHEEP), indican que la Escuela presentó el máximo consumo eléctrico en mayo de 2010 con un valor de 3633 kWh y en octubre y noviembre de 2011, con valores de 3700 kWh y 3500 kWh, respectivamente, mientras que el consumo de junio y septiembre de 2011 fue de 3300 kWh.

RESULTADOS DEL MONITOREO HIGROTÉRMICO – LUMÍNICO DEL MES DE JUNIO (Finales de Otoño)

Variables Meteorológicas Medidas. El período de monitoreo abarcó ocho días, desde el 12/06/12 a las 12:00 h hasta el 19/06/12 a las 12:00 h (Fig. 3).

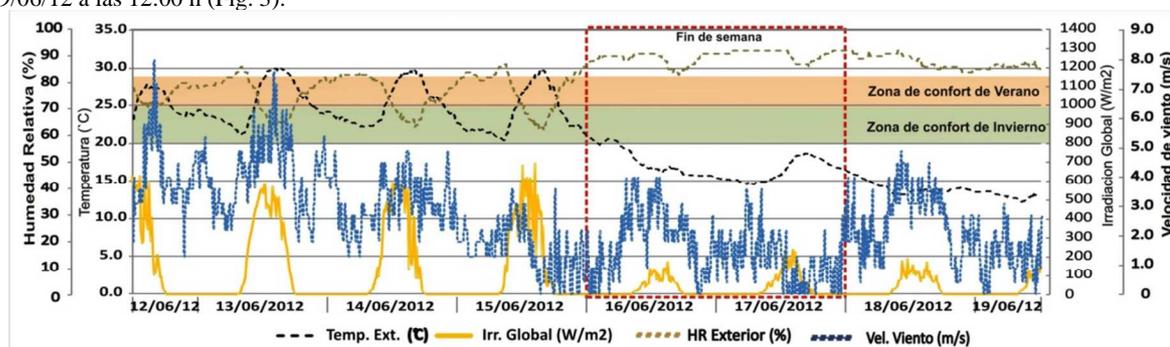


Figura 3: Evolución de variables meteorológicas medidas, período 12/06/12 – 19/06/12

Se pueden diferenciar claramente dos fases dentro de dicho período, la primera del 12 al 15/06, con temperatura media de 29.3°C y humedad relativa media de 76%, cuyas máximas salen del límite superior de confort, valores alejados de los estadísticos para este mes en la ciudad de Resistencia. En esta fase las velocidades máximas de viento se encuentran en el

orden de 8 m/s en descenso y dirección predominante NE, y la radiación solar global con máximas en el orden de 624 W/m², con algo de nubosidad. La segunda fase desde el 16 al 19/06, sí registra valores similares a los estadísticos, con un brusco descenso de temperatura media (17.5°C) y aumento de humedad relativa (88 %), disminución de la velocidad de viento con máximas en el orden de 3.9 m/s y dirección predominante Sur, y radiación solar global con máximas en el orden de 211 W/m², correspondiente a días nublados. Esta fase queda totalmente fuera de la zona de confort.

Locales Monitoreados. En este mes se monitorearon las **aulas 5, 7, 9, 11, 12 y 14** de las alas transversales, con orientación de áreas vidriadas en las caras SE - NO, expuestas al exterior y que se ocupan en el turno mañana (de 8:00 a 12:15 h) con un promedio de 20 alumnos. De ellas, las aulas **5, 9 y 11** también son ocupadas en los turnos tarde y noche (de 14:00 a 23:00 h) por un promedio de 35 alumnos del instituto terciario. Del ala longitudinal se monitorearon las **aulas 2 y 4** que funcionan a la mañana, la **Biblioteca** y el **Taller A** que se ocupan de lunes a jueves por la tarde y noche con un promedio de 45 alumnos del instituto terciario. Excepto el aula 5 y el Taller A, las aulas se encontraban con elementos de oscurecimiento internos al SE y NE. Durante la semana hábil se desarrollaron las clases normalmente. Sólo se hizo uso de ventiladores en los días más cálidos y de iluminación artificial permanente durante las horas de ocupación. En la Fig. 4 se señala en rojo el número de sensor HOBO de cada aula monitoreada.

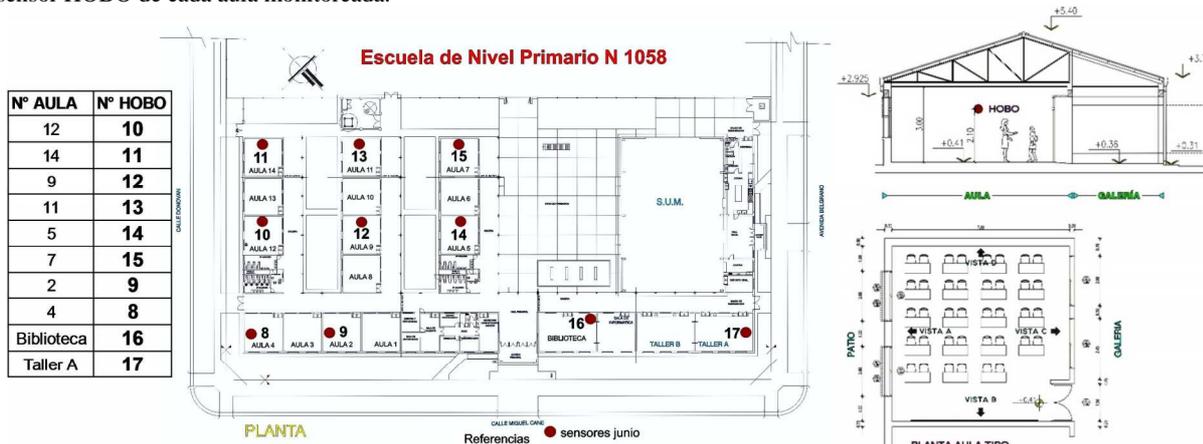


Figura 4. Izq. Planta de la escuela con la ubicación de los sensores. Der. Planta y corte de un Aula Tipo.

Variables Interiores Medidas. En las Figs. 5 a 10 se muestra la evolución de la temperatura, humedad relativa e iluminancia (natural + artificial) de los locales monitoreados más representativos, agrupados según sus características, en contraste con las variables meteorológicas. En las gráficas de temperatura se señala la zona de confort higrotérmico diferenciada para invierno y verano en dos colores y en las de iluminancia la zona de confort visual entre 300 y 500 lux.

En la **primera fase (cálida)**, los locales se encuentran a una temperatura promedio de 26 °C y 73% de humedad relativa. La combinación temperatura – humedad coloca a estas aulas fuera de la zona de confort, por la elevada humedad relativa. El **Taller A** y el **Aula 5** presentan temperaturas máximas que sobrepasan el límite superior de confort (29.9 °C y 29.1°C) con humedades relativas de 73 y 77 % respectivamente. Se destaca aquí la influencia que tienen las cargas de ocupación por personas adultas del nivel terciario, produciendo de 2 a 3 grados de incremento de la temperatura, en comparación con la ocupación por niños que es casi imperceptible. Las temperaturas mínimas se mantienen cerca del límite superior de la zona de confort de invierno. La amplitud térmica promedio es de 4.4°C, mientras que la diferencia de temperatura interior – exterior promedio es de 1.7 °C, lo que indica la existencia de pérdidas por ventilación a través de puertas y/o ventanas abiertas o bien, grandes infiltraciones cuando están cerradas. La iluminancia promedio es de 143 lux, muy por debajo del límite recomendado aunque la máxima promedio es 556 lux.

En la **segunda fase (fresca)**, los locales se encuentran a una temperatura promedio de 21.1°C y 72% de humedad relativa, por lo tanto fuera del límite inferior de confort respecto al porcentaje de humedad relativa. Para dicha temperatura el valor mínimo de HR de confort debe ser 77 %, según los valores de referencia de Jacobo (2001). Un valor menor, incrementa la sensación de frío. La amplitud térmica promedio es de 2.9°C, mientras que la diferencia de temperatura interior – exterior promedio es de 4.8 °C, lo que indica una lenta respuesta de la envolvente a los descensos de temperatura. La iluminancia promedio es de 55 lux, muy por debajo del límite recomendado, con una máxima promedio de 218 lux. Por lo expuesto, se debe observar que el factor más influyente en ambos períodos es la humedad relativa, que en el primer caso, excede el límite superior de confort y en el segundo caso sale levemente del límite inferior.

Frente a la variabilidad de condiciones externas en este período otoñal, los locales responden mejor a las bajas temperaturas, con una lenta respuesta, que las altas y por ello la elevada probabilidad de que se produzcan sobrecalentamientos. Las aulas que tienen tres fachadas expuestas (7, 11, 14, 4 y Taller A), así como se hallan en buenas condiciones de confort durante los días característicos del mes de junio para el clima de Resistencia, también presentan condiciones de desconfort por sobrecalentamiento, ante inesperados aumentos de temperatura y humedad. El Aula 7 por ejemplo, fluctúa en la zona de confort de verano en la fase cálida, saliendo por momentos del límite superior, mientras que en la fase fresca cae por debajo del límite inferior. Esto es de esperar dado su alto Factor de Forma Volumétrico, que influye negativamente en el confort térmico y en el consumo energético de la misma (en el año 2013 se incorporó un aire acondicionado Split). Las temperaturas cercanas a 29°C, resultan excesivas si se combinan con humedad relativa elevada, constituyendo ésta el factor más influyente en ambas fases. Los dos primeros días de la fase cálida, la humedad relativa de las aulas es muy elevada, superando la del

ambiente. En cambio, en la fase más fresca, la no disponibilidad de radiación solar suficiente, contribuye al enfriamiento de las aulas. Sólo las aulas 9 y 5 se encuentran en la zona de confort durante las horas de ocupación, en esta fase.

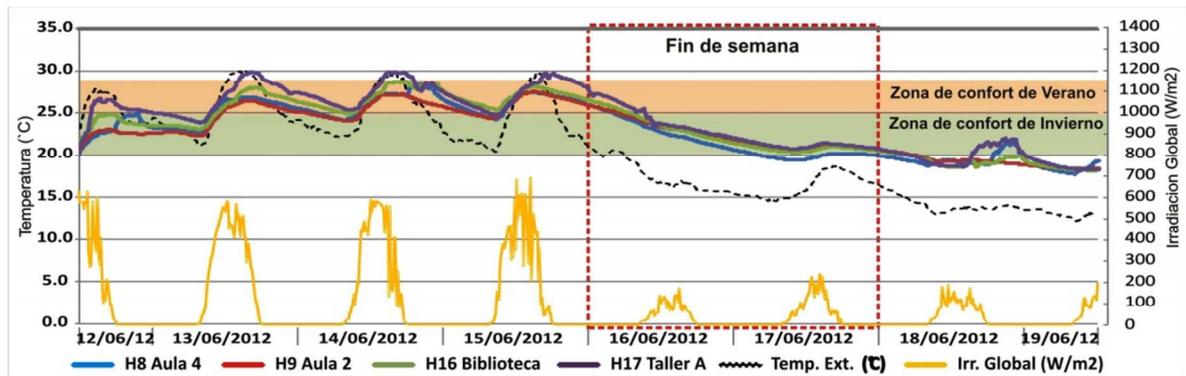


Figura 5. Evolución de temperatura de los locales con áreas vidriadas NE – SO

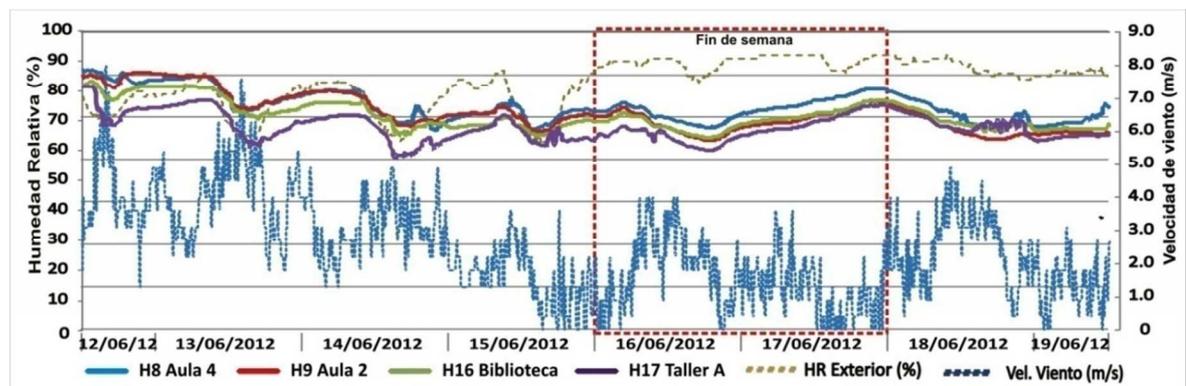


Figura 6. Evolución de humedad relativa de los locales con áreas vidriadas NE – SO

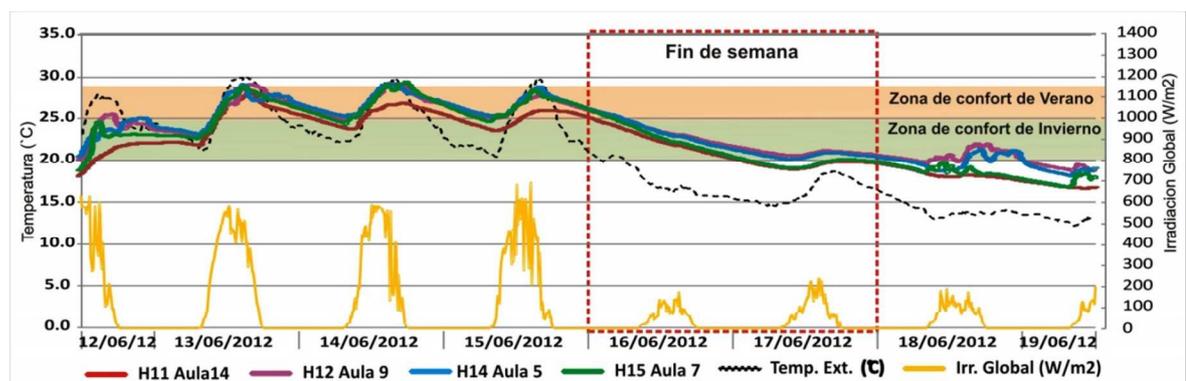


Figura 7. Evolución de temperatura de los locales con áreas vidriadas SE – NO

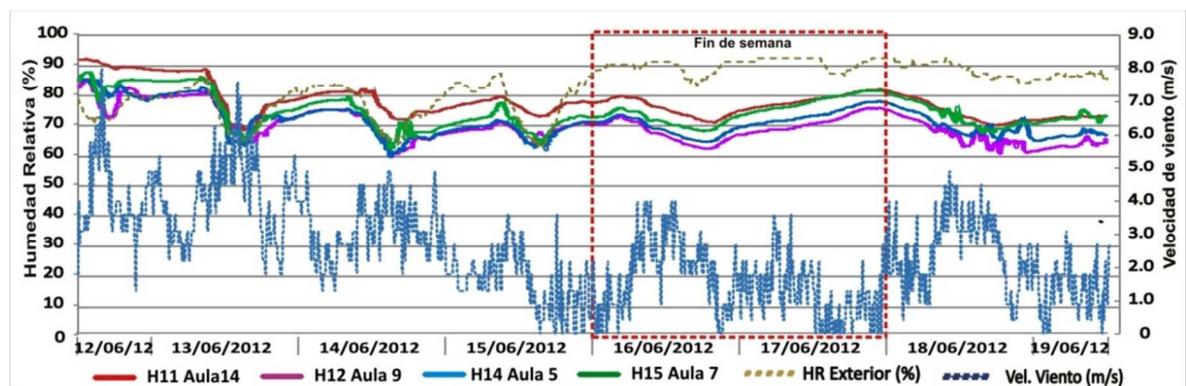


Figura 8. Evolución de humedad relativa de los locales con áreas vidriadas SE - NO

En el mes de junio aumenta el lapso de tiempo de mayores iluminancias, dado el menor ángulo de elevación del sol sobre el horizonte que favorece un mayor asoleamiento de los edificios. Si bien esto es beneficioso en los días fríos, se debe controlar la incidencia directa sobre las áreas vidriadas y opacas, por susceptibles sobrecalentamientos.

El aula 4 y el Taller A tienen el mismo comportamiento en cuanto a iluminancias durante la mañana, pasando los 500 lux, dada la orientación de sus ventanas al NE sin protección interna, solo un 50% por parasoles. Consecuencia de ello es el sobrealentamiento producido, por lo que se estima que los parasoles no constituyen un dispositivo de protección solar efectivo durante las primeras horas de sol, para esta época del año. Mientras que en el Aula 4 decaen los valores de iluminancia hacia la tarde, en el Taller, pasado el mediodía solar, se vuelven a incrementar los valores por la contribución de la iluminación difusa en la cara SO. En el Aula 2 las iluminancias son menores, pues debido a la incidencia solar directa, se cierran las cortinas internas de manera tal que ni con iluminación artificial se alcanzan los 500 lux.

En las Aulas 5 y 9 las máximas iluminancias se producen entre las 12:00 y las 14:00 h y las máximas temperaturas entre las 14:00 y las 16:00 h. Por lo tanto se advierte una fuerte contribución de la radiación difusa, cuando el sol no incide directamente a través del vidrio y el pico máximo de temperatura en coincidencia con la máxima exterior (15:00 h). A ello se suma el efecto combinado de las ganancias internas por ocupación, la temperatura sol – aire y las ganancias por ventilación natural. Las mayores iluminancias se aprecian cuando el sol incide en la cara NO.

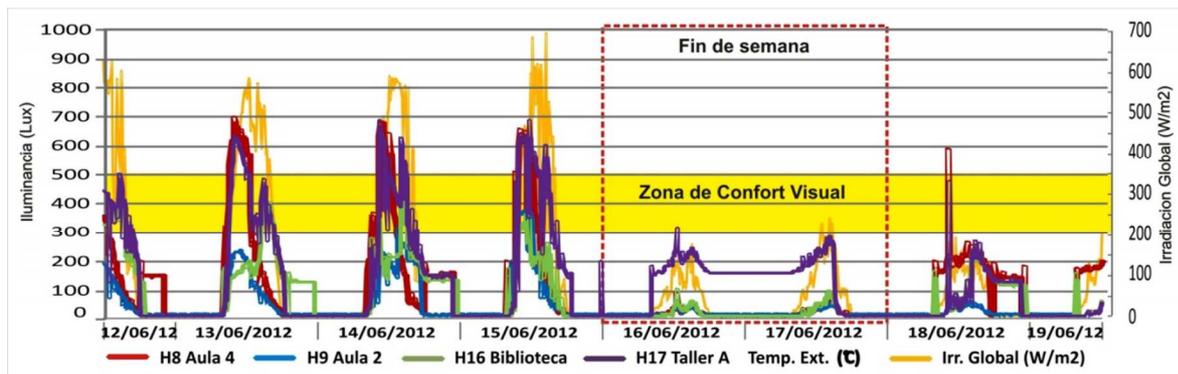


Figura 9. Evolución de iluminancias (iluminación natural + artificial) de los locales con áreas vidriadas NE – SO

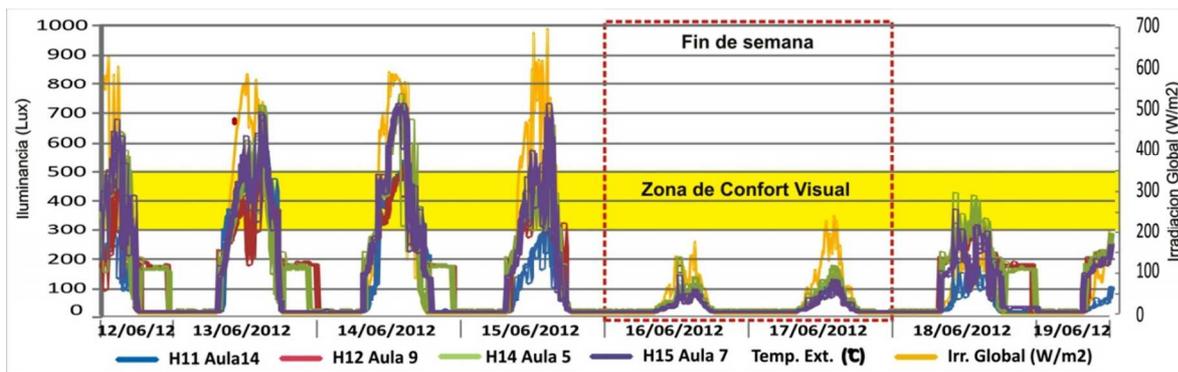


Figura 10. Evolución de iluminancias (iluminación natural + artificial) de los locales con áreas vidriadas SE - NO

VALIDACIÓN DE SIMULACIONES EN SIMEDIF Y ECOTECT

A fin de orientar las propuestas de diseño optimizado, se efectuaron modelos teóricos del edificio en SIMEDIF (<http://inenco.unsa.edu.ar/~seflores/index.html>) y ECOTECT v5.20 (Marsh A. J., 2003) y su actualización Demo (Autodesk, 2011), en una metodología de modelización interactiva que se detalla ampliamente en el trabajo de Boutet et al. (2012), haciendo uso de las potencialidades que ofrece cada herramienta informática. En ambos programas se ingresaron los datos meteorológicos medidos y se definieron parámetros homogéneos en cuanto a características y propiedades físicas de los distintos componentes y las condiciones operativas para cada espacio analizado. En Simedif se definieron además, los coeficientes de absorción y coeficientes convectivos considerando la velocidad media de viento en el período y en relación al edificio en estudio, y los índices y áreas de radiación en cuya determinación contribuyó el programa Ecotect, a partir del análisis de exposición solar.

Por razones de espacio se muestran sólo dos de los locales simulados más representativos en 6 días completos del período, dos de ellos sin ocupación (16/06 y 17/06) por ser fin de semana: el aula 7 que tiene tres fachadas expuestas y el aula 5 con dos fachadas expuestas. Ambas situadas en el ala transversal que da al patio de formación, con aberturas al SE – NO, tienen una variación horaria importante en sus ganancias internas, con un alto nivel de actividad. El aula 7 se ocupa solo en el turno mañana (7° grado), mientras que el aula 5 se ocupa en el turno mañana (6° grado) y en los turnos tarde y noche del nivel terciario. Figs. 11 y 12.

En la Tabla 2 se muestran las diferencias obtenidas entre datos medidos y simulados con ambos programas informáticos, discriminadas en errores promedio y errores absolutos máximos, del período total, de los días de clase y del fin de semana. Con Ecotect se verificaron errores absolutos máximos de 1.6°C en el Aula 7 el fin de semana y de 1.9 °C en el Aula 5 en días de clase, mientras que con Simedif, los errores absolutos máximos son de 1.3 °C en el Aula 7 y 1.8 °C en el Aula 5 en días de clase. Por otra parte, el error promedio es de 0.5°C en días de clase con ambos programas. El fin de semana es de 0.6 °C en el

Aula 7 y de 0.4 °C en el Aula 5 con Ecotect, mientras que con Simedif, es de 0.3°C en ambas aulas. Similares órdenes de ajuste, en un promedio total de 0.5 °C, se verificaron en las demás aulas para el período del mes de junio señalado, como así también para los meses de abril y mayo, lo que demuestra la validez de los modelos físicos realizados con ambos programas informáticos tratados como herramientas complementarias. Se ha logrado además obtener estos ajustes con menor número de simulaciones, gracias a la precisión de los instrumentos utilizados para la medición de variables internas y de variables meteorológicas locales, como así también el entrenamiento adquirido en la metodología de simulación en trabajos previos (Boutet et al. 2010a; 2010b; 2011; 2012). Especialmente en lo que respecta a la especificación de renovaciones de aire y uso de dispositivos internos de oscurecimiento, cuyo control es difícil cuando se simula un edificio en condiciones reales de uso.

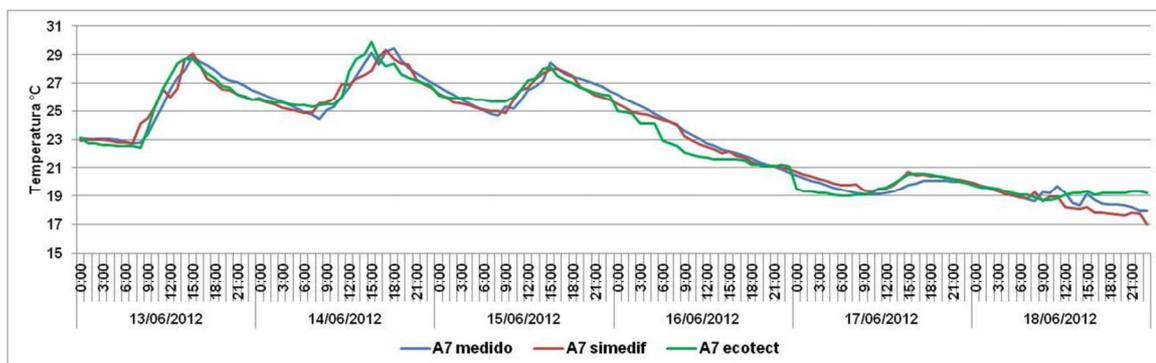


Figura 11. Contrastación de datos medidos y simulados en Simedif y Ecotect. Aula 7

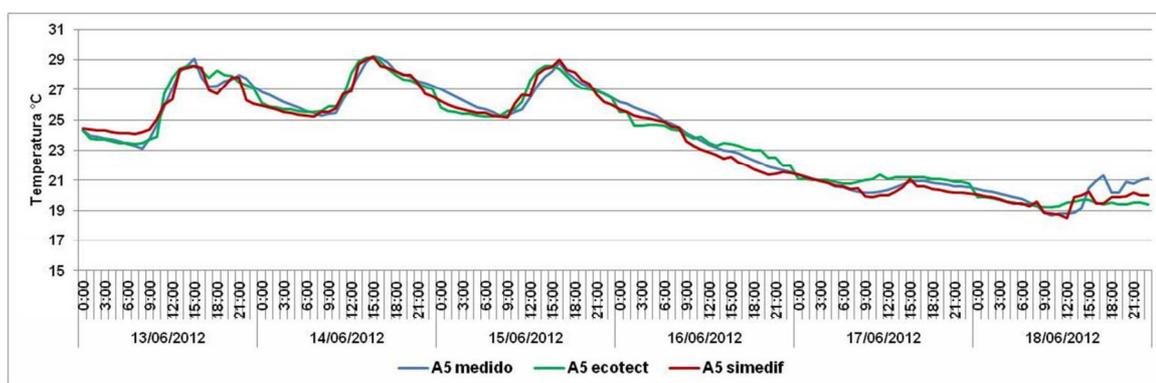


Figura 12. Contrastación de datos medidos y simulados en Simedif y Ecotect. Aula 5

		ERRORES ABSOLUTOS			ERRORES PROMEDIO		
		MAX. DEL TOTAL	MAX. DIAS DE CLASE	MAX. FIN DE SEMANA	PROM. TOTAL	PROM. DIAS DE CLASE	PROM. FIN DE SEMANA
AULA 7	ECOTECT	1.6	1.4	1.6	0.6	0.5	0.6
	SIMEDIF	1.3	1.3	1	0.4	0.5	0.3
AULA 5	ECOTECT	1.9	1.9	1.2	0.5	0.5	0.4
	SIMEDIF	1.8	1.8	0.6	0.4	0.5	0.3

Tabla 2. Diferencias entre valores medidos y simulados con Simedif y Ecotect. Aulas 7 y 5.

PROPUESTA DE OPTIMIZACIÓN

Una vez validado el modelo físico de la escuela mediante el ajuste de las simulaciones con los datos medidos del período otoñal, fue posible realizar modificaciones en las áreas vidriadas y nuevas simulaciones en ECOTECT bajo iguales condiciones climáticas, analizando de forma confiable el impacto en la temperatura e iluminación interior de diferentes alternativas de diseño. Previamente a realizar las alternativas de rediseño, se ajustaron los promedios de iluminancia obtenidos mediante la interface Radiance de Ecotect, con los promedios medidos durante el período de monitoreo.

En principio se considera que el área de ventanas para iluminación natural debe ser la conveniente en cada caso para asegurar que sobre el plano de trabajo haya un nivel de iluminancia de 300 lux como mínimo y 500 lux como valor óptimo, durante las horas de ocupación de las aulas. Por otra parte se considera que la distribución de iluminación es espacio-dependiente, influyendo la forma de las aulas (planta cuadrada o planta rectangular) y las proporciones y ubicación de las ventanas. Este estudio fue posible a partir de la interface Radiance de Ecotect, probando distintos tamaños y ubicaciones de ventanas hasta lograr dichas condiciones. Esta es una interface de exportación al programa RADIANCE (<http://radsite.lbl.gov/radiance>), en un sistema de imagen sintético que permite tomar ventaja de la precisión y la complejidad de sus algoritmos de simulación de iluminación, agilizando el tiempo de modelización y cálculo para el análisis conceptual que se requiere. Radiance utiliza la latitud, la longitud y la zona horaria del sitio, así como la fecha y hora establecidas por el usuario para el cálculo básico de propiedades de cielo, por lo que se definió el tipo de cielo más representativo en relación al momento de la medición in situ: “Soleado”, utiliza el modelo de cielo claro CIE para generar un sol localizado y cielo claro para representar la mejor condición (días 13, 14 y 15/06 del monitoreo); “Cielo medio”, utiliza un cielo entre soleado y nublado, representativo de

condiciones de diseño de media estación (días 16, 17 y 18/06 del monitoreo). El testeo fue realizado en tres horarios para cada día, 9:00 h, 13:00 h y 16:00 h. El cálculo de los niveles de iluminación natural (lux) se desplegó mediante una grilla de análisis que se configuró para cada aula, a la altura del plano de trabajo (0.80 m) y se establecieron las visualizaciones que representan la cantidad de luz incidente sobre cada superficie interior, con los valores de iluminancia en “líneas de contorno” y en “falso color”. Figs. 13 y 14.

La propuesta realizada se basa en las dos aulas comunes, 5 y 7, tomadas como aulas tipo para analizar las distintas situaciones de la planta del edificio. Se partió de la situación existente con una relación de área de vidrio por área de piso total de 22 % y una relación de área de vidrio por área de fachada total de 40 %, y se fueron realizando alternativas de rediseño, teniendo en cuenta el diagnóstico de los monitoreos, encuestas y observaciones in situ. Utilizándose el mismo vidrio laminado 3+3 existente, se propuso otro tipo de aventanamiento, ventanas proyectantes y pivotantes, al haber verificado en todos los edificios relevados que las ventanas corredizas además de reducir al 50% el área efectiva de ventilación, tienen múltiples inconvenientes, entre ellos, menor hermeticidad y difícil accionamiento por los usuarios debido a falta de mantenimiento.

La alternativa que mostró mejores resultados, consistió en reemplazar las ventanas corredizas con banderolas (siempre cerradas) y parasoles de las fachadas SE y NE, por ventanas proyectantes altas y largas. Las ventanas altas constituyen sistemas solares pasivos muy interesantes de utilizar en edificios educacionales dado la calidad de la iluminación natural que ellas otorgan. A la vez, permiten ventilar el aire viciado y caliente que por estratificación se ubica en la zona alta (Esteves y Pattini, 1999). Estas ventanas evitan además la incidencia solar directa en las primeras horas de la mañana sin necesidad de incorporar dispositivos de oscurecimiento externo y al ser proyectantes, se abren hacia el exterior desde la base, teniendo la fijación en la parte superior, de manera tal que el aire puede circular, sin crear corrientes, manteniendo el agua fuera en tiempo lluvioso. En las fachadas NO y SO, que se hallan protegidas por galerías, se reemplazaron las 2 ventanas corredizas altas y anchas por 6 ventanas pivotantes verticales y angostas, de forma de aumentar el área efectiva de iluminación difusa y ventilación a nivel de los usuarios. Las ventajas que ofrece este sistema son: buen nivel de estanqueidad gracias a su cierre a presión, fácil operación a voluntad del usuario permitiendo múltiples posiciones, campo amplio de visión y poca invasión del espacio interior, regulación del caudal de ventilación y fácil limpieza desde el interior.

Este diseño de aberturas de ingreso y egreso del aire, combinando ventanas proyectantes altas con ventanas pivotantes verticales, enfrentadas a respectivos campos de presiones positivas y negativas, de acuerdo a la conformación volumétrica del aula y el ángulo de ataque de los vientos predominantes, permite incrementar la ventilación interior tanto en caudal como en velocidad, por diferencia de presión. Mediante la correcta operación de las mismas en horas de menor temperatura y más bajo porcentaje de humedad relativa, se optimiza el refrescamiento de las masas de acumulación del edificio (ventilación estructural). Además se facilita la ventilación selectiva para los usuarios, potenciando el enfriamiento evaporativo de la piel cuando la humedad es baja (ventilación de confort). A la vez se logra una mejor distribución y uniformidad de la luz natural, hacia la parte más profunda del local. Considerando que este tipo de aventanamiento tiene mayor grado de hermeticidad y posibilita un mejor manejo de la ventilación natural, en el modelo mejorado se redujo el número de 4 renovaciones de aire por hora, que se estableció en el modelo original, a 2 durante las horas de ocupación y a 0.25 durante las horas sin ocupación.

En la tabla 3 se muestran las variables dimensionales del modelo original y del modelo mejorado mediante Ecotect, destacando los porcentajes de reducción de la relación de área vidriada según su orientación. La relación de área de vidrio por área de piso se redujo un 7.4 %, mientras que la relación de área de vidrio por área de fachada se redujo un 16%, resultando en relaciones totales de 14.65 % y 24% respectivamente.

	MODULO AULA (m)	ORIENTAC.	SISTEMA DE ABERTURAS	DISPOSITIVOS DE PROTECCION	PROPORCION VANOS (m)	AREA EF. DE VIDRIO (m)	AREA DE PISO	AREA DE FACH.EXP.	AV/AP (%)	AV/AF (%)
ORIGINAL	Ancho: 6.95 Longitud: 7.00 Altura: 3.00	SE	2 Ventanas de 2 paños superiores tipo ventiliz y 2 paños corredizos.	parasoles 50% del vano	Ventiluces: Ancho: 2.00; Alto: 0.45 Corredizas: Ancho: 2.00; Alto: 1.15	6.4	50.8	15.2	12.60	42.11
		NO	2 Ventanas de 2 paños corredizos.	galería	Ancho: 2.00 Alto: 1.20	4.8	50.8	12.8	9.45	37.50
	Totales					11.2	50.8	28	22.05	40.00
MEJORADO	Ancho: 6.95 Longitud: 7.00 Altura: 3.00	SE	3 Ventanas altas de proyeccion.	ninguno	Ancho: 1.80 Alto: 0.80	4.32	50.8	17.3	8.50	24.97
		NO	6 ventanas ventanas pivotantes verticales angostas y altas.	galería	Ancho: 0.40 Alto: 1.30	3.12	50.8	13.7	6.14	22.77
	Totales					7.44	50.8	31	14.65	24.00

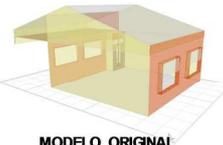
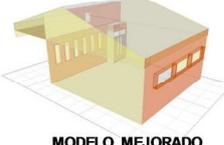
			AV/AP (%)	AV/AF (%)	
		REDUCCION RELACION DE AREA VIDRIADA (%)	SE	4.1	17.1
			NO	3.3	14.7
		TOTAL	7.4	16.0	

Tabla 3. Variables dimensionales de los modelos original y mejorado, simulados mediante Ecotect.

En la situación mejorada se verificó la optimización del comportamiento higrotérmico y lumínico, regulando los súbitos sobrecalentamientos en períodos diurnos con una adecuada ventilación, y los enfriamientos en períodos nocturnos, ingresando así las curvas de temperatura a la banda de confort. Se obtuvieron notables mejoras en el aula 7 que presentaba grandes fluctuaciones por poseer tres fachadas expuestas y mayor factor de forma volumétrico a igual factor de forma en planta que el aula 5. Se logró elevar las temperaturas mínimas hasta casi 4°C en los días frescos del período (Aula 7) y

reducir las máximas más de 3°C en los días cálidos (Aula 5). De esta manera disminuyó la amplitud térmica interna diaria, sin sobrepasar los 5°C como valor recomendado. Al mismo tiempo, aumentó la diferencia de temperatura interior – exterior hasta casi 8°C en el día más fresco, lo que indica un mejor comportamiento de la envolvente constructiva a partir de la regulación de las áreas vidriadas. En las tablas 4 y 5 se comparan los promedios de Temperatura e Iluminancia de la situación real medida (original) y de la situación mejorada simulada, para las aulas 5 y 7 para cada día del periodo evaluado.

AULA 7		ORIGINAL	MEJORADO	ORIGINAL	MEJORADO	ORIGINAL	MEJORADO	ORIGINAL	MEJORADO	ORIGINAL	MEJORADO	ORIGINAL	MEJORADO
Fecha	T°C max.	T°C max.	T°C min.	T°C min.	T°C prom.	T°C p. rom.	amplitud	amplitud	Dif. Int. - Ext.	Dif. Int. - Ext.	Ilum. (lux) prom.	Ilum. (lux) prom.	
13/06/2012	29.0	27.3	22.7	23.2	25.5	25.1	6.3	4.1	1.2	0.3	178	427	
14/06/2012	29.5	28.5	24.3	25.4	26.8	26.6	5.2	3.1	2.1	1.4	190	432	
15/06/2012	28.5	27.8	24.7	25.5	26.4	26.3	3.8	2.3	4.0	2.4	144	428	
16/06/2012	26.2	26.4	20.5	24.4	23.1	25.4	5.7	2.0	5.2	7.6	25	214	
17/06/2012	20.5	23.0	19.1	22.0	19.7	22.6	1.4	1.0	4.9	6.3	29	212	
18/06/2012	19.8	21.3	17.8	20.5	18.8	21.0	2.0	0.8	3.4	6.9	88	217	

Tabla 4. Promedios de Temperatura e Iluminancia del Aula 7, situación original medida y modelo mejorado.

AULA 5		ORIGINAL	MEJORADO	ORIGINAL	MEJORADO	ORIGINAL	MEJORADO	ORIGINAL	MEJORADO	ORIGINAL	MEJORADO	ORIGINAL	MEJORADO
Fecha	T°C max.	T°C max.	T°C min.	T°C min.	T°C prom.	T°C p. rom.	amplitud	amplitud	Dif. Int. - Ext.	Dif. Int. - Ext.	Ilum. (lux) prom.	Ilum. (lux) prom.	
13/06/2012	29.2	26.0	23.1	22.2	25.9	23.9	6.1	3.8	0.0	1.4	198	391	
14/06/2012	29.3	27.4	25.3	24.5	27.0	25.7	4.0	2.9	2.7	0.5	205	386	
15/06/2012	28.8	28.1	25.3	25.4	26.7	26.3	3.5	2.7	4.3	2.4	146	390	
16/06/2012	26.2	25.2	21.4	23.4	23.7	24.3	4.8	1.8	5.2	6.6	35	193	
17/06/2012	21.4	22.0	20.2	21.0	20.7	21.5	1.2	1.0	5.8	5.2	40	196	
18/06/2012	21.3	20.4	18.7	19.7	20.0	20.2	2.6	0.7	4.0	6.1	143	195	

Tabla 5. Promedios de Temperatura e Iluminancia del Aula 5, situación original medida y modelo mejorado.

En las Figuras 13 y 14 se muestran las visualizaciones obtenidas mediante la interface Radiance de Ecotect para el modelo del aula 7 original y mejorado, en el día más soleado, 14/06/12, en los horarios de las 9:00 h y 16:00 h.

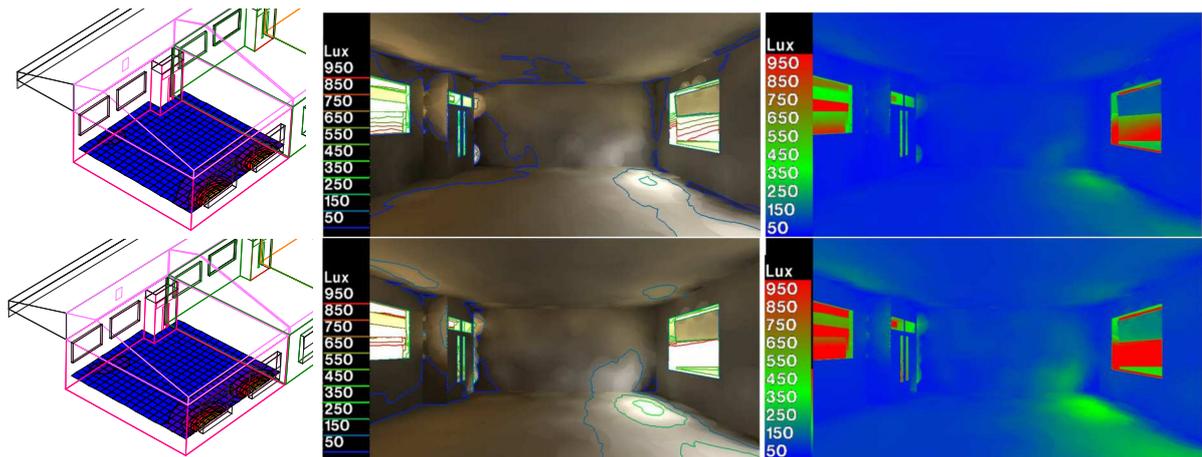


Figura 13. Imágenes Aula 7 situación original: grilla de análisis – líneas de contorno y falso color (Interface Radiance) Día 14/06/12. Arriba, 9:00 h. Abajo 16:00 h.

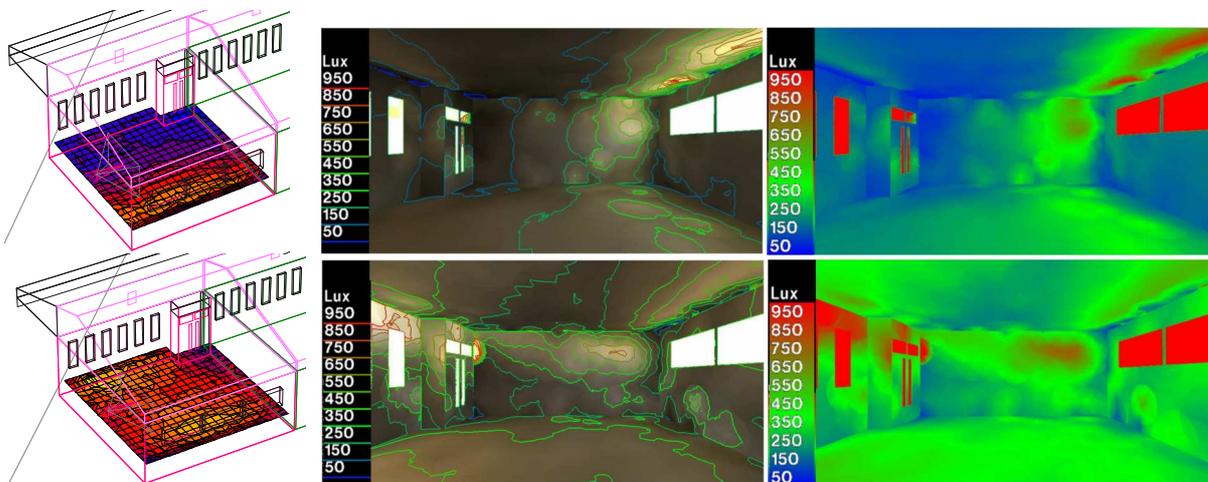


Figura 14. Imágenes aula 7 mejorada: grilla de análisis – líneas de contorno y falso color. (Interface Radiance) Día 14/06/12. Arriba, 9:00 h. Abajo 16:00 h.

En términos de iluminación natural, se logró aumentar los niveles de iluminancia en el orden de 212 lux en el aula 7 y 164 lux en el aula 5. Si bien los valores fluctúan alrededor de 400 lux, en los días de sol pleno y aún no se llega a los 500 lux recomendados, sólo con iluminación natural, las aulas ya se encuentran dentro de la banda de confort visual, con una mayor uniformidad en la distribución espacial de la luz, lo que redundará en un menor contraste de iluminancias.

Aplicando el mismo modelo para la orientación a NE – SO, los valores de iluminancia mejoran sustancialmente por la contribución de radiación directa desde el NE. Sin embargo, se advierte que la mancha solar afecta aproximadamente un 30% del área de piso y fachada opuesta interior, con un exceso de iluminancia (más de 2000 lux), lo que puede afectar el confort visual, mientras que las mejoras térmicas no son significativas. De ello se desprende que, los sistemas de aeventanamientos deben ser diseñados en función de la orientación y no es conveniente aplicar el mismo criterio para todas las aulas.

De acuerdo a este análisis y para este caso en particular, la relación de AV/AP y AV/AF apropiada, para un adecuado aprovechamiento de la luz natural y confort higrotérmico sería 8.5 % y 25 % al SE y 6% y 23% al NO respectivamente.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se analizaron los resultados del monitoreo higrotérmico y lumínico realizado durante 8 días del mes de junio 2012 correspondientes al período de fines de otoño, en un edificio escolar de Nivel Primario de la ciudad de Resistencia, Chaco y su contrastación con simulaciones efectuadas mediante Simedif, Ecotect y su interface Radiance, en condiciones reales de ocupación. A partir de la validación de simulaciones térmicas realizadas con un ajuste promedio del orden de 0.5°C, se simuló para el mismo periodo otoñal, el comportamiento térmico y lumínico de dos aulas tipo del edificio, con distinto factor de forma volumétrico a igual factor de forma en planta, con una envolvente mejorada mediante la regulación de sus áreas vidriadas, en diferentes orientaciones.

La optimización de las superficies de ganancia directa, mediante una relación de AV/AP y AV/AF de 8.5 % y 25 % al SE y 6% y 23% al NO respectivamente, permitió elevar las temperaturas mínimas hasta casi 4°C en los días frescos del período, y reducir las máximas más de 3°C en los días cálidos, ingresando las aulas analizadas en la banda de confort higrotérmico. Al mismo tiempo se obtuvieron mejores niveles de iluminancia (400 lux promedio) y uniformidad en la distribución espacial de la luz natural, lo cual se reflejaría en un ahorro del consumo eléctrico para iluminación.

Esta propuesta, realizada para el período escolar más desfavorable de otoño, puede ser extrapolada a las aulas de los otros edificios bajo estudio, que reúnan similares condiciones que las aulas analizadas. Se verificará la misma en las demás estaciones del año, a fin de determinar la pertinencia de su implementación y el alcance de sus beneficios.

REFERENCIAS

- Autodesk (2011). www.autodesk.com/ecotect-analysis (1 de agosto de 2013).
- Boutet M.L., Hernández A.L., Jacobo G.J., (2012) Validación de Simulaciones Interactivas con SIMEDIF y ECOTECT, a partir de Auditorías Energéticas de un Edificio Escolar de la ciudad de Resistencia. Avances en Energías Renovables y Ambiente (AVERMA), Vol. 16, Pp. 27 – 34. ISSN: 0329-5184, Argentina.
- Boutet M.L., Hernández A.L., Jacobo G.J., Martina P., Corace J. (2011) Auditorías Higrotérmicas y Lumínicas de dos Edificios Escolares de Nivel Inicial de la Ciudad de Resistencia, en Condiciones Reales de Ocupación. AVERMA, Vol. 15, Pp. 29 - 36. ISSN: 0329-5184, Argentina.
- Boutet M.L., Hernández A.L., Jacobo G.J., Martina P., Corace J. (2010a) Monitoreo Higrotérmico del Jardín Materno Infantil de la UNNE y simulación mediante ECOTECT, en condiciones reales de uso. AVERMA, Vol. 14, Pp. 17– 24. ISSN:0329-5184, Argentina.
- Boutet, M. L., Hernández A.L., Jacobo G.J., Corace J., Martina P. (2010b) Evaluación de las condiciones de Iluminación Natural y Artificial existentes en el Jardín Materno Infantil de la Universidad Nacional del Nordeste. AVERMA, Vol. 14, Pp. 25–32. ISSN: 0329-5184, Arg.
- Esteves A. y Pattini A (1999), Mecanismo de Accionamiento de Ventanas Altas. Laboratorio de Ambiente Humano y Vivenda (LAHV) INCIHUSA – CRICYT – CONICET. <http://www.asades.org.ar/averma.php> (1 de agosto de 2013).
- IRAM 11603 (1996). Acondicionamiento térmico de edificios. Clasificación bioambiental de la República Argentina. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales.
- Jacobo, G. J. (2001) El Confort en los Espacios Arquitectónicos de la Región Nordeste de Argentina, ISBN N° 978 – 43 – 4155 – 6, Moglia S.R.L., Corrientes, Argentina.
- Marsh A. J. (2003). ECOTECT Tutorials. Square One research PTY LTD.
- MCEN (1996) Ministerio de Cultura y Educación de la Nación, Criterios y Normativa Básica de Arquitectura Escolar, Cap. IV. Condiciones de habitabilidad.
- The Radiance Synthetic Imaging System. Lawrence Berkeley National Laboratories, Berkeley, California. <http://radsite.lbl.gov/radiance/> (1 de agosto de 2013).

ABSTRACT: In this paper the hygrothermal and lighting behavior of an Elementary School, located in the city of Resistencia, Chaco, which was monitored for a year, is described. The results of the measurements carried out during autumn 2012 period and its comparison with simulations made by Simedif, Ecotect and its Radiance interface, in real conditions of occupation are analyzed. An average data fit between measured and simulated temperature in the order of 0.5 °C was obtained, from which the thermal behavior of the building with an optimized envelope was simulated for the same period of autumn, by regulating its glazed areas. With the optimization proposal, better hygrothermal comfort conditions were verified, as well as higher levels of illuminance and uniformity in the spatial distribution of natural light, which would be reflected in an electrical consumption saving for lighting. **Keywords:** solar energy, passive conditioning, fenestration