

MAPA DE AHORRO ENERGÉTICO OBTENIBLE CON SISTEMAS SOLARES HÍBRIDOS DE CALENTAMIENTO DE AGUA DOMICILIARIA

A. Lanson¹, R. Righini², R. J. Aguerre³

Grupo de Estudios de la Radiación Solar - Instituto de Ecología y Desarrollo Sustentable (INEDES)
Universidad Nacional de Lujan (UNLu) - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas
(CONICET)

Tel. 02323-440241 – e-mail: gersolar@yahoo.com.ar gersolar.unlu@gmail.com

Recibido 26/07/17, aceptado 25/09/17

RESUMEN: En este trabajo se cuantificó el ahorro energético que podría conseguirse haciendo uso de la energía solar en el calentamiento de agua domiciliaria. Para lograrlo, se evaluó el consumo eléctrico de dos termotanques, uno solar compacto híbrido de baja complejidad y otro convencional. Ambos fueron sometidos a un perfil de consumo familiar que representa los hábitos típicos de la población nacional. Luego se modeló su desempeño con respecto a variables meteorológicas, y finalmente se proyectó el ahorro, diferencia de sus consumos, en otros emplazamientos del país. Los resultados de esta proyección permitieron confeccionar mapas de estimación de este ahorro energético en Argentina. Se estima que en promedio en la zona centro y norte del país este tipo de sistema solar ahorraría un 50 % de la energía que los convencionales usan, y se determinó el impacto económico de esta sustitución de tecnologías.

Palabras clave: energía solar térmica, mapa de ahorro, termotanque híbrido

INTRODUCCION

El balance energético de la Secretaría Nacional de Energía (BEN - 2014), actualmente Ministerio de Energía y Minería, señala que, en nuestro país, alrededor del 47 % del gas es consumido por los usuarios residenciales, el 8 % por el sector comercial y público, el 11 % por el transporte y el 34 % por la industria. A su vez los informes del Ente Nacional Regulador del Gas (ENARGAS) señalan que el uso del gas a nivel domiciliario depende de la temperatura media mensual. En el centro y norte del país el perfil de consumo domiciliario anual de gas de red se muestra prácticamente invariante entre años, y puede observarse que el 51 % del consumo total anual residencial por usuario corresponde a calefacción, mientras el 49 % restante corresponde a cocción y calentamiento de agua. De esta última porción, aproximadamente el 56 % es destinado específicamente al calentamiento de agua, el 22 % a cocción y el 22 % restante al consumo de los pilotos de los equipos a gas. El 13 % del total anual de gas consumido en Argentina está destinado a calentar agua domiciliaria, mientras que las importaciones de gas representan el 22 % de este volumen total. Por lo tanto, el consumo de energía para el calentamiento de agua sanitaria en la Argentina equivale a cerca del 55 % de las importaciones de gas (Gil, 2016).

Gran cantidad de trabajos consideran la Energía Solar Térmica como alternativa para la obtención de Agua Caliente Sanitaria (ACS). Luego de haber corroborado que es posible predecir el ahorro energético entre un sistema híbrido solar y uno convencional conociendo la radiación solar incidente en el plano del colector y la temperatura media ambiente (Bianchi y col., 2015; Lanson y col., 2015; Lanson y col., 2016), se buscó cotejar si la implementación de estos sistemas permitiría cubrir niveles significativos de las necesidades energéticas de las familias tipo que habitan el centro y norte del país, y estimar el posible ahorro energético que tendría en la Argentina la aplicación de esta tecnología

¹ Investigador GERSolar y docente auxiliar UNLu

² Investigador GERSolar y Profesor Titular UNLu

³ Investigador Independiente CONICET y Profesor Titular UM

MATERIALES Y MÉTODO

Con el objeto de diseñar un ensayo que permita medir y modelar el desempeño térmico de sistemas de calentamiento de agua domiciliario, se estudió el consumo diario de agua caliente de una familia tipo argentina. Para ello se partió de un trabajo publicado que establece que el perfil de consumo de agua caliente sanitaria es dependiente de la temperatura y es similar y regular en toda la zona centro y norte del país (Gil y col., 2011). Ese trabajo establece que los consumos de agua pueden representarse en cinco bandas horarias: 7:00; 7:30; 12:00; 20:00 y 20:30. A su vez establece que la temperatura de confort del agua caliente ronda los 42 °C. Tal como se publicó en un trabajo anterior (Lanson et al., 2013) se optó por tomar un volumen diario de 200 litros distribuido en 5 extracciones iguales.

Este protocolo de extracción se aplicó en un banco de ensayo descrito en un trabajo anterior (Lanson et al., 2012) que tomó como base un tablero diseñado para ensayos bajo norma de artefactos a gas de calentamiento de agua para su etiquetado de eficiencia energética. Se adaptó ese diseño a los requerimientos del ensayo en cuanto a las variables a medir, los requisitos de seguridad del laboratorio y el orden de magnitud del error aceptable tanto en la medición como en su prorrateo en los valores estimados. Las variables registradas por el instrumental fueron: temperatura ambiente interior y exterior; temperatura del agua en distintos puntos del proceso; radiación solar incidente en el plano del colector; consumo eléctrico y volumen de agua extraído. Las variables estimadas a partir de estos registros fueron: el índice de claridad del cielo y energía calórica extraída en agua caliente.

El ensayo se realizó sobre la comparación de un sistema compacto híbrido solar-eléctrico de placa plana y 290 litros de almacenamiento, con un termotanque eléctrico convencional de 160 litros. Los termostatos de ambos artefactos se configuraron para que operaran a la misma temperatura.

Se ejecutó el ensayo durante 13 meses y se consolidó una base de datos de 256 registros diarios. Esta base permitió llevar adelante numerosos análisis, tanto de consumo energético (Bianchi et al., 2015) como de ahorro energético (Lanson et al., 2015).

Se analizó en primera instancia la independencia de las variables intervinientes en cada sistema. De esta manera se confeccionó una base de datos simplificada pero suficientemente explicativa. Luego se analizó la relación entre el consumo eléctrico de cada sistema y estas variables. Con esta base se ajustaron modelos lineales de consumo eléctrico de ambos artefactos y el ahorro energético entre ellos.

La evaluación y comparación de estos modelos se realizó mediante indicadores estadísticos usuales: promedio, sesgo (MBE), sesgo medio (MBE) y relativo (MBE %), error cuadrático medio absoluto y porcentual (RMSE, RMSE %) y coeficiente de correlación lineal (R^2).

El ahorro energético entre ambos termotanques se modeló en función de las variables medidas. Entre ellas, la radiación solar diaria en el plano del colector (Rad); la temperatura media ambiente (\bar{T}_e); la temperatura máxima diaria (T_{max}); la energía extraída en agua caliente (EE_{ref}); la radiación solar en el plano del colector del día anterior (Rad.₁); el índice de claridad del cielo (K_t) y el índice de claridad del cielo del día anterior (K_{t-1}). En todos los casos se desarrollaron modelos lineales generales con buenos niveles de ajuste.

Se analizaron numerosos modelos de los cuales se muestran 9 en la Tabla 1 con los resultados de los indicadores mencionados, durante su validación. Puede observarse que el modelo ML7 se ajustó con las mismas variables que el modelo MADa, sin embargo este último se destaca de los anteriores. Éste resultó de un procesamiento de datos posterior y de mejor calidad. Los valores de ajuste obtenidos en este último caso hicieron que se optara por continuar el análisis con su aplicación.

Modelo	cte.	Rad	T _e	T _{max}	EE _{ref}	Rad ₋₁	K _t	K _{t-1}	Modelo	Validación		
									R ²	R ²	RMSE%	MBE%
ML1	-17,991	-0,049	0,239	-0,026	2,116	0,175	8,054	3,432	65%	68%	41%	-14%
ML2	-17,608	-0,057	0,209		2,054	0,179	7,955	3,316	65%	68%	41%	-14%
ML3	-17,810	-0,118	0,232	-0,023	2,101	0,267	10,527		65%	67%	42%	-14%
ML4	-17,750	0,149	0,188	-0,007	2,260	0,257			63%	71%	39%	-12%
ML5	-17,479	-0,122	0,205		2,047	0,268	10,367		65%	67%	42%	-14%
ML6	-3,166	-0,160	0,029			0,259	11,700		62%	66%	43%	-17%
ML7	-1,797	0,143	-0,019			0,247			60%	70%	40%	-15%
ML8	-17,773	0,160	0,207		2,117			9,563	64%	71%	39%	-13%
MADa	-2,892	0,406	0,009			0,791			94%	94%	33%	-8,0%

Tabla 1: Coeficientes de ajuste e indicadores del estudio de validación de los modelos de consumo analizados

Finalmente, luego de realizar un análisis de sensibilidad de las variables diarias del modelo MADa (Lanson et al., 2016), se obtuvo un modelo de ahorro energético simple, que puede aplicarse a valores diarios medios mensuales de radiación en el plano del colector y de temperatura ambiente, que responde a la siguiente expresión:

$$MADa = -2,892 + 1,197 Rad + 0,009 \bar{T}_e \quad (1)$$

Donde MADa es el ahorro energético diario medio mensual, entre el sistema híbrido y el convencional, Rad es la radiación diaria media mensual, y \bar{T}_e es la temperatura diaria media mensual.

Y un modelo de consumo eléctrico del sistema convencional que responde a la expresión:

$$MCCa = 9,996 - 0,183 \bar{T}_e \quad (2)$$

Donde MCCa es el consumo eléctrico del termostato convencional medio mensual, y \bar{T}_e es la temperatura diaria media mensual.

La relación entre estos dos modelos permite estimar el ahorro relativo porcentual que traería aparejado el uso del sistema compacto solar híbrido ensayado.

Por último se aplicaron estos dos modelos a datos diarios medios mensuales de radiación y temperatura de diferentes localidades del país, obtenidos por gentileza del Servicio Meteorológico Nacional y la Antigua Red Solarimétrica Argentina. A continuación, la Tabla 2 presenta esta información consolidada.

Modelos [kWh/año]		Consumo Convencional	Ahorro anual	Ahorro %
Jujuy	Abra Pampa	3.110	1.620	52%
Salta	Colonia S. Rosa	2.490	690	28%
Chaco	R. Sáenz Peña	2.220	1.070	48%
Tucuman	Famailá	2.360	850	36%
Misiones	Cerro Azul	2.210	950	43%
Corrientes	Mercedes	2.300	1.250	54%
Santa Fe	Rafaela	2.420	1.160	48%
Córdoba	Córdoba	2.400	1.080	45%
San Juan	San Juan	2.470	1.640	66%
Entre Rios	Paraná	2.410	1.170	49%
Córdoba	Marcos Juárez	2.470	1.070	43%
Buenos Aires	San Miguel	2.490	1.030	41%
Mendoza	Rama Caída	2.640	1.290	49%
Buenos Aires	Balcarce	2.730	1.000	37%
Río Negro	Bariloche	3.070	1.290	42%
Chubut	Trelew	2.750	1.090	40%

Tabla 2: Consumo convencional anual y Ahorro anual en kWh. Ahorro anual relativo en distintas localidades del país

RESULTADOS

Con los valores mensuales y el valor anual, tanto del ahorro energético como del consumo convencional, ambos presentados en la tabla anterior, mediante el método kriging, se realizaron mapas de ahorro que se presentan a continuación en las Figuras 1, 2, 3 y 4. El kriging es un método geoestadístico destinado a representar isolíneas minimizando los errores de interpolación. Es un método de interpolación lineal optimal, ya que minimiza los errores cometidos en la estimación del campo que se represente, incorporando información de la estructura de ese campo por medio de una función denominada variograma (Aguar, 1999). (Righini y Grossi Gallegos, 2000).

A continuación se describen los mapas elaborados:

- Figura 1: Mapa de ahorro anual obtenible por equipo instalado, en kWh
- Figura 2: Mapa de ahorro relativo por el uso de un sistema híbrido respecto de un sistema convencional eléctrico en el mes de Enero
- Figura 3: Mapa de ahorro relativo por el uso de un sistema híbrido respecto de un sistema convencional eléctrico en el mes de Junio
- Figura 4: Mapa de ahorro relativo por el uso de un sistema híbrido respecto de un sistema convencional eléctrico en el mes de Septiembre

Cabe recordar que el sistema híbrido ensayado dispone de una estructura fija que mantiene el colector solar inclinado a 42°. Todas las proyecciones se hicieron manteniendo esta condición.

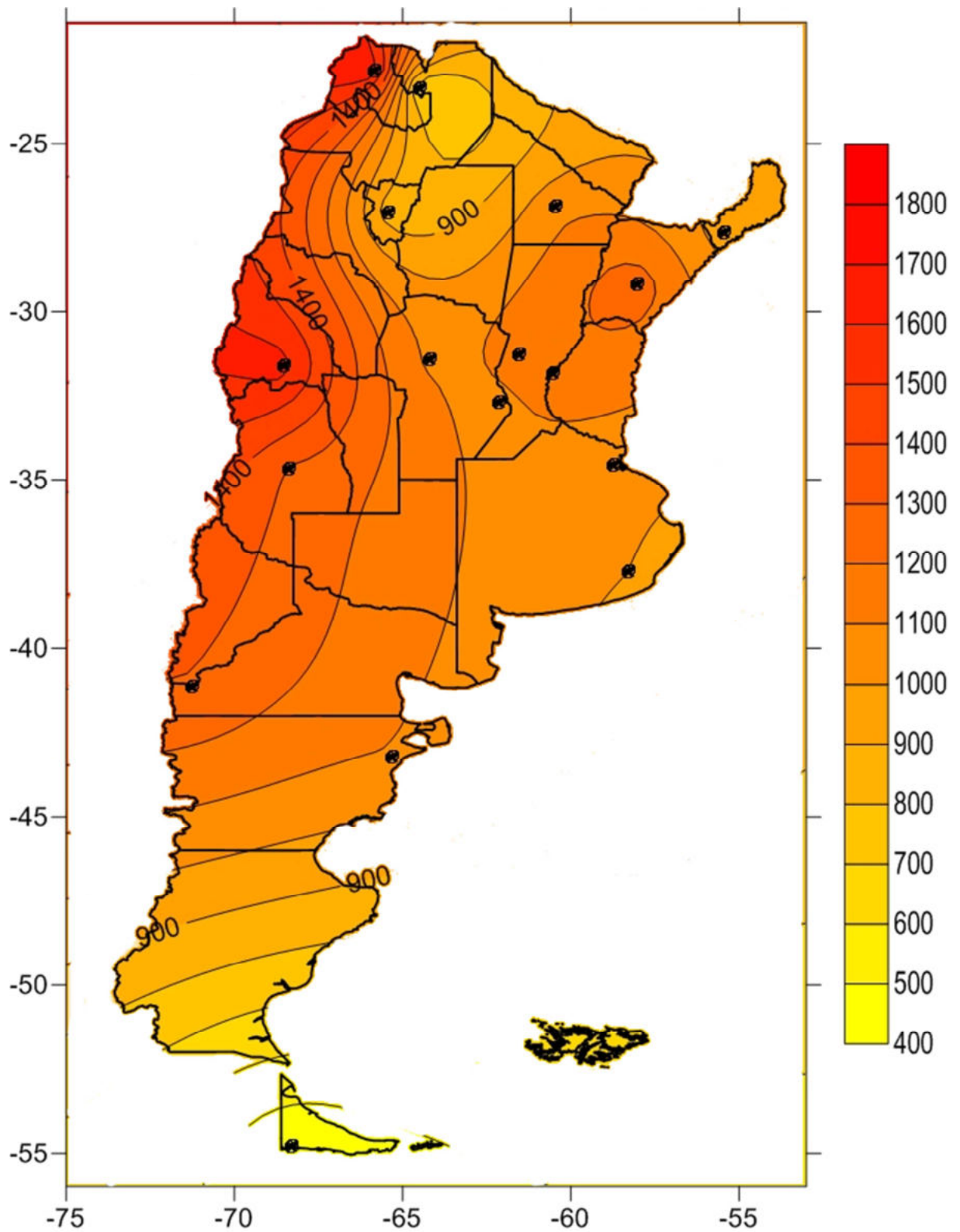


Figura 1: Mapa del ahorro promedio anual obtenible por equipo instalado en kWh.

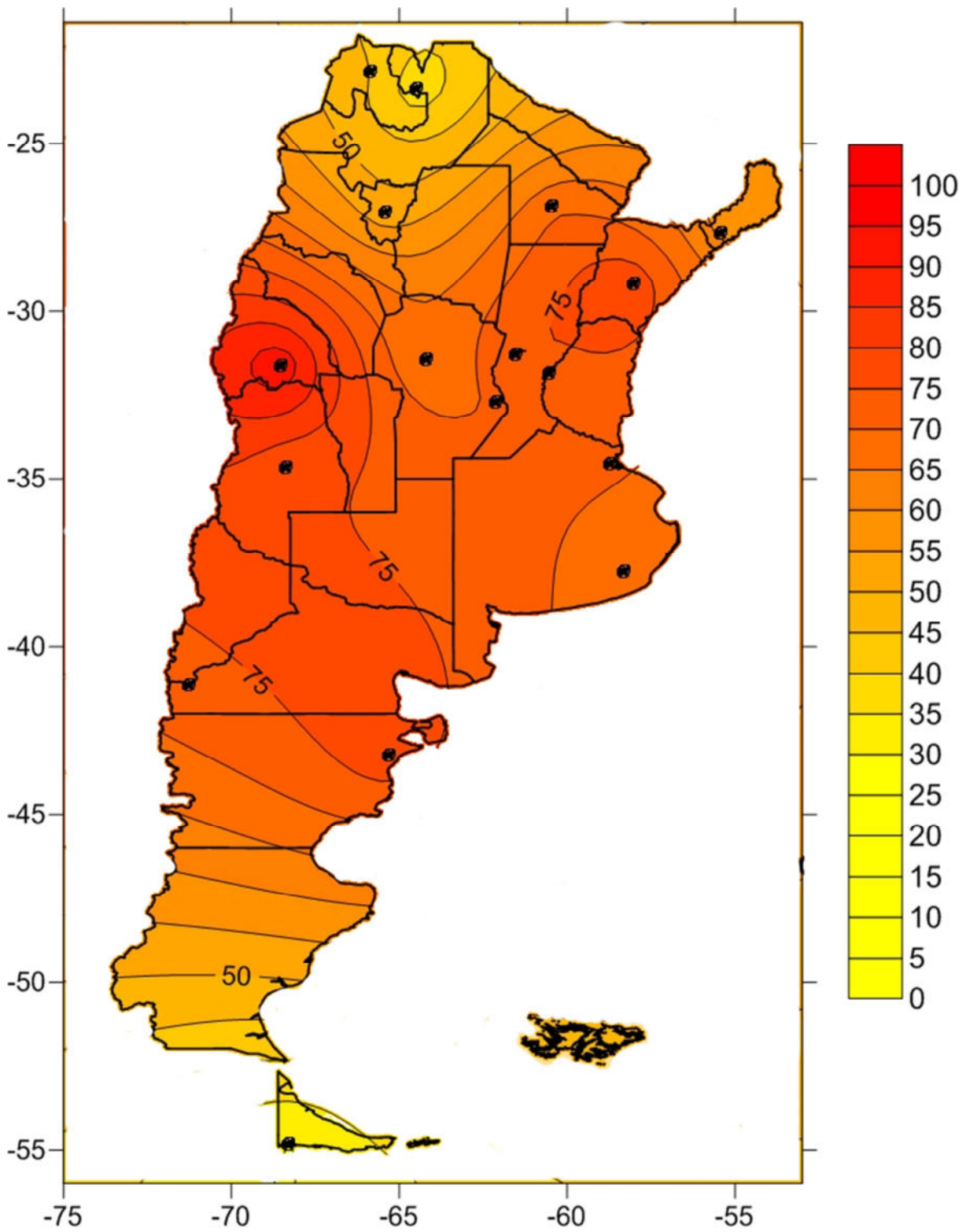


Figura 2: Mapa del ahorro relativo a un sistema convencional eléctrico promedio en el mes de Enero.

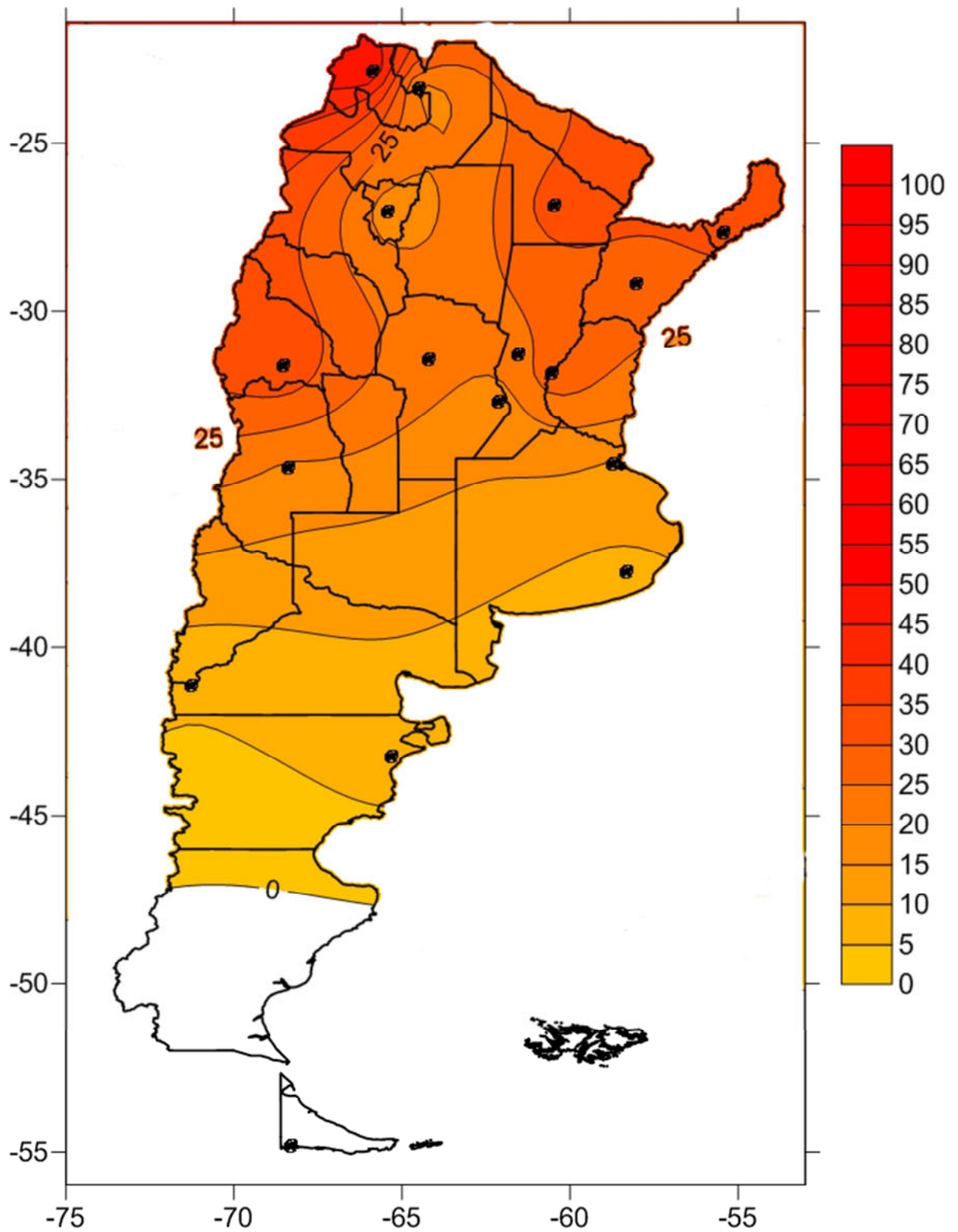


Figura 3: Mapa del ahorro relativo a un sistema convencional eléctrico promedio en el mes de Junio.

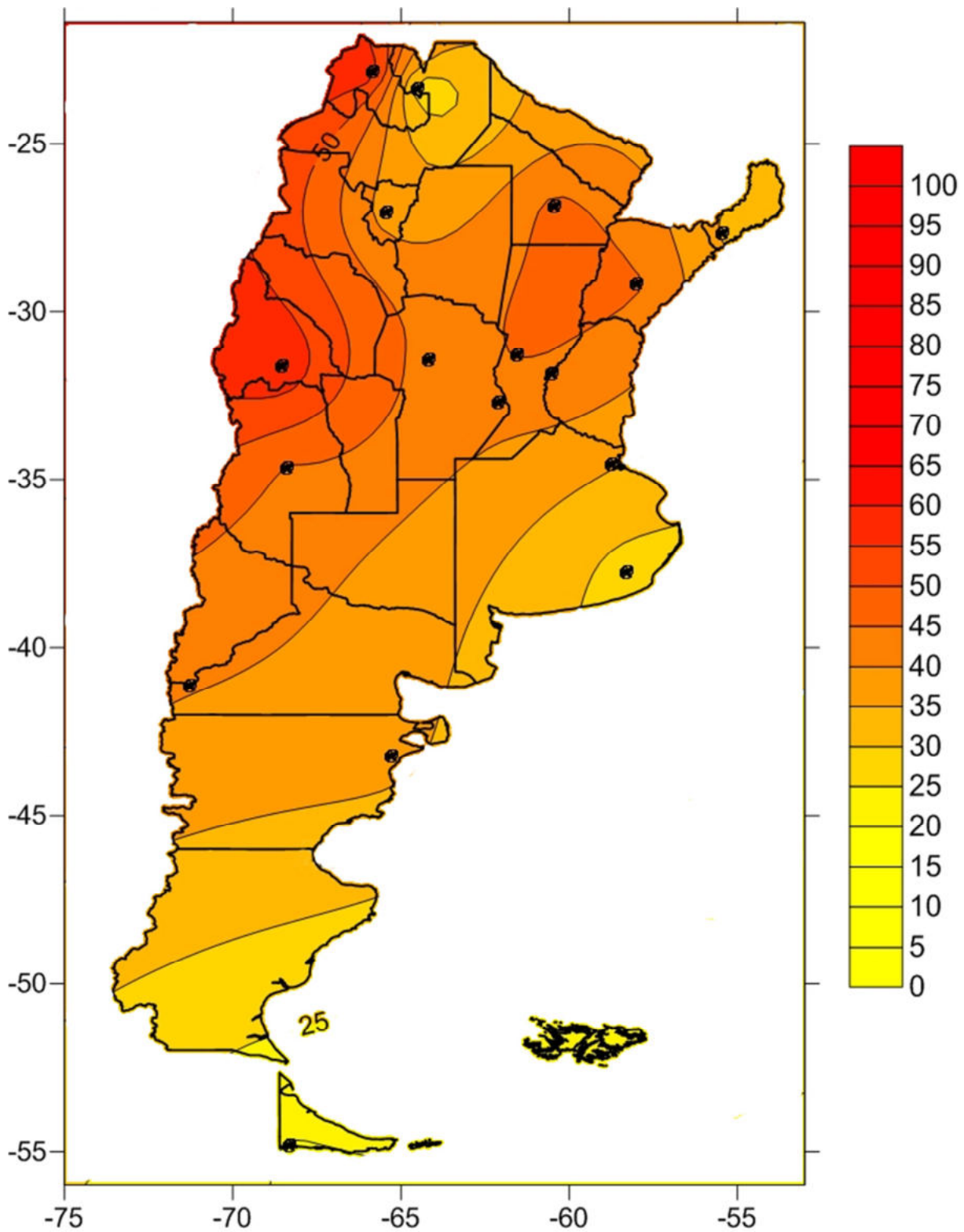


Figura 4: Mapa del ahorro relativo a un sistema convencional eléctrico promedio en el mes de Septiembre.

Una vez obtenido el mapa de ahorro energético anual por el uso de un sistema híbrido, se profundizó evaluando la cantidad de viviendas donde el uso de esta tecnología resulte fácilmente adoptable.

Para realizar este análisis se utilizaron los datos del censo 2010 de Población, Hogares y Viviendas (Cuadro H5: por tipo de vivienda, según combustible utilizado principalmente para cocinar) existentes en cada región de la página oficial <http://www.indec.gov.ar/>. De allí se extrajeron los registros de: cantidad de población y cantidad de viviendas particulares y colectivas (agrupado) por provincia. A posteriori se elaboró una base de datos con la distinción de cantidad de viviendas en función del combustible utilizado para cocinar. Esta clasificación distingue entre: Gas de red, Gas a granel (zeppelin), Gas en tubo, Gas en garrafa, Electricidad, Leña o carbón, otro.

El criterio empleado para determinar la cantidad de viviendas familiares que adoptarían un sistema híbrido solar-eléctrico como el ensayado, fue el siguiente:

- Las viviendas con cocción a gas de red no se consideraron en el cálculo de ahorro.
- Las viviendas con cocción a gas a granel y gas en tubo se unificaron, dado que es posible aplicar esta tecnología en estas viviendas. Se consideró que el 50 % de estas viviendas usa calentamiento eléctrico del agua sanitaria.
- Las viviendas con cocción a garrafa o eléctrica se agruparon como grupo focal dado que se considera el grupo de mayor interés en estos sistemas híbridos. Se estima que el 100 % de estas viviendas usa calentamiento eléctrico del agua sanitaria.
- Las viviendas con cocción a leña o carbón y otros se consideraron como grupo donde la aplicación de sistemas termosolares representa una mejora en la calidad de vida, la salud pública y del medio ambiente. En estos casos se consideró al ahorro como indicador del aporte solar en agua caliente.

La combinación del mapa ilustrado en la Figura 1 y el criterio descripto aplicado al censo habitacional realizado en 2010, permitió confeccionar el mapa de la Figura 5.

En este caso se ha concentrado toda la población provincial a las localidades de mayor población, generalmente coincidentes con la capital provincial. Salvo en el caso de la provincia de Buenos Aires donde el Gran Buenos Aires concentra el 61 % del total provincial, pero su cercanía con la Ciudad Autónoma de Buenos Aires no permitiría diferenciar el potencial de ambas jurisdicciones.

Se estimó el potencial ahorro que podría esperarse a nivel nacional, considerando únicamente las viviendas contempladas en el criterio descripto. Dado que la población al sur del río Colorado (Patagonia) tiene hábitos de consumo diferentes al perfil de consumo domiciliario aplicado durante el ensayo, se optó por excluir esta zona del análisis siguiente.

Y, a continuación, la Tabla 3 presenta el ahorro estimado por provincia según las características habitacionales de la población en el momento del censo 2010.

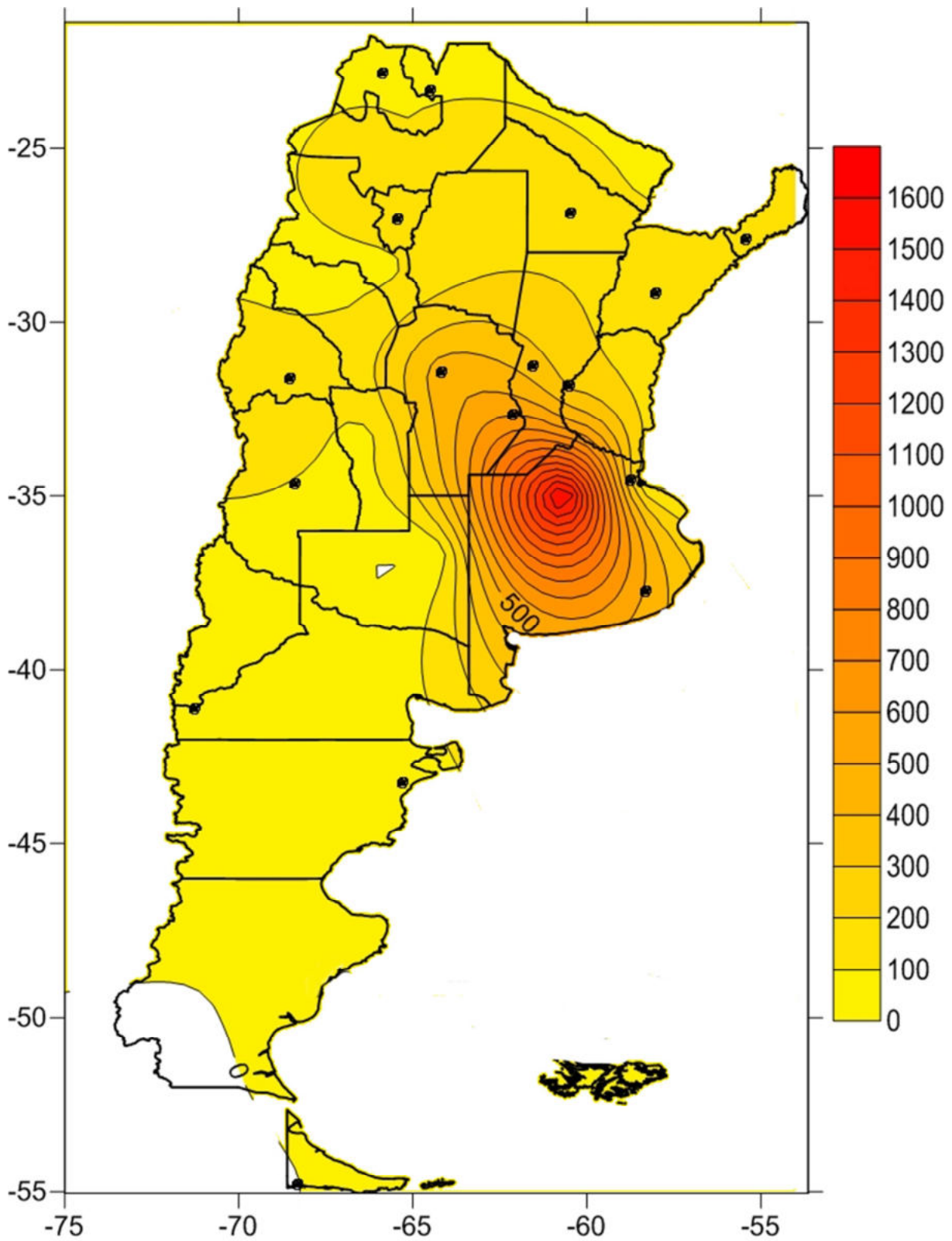


Figura 5: Mapa del ahorro energético promedio anual obtenible según las viviendas censadas en 2010 en GWh

Provincia	Total de hogares	Gas de red	Viviendas s/suministro	Viviendas c/ahorro	Ahorro unitario kWh/año	Ahorro ponderado GWh/año
CABA	1.150.134	1.060.248	1.887	87.061	1.030	90
Buenos Aires	4.789.484	3.110.444	12.226	1.608.614	1.018	1638
Catamarca	96.001	17.942	7.456	68.091	1.190	81
Chaco	288.422	1.455	556	160.051	1.070	171
Córdoba	1.031.843	523.012	7.821	463.748	1.075	499
Corrientes	267.797	1.178	609	148.352	1.250	185
Entre Ríos	375.121	96.638	8.067	259.143	1.170	303
Formosa	140.303	227	266	81.842	1.070	88
Jujuy	174.630	66.465	17.434	90.008	1.620	146
La Pampa	107.674	91.838	334	14.154	1.140	16
La Rioja	91.097	12.446	3.646	71.926	1.190	86
Mendoza	494.841	329.565	3.079	156.979	1.290	203
Misiones	302.953	1.527	710	186.816	950	177
Salta	299.794	125.294	37.911	135.400	1.155	156
San Juan	177.155	89.633	2.100	83.227	1.640	136
San Luis	126.922	67.437	1.938	54.822	1.180	65
Santa Fe	1.023.777	493.602	6.818	492.927	1.160	572
Santiago del Estero	218.025	46.165	42.133	128.221	1.000	128
Tucumán	368.538	147.292	14.539	204.943	850	174
Total C.+N. del país	11.524.511	6.282.408	169.530	4.496.321		4.914

Tabla 3: Clasificación de las viviendas según el combustible utilizado para cocinar del censo 2010 y el potencial ahorro energético que podría obtenerse con el uso de sistemas híbridos solares según el modelo MADa

CONCLUSIONES

Los mapas elaborados, en especial el del ahorro ponderado por las viviendas sin acceso a la red de gas natural, y que no utilizan combustibles como leña y otros para cocinar, dan una idea cuantitativa del impacto que la aplicación de la tecnología de los termotanques híbridos llevaría aparejado. La evaluación realizada arroja un ahorro total nacional de energía cercano a los 5.000 GWh al año. Considerando como base el Balance Energético Nacional del año 2014, esta energía equivale al 25 % de la producción anual de energía nuclear, o al 8 % del Gas importado durante ese año, o el 83 % del petróleo que fue importado en ese período. Las recientes licitaciones RENOVAR 1 y 1.5 prometen una generación promedio anual de 2.233 GWh/año en plantas Fotovoltaicas. Por lo tanto podemos decir que este ahorro equivale a 2,2 veces la implementación de ambas rondas. Más aún, ambas rondas totalizaron, entre generación Eólica, Fotovoltaica y otras, un total de 8.516 GWh/año, pero CAMMESA estima que en 2018 el consumo eléctrico será de 142.066 GWh, por lo tanto el compromiso del 8 % renovable se estima en 11.365 GWh. Este ahorro energético podría complementar las licitaciones ya adjudicadas con creces.

Si bien este ahorro energético no es constante a lo largo del año debido a que todos los climas son estacionales, en verano se concentra entre el 20 % y el 38 %, en invierno entre el 10 % y el 28 % y en las estaciones intermedias se distribuye entre el 50 % y el 54 %. Pero este ahorro podría aumentarse si se modificara el régimen de consumo de agua caliente y se lo concentrara en horas de la tarde. Este aspecto deberá analizarse en trabajos posteriores.

Cabe recordar que el uso de agua caliente sanitaria para el aseo personal no solo aporta una sensación de bienestar, sino que mejora las condiciones de salud de las personas que la utilizan y por

consiguiente disminuye los costos de la salud pública. Si se proveyera de sistemas solares a los hogares que no cuentan con gas o electricidad para cocción, en la zona centro y norte de Argentina, se podría aportar una energía anual equivalente a 172 GWh a esa población con un costo reducido.

Los mapas de ahorro presentados por este trabajo muestran el potencial que la tecnología del termotanque híbrido posee y podrían indicar un camino para que un etiquetado de dichos productos se transforme en un primer paso en vistas al fomento de su aplicación en todo el territorio nacional.

REFERENCIAS

Bianchi A., Lanson A. (2015). Modelado del consumo energético en termotanques solares híbridos y convencionales bajo exigencias normales de uso. Actas del Congreso Latinoamericano de Ingeniería y Ciencias Aplicadas 2015 pp. 1058-1067

Gil S., Bezzo E., Maubro M.A., Miotto J. M., Prieto R. (2011) Etiquetado de artefactos a gas, Hacia un uso más eficiente de la energía. *Petrotecnia - Revista del Instituto Argentino del Petróleo y del Gas*. LII, No8, pp. 104-111. Dic (2011). ISSN 0031-6598

Lanson A., Righini R., Benitez E. E., Bezzo E., Roldán A., Unger H., Gil S. (2013) Hacia un uso más eficiente del gas – Aprovechamiento de la energía solar en Argentina. Actas del Encuentro Latinoamericano de Uso Racional y Eficiente de la Energía - 25,26 y 27 de septiembre de 2013

Lanson A., Benítez E., Roldán A., Righini R. (2012) Banco de ensayo de ahorro energético de termotanques híbridos. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. Vol. 16, pp. 08.65-08.70 - ISSN 0329-5184

Lanson A., Bianchi A. (2015). Estimación del ahorro energético que podría obtenerse del uso de sistemas termosolares híbridos en distintos puntos del país. Acta de la XXXVIII Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 3, pp. 08.249-08.259

Lanson A., Bianchi A. (2016). Análisis y proyección del modelo de ahorro que representa el uso de un sistema híbrido solar eléctrico para calentamiento de agua domiciliaria. Acta de la XXXIX Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 4, pp. 08.57-08.68. ISBN 978-987-29873-0-5

ABSTRACT

The purpose of this project is to quantify the potential energy savings that could be achieved by using solar energy in domestic water heating. To achieve this objective, the energy performance of two water heating systems, a low complexity solar and a conventional one, were evaluated. Both were submitted to a typical household consumption profile that represents the habits of the majority of the national population. Their behavior was then modeled with respect to meteorological variables and their performance was finally the saving between them was projected in other locations in the country. The results of this projection allowed us to make estimation maps of the energy saving that its use would bring in Argentina. It is estimated that on average in the central and northern areas of the country these artifacts would save 50 % of the energy that conventional ones use on the water heating, and their economic implications are considerable.

Keywords: Thermal solar energy, savings map, hybrid boiler