

## ALTERNATIVAS PARA LA EVALUACION DEL RECURSO SOLAR EN ARGENTINA

H. Grossi Gallegos\*, R. Righini y C. Raichijk

Universidad Nacional de Luján (UNLu), Departamento de Ciencias Básicas, Grupo de Estudios de la Radiación Solar (GERSolar), Rutas 5 y 7, (6700) Luján, Buenos Aires, ARGENTINA – E-mail: [grossi@mail.unlu.edu.ar](mailto:grossi@mail.unlu.edu.ar)

### RESUMEN

Ante la escasez de datos medidos de irradiación solar lo suficientemente precisos y que satisficieran las condiciones estadísticas como para ser considerados representativos en el tiempo y en el espacio, fueron apareciendo alternativas para estimarlos a partir de la información meteorológica existente mediante un conjunto de correlaciones establecidas estadísticamente. Utilizando la debida a Ångström-Prescott y métodos geoestadísticos de interpolación, este grupo elaboró recientemente nuevas cartas, pero se continúa trabajando en alternativas como las relaciones de Suerhcke o de Bristow-Campbell, y con la estimación satelital a partir de imágenes GOES. Se comentan en este trabajo tanto los resultados obtenidos como las metodologías utilizadas.

Palabras Claves: solar, recurso, evaluación, alternativas

### 1. INTRODUCCIÓN

En la década del '70 comienzan a producirse los primeros trabajos locales tendientes a establecer la distribución de la radiación solar en Argentina. La mayoría de las mediciones se realizaban con piranógrafos bimetálicos del tipo Robitzsch, excepto en seis estaciones del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) en las que se encontraban instalados desde 1964 piranómetros termoeléctricos. En 1972 aparecieron las cartas de radiación solar global mensual y anual de Crivelli y Pedregal [1], construidas en base a correlaciones establecidas entre la heliofanía y la radiación global medida en el país.

El surgimiento de diferentes grupos que comenzaban a trabajar en el aprovechamiento de la energía solar motivó que se elaborara en 1975 un proyecto de relevamiento solarimétrico con fines energéticos. Luego de una serie de estudios llevados a cabo sobre la información producida por la Red Solarimétrica que se instaló (y que llegó a operar 41 estaciones en Argentina), Grossi Gallegos [2, 3] elaboró en 1997 un conjunto de cartas con la distribución espacio-temporal del promedio de la irradiación global diaria.

En este trabajo se presentaron 12 cartas con la distribución mensual del valor medio de la irradiación global diaria y una con su distribución anual, utilizando toda la información

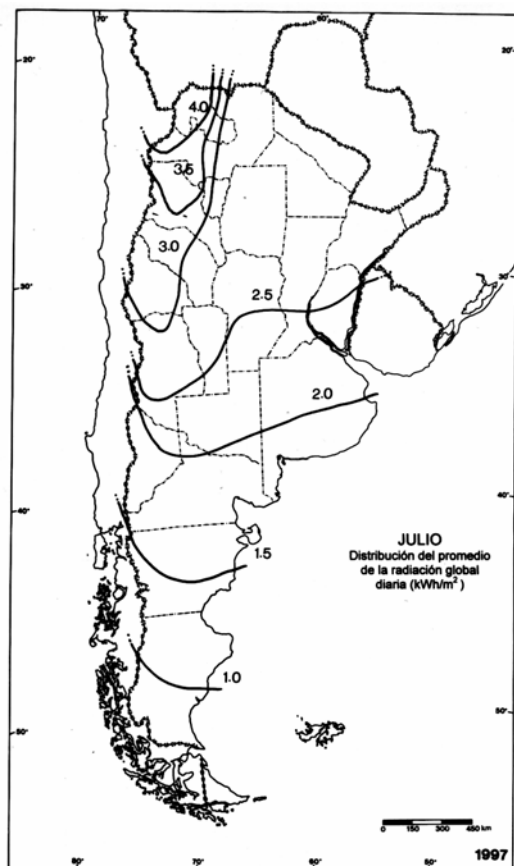
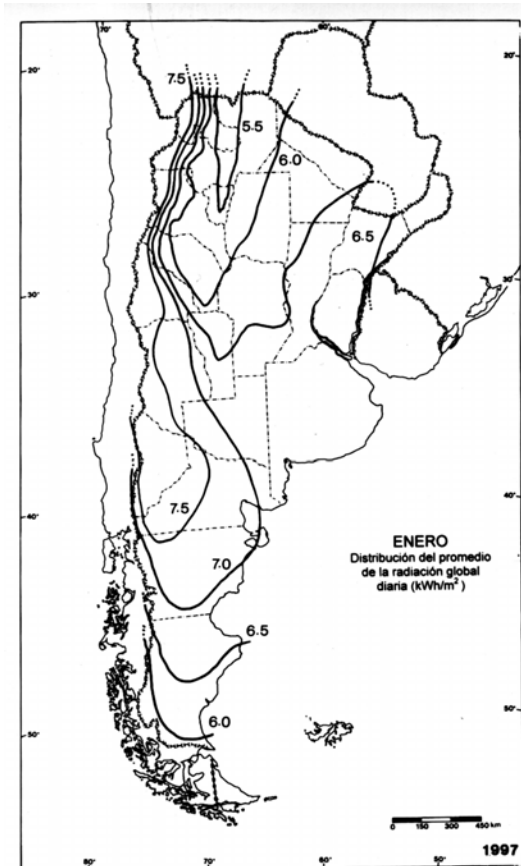
disponible hasta ese momento en el país, ya fuera proveniente de datos de irradiación diaria tomados por piranómetros de la Red Solarimétrica de Argentina o de horas de brillo solar medidos por la Red del SMN, evaluándose el error cometido debido a la inclusión de estimaciones e interpolaciones como no superior al 10%. En la Figura 1 se presentan los resultados correspondientes a los meses de Enero y Julio, expresados en kWh/m<sup>2</sup>.

En muchas regiones la cobertura espacial resultó inadecuada, deficiente (en particular, en la Patagonia) o inexistente, por lo que se recomendó en ese momento continuar la medición del recurso mejorando la cobertura espacial y la instrumentación utilizada.

Ante la escasez de datos medidos de irradiación solar lo suficientemente precisos y que satisficieran las condiciones estadísticas como para ser considerados representativos en el tiempo y en el espacio, fueron apareciendo en el mundo alternativas para estimarlos a partir de la información medida en tierra o proveniente de sensores remotos, estableciéndose un conjunto de correlaciones determinadas estadísticamente.

Fue así que, ante la salida de servicio de la mayor parte de las estaciones que constituían la Red Solarimétrica y ante la necesidad de tratar de mejorar la definición y los resultados de las cartas mencionadas, se recurrió a estas herramientas alternativas mencionadas en el párrafo anterior.

\*Miembro de la Carrera del Investigador del CONICET



**Figura 1.** Distribución espacial del promedio mensual de la irradiación solar global diaria sobre un plano horizontal en Argentina en los meses de enero y julio [ $\text{kWh/m}^2\text{-día}$ ], según [3].

## 2. DESARROLLO DEL TRABAJO

### 2.1. Análisis de la base Surface Solar Energy (SSE) Data Set, Versión 1.0

Por un lado se emprendió el estudio estadístico del ajuste de los datos satelitales de irradiación disponibles en INTERNET, en la base conocida como Surface Solar Energy (SSE) Data Set, Versión 1.0, con los valores de tierra. El objetivo era evaluar la posibilidad de su utilización como complemento de los datos ya usados [4] y su empleo a fin de trazar cartas en zonas homogéneas como la Pampa Húmeda, empleando métodos geoestadísticos en el trazado de las isólinas de irradiación [5] No obstante, las series temporales disponibles son limitadas en el tiempo, por lo que su representatividad climatológica es objetable. Los interesados pueden consultar los resultados en <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>; los promedios ofrecidos se basan en sólo 10 años y su representatividad climatológica es objetable, mientras que la incerteza de los resultados publicados va de 13 a 16%, de acuerdo con lo evaluado por sus responsables.

### 2.2. Análisis de correlaciones establecidas entre los promedios de la irradiación global y los de la heliofanía.

Uno de los parámetros más vastamente medido, tanto espacial cuanto temporalmente, es la heliofanía efectiva, también conocida como horas de brillo solar. Las primeras mediciones en Argentina comenzaron a realizarse a fines de 1800, disponiéndose hoy en día en el S.M.N.) de series temporales digitalizadas a partir de 1956 (lamentablemente, es difícil la ubicación de los registros anteriores a esta fecha y, más aún, la verificación de las fajas ya que las mismas fueron destruidas).

Es de destacar que, a pesar de todas las críticas que se le pueden hacer [6], correlaciones entre las horas de brillo solar y la irradiación solar global (tales como las de Ångström-Prescott, que veremos más adelante) pueden recomendarse para evaluar la energía disponible en países de Sudamérica o similares. Es previsible que en un futuro no muy lejano esta metodología será obsoleta frente a la información brindada por los satélites meteorológicos, pero su empleo actual es aceptable y da la posibilidad de rescatar información del pasado, lo que permite evaluar cambios asociados a variaciones climáticas locales o globales.

En primer lugar se trazaron las cartas con la distribución espacio-temporal de la heliofanía [7]. Esto llevó a que se emplearan los valores

históricos de 131 estaciones de Argentina, 16 de Brasil, 7 de Paraguay y 23 del Sur de Chile; la información considerada de estos últimos países corresponde a ubicaciones confiables cercanas a la frontera, las que fueron seleccionadas para dar continuidad a las isolíneas de horas de brillo solar más allá de los límites políticos.

La zona del Noroeste Argentino fue analizada con especial cuidado, debido a que existen en ella mayormente registros de estaciones situadas a poca altura respecto al nivel del mar. Sin embargo esta región presenta altitudes importantes en vastas áreas, por lo que considerar solamente los datos de las estaciones disponibles podría generar una distorsión en los mapas que los alejara significativamente de la realidad. se debe tener además en cuenta que en esta región las zonas altas presentan características particulares: un número de días con bajos valores de nubosidad (menor o igual que 2/8 de cielo cubierto) en invierno (más de 30) y en verano (entre 5 y 20), menos de 10 mm de lluvia precipitada en julio y entre 50 y 100 mm en enero [8,9].

Para intentar salvar este inconveniente se estudió la dependencia de las horas de brillo solar con la altura en la zona; se encontró así que, dado el bajo número de estaciones y la dificultad de proponer un modelo físico apropiado, la relación puede aproximarse linealmente, obteniéndose las pendientes y las ordenadas al origen de las rectas de correlación; el promedio anual indica un incremento de más de una hora cada mil metros. Con dichos valores se estimaron promedios mensuales de horas de brillo solar para sitios ubicados a alturas representativas de vastas zonas de la Puna argentina y boliviana (para hacer válida su extrapolación espacial se seleccionaron en general ubicaciones correspondientes a planicies de altura), valores que posteriormente fueron incorporados al análisis realizado empleando la metodología geoestadística ya mencionada.

### 2.2.1. Correlación de Ångström-Prescott

La correlación de Ångström-Prescott [10, 11] a la que ya se hizo mención toma la forma:

$$\overline{K_t} = \frac{\overline{H}}{H_0} = a + b \frac{\overline{n}}{N} \quad (1)$$

en donde H es la irradiación solar global diaria registrada en superficie, H<sub>0</sub> la correspondiente irradiación fuera de la atmósfera, n la heliofanía efectiva (esto es, las horas durante las cuales la radiación solar directa quema la faja de los

piranógrafos del tipo de Campbell-Stokes, destinados a medir este parámetro) y N la duración teórica del día; las barras sobre los símbolos indican promedios mensuales y *a* y *b* son constantes determinadas al ajustar la correlación entre los datos.

Lo que hicieron luego Righini et al. [12] fue determinar la variación espacial de las constantes de la correlación, determinadas para cada localidad en la que se cuenta con datos simultáneos de irradiación global y horas de brillo solar, utilizando métodos geoestadísticos de interpolación. La distribución geográfica de las isolíneas fue utilizada para estimar los valores de dichos coeficientes en cada una de las 177 estaciones de con datos de horas de brillo solar consideradas en Argentina, Bolivia, Chile, Brasil y Paraguay.

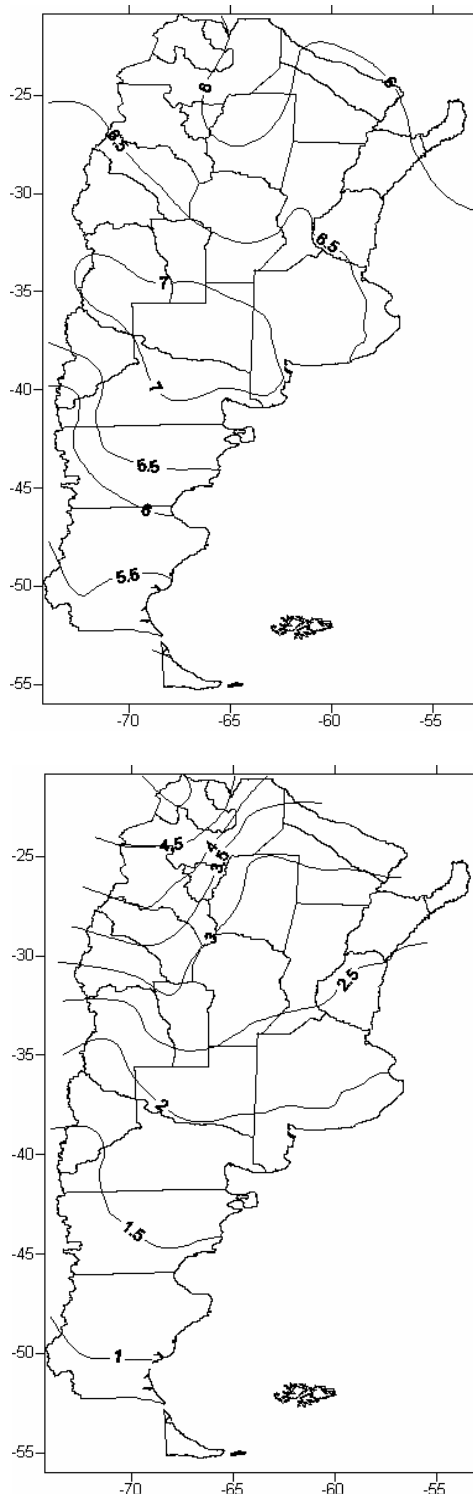
Una vez obtenidos con un programa utilitario comercial los mapas con la distribución espacial correspondientes a las constantes *a* y *b* de la correlación lineal de Ångström-Prescott, se operó con ellos aplicando la mencionada ecuación a cada ubicación dentro de la región considerada, para calcular así la irradiación global media mensual en plano horizontal a nivel del suelo.

Los resultados así obtenidos se representaron en el mapa de la República Argentina, empleando nuevamente kriging para trazar las isolíneas de irradiación global media separadas cada 0.5 kWh/m<sup>2</sup>, dado que ése es el límite impuesto por considerar un 10% de error en la estimación de la irradiación media mensual mediante el método empleado. En las Figura 2 se presentan a modo de ejemplo los resultados correspondientes a los meses de Enero y Julio.

Es de destacar la importancia de obtener mapas de irradiación global como los conseguidos, empleando solamente 26 estaciones para determinar los coeficientes *a* y *b* para un territorio de considerable extensión como Argentina.

Estos resultados muestran la razonabilidad del uso de los métodos de interpolación espacial como los empleados para posibilitar, con unas pocas estaciones que presenten una adecuada distribución espacial y en donde se hubiesen determinado localmente los coeficientes de Ångström-Prescott a partir de mediciones simultáneas de horas de brillo solar e irradiación global, la determinación de dichos coeficientes en una zona muy extensa y, sobre la base de ellos, calcular los promedios mensuales de irradiación global diaria recibida en un plano horizontal a nivel del suelo, obteniendo una idea preliminar de la distribución del recurso solar con un error estimado del orden del 10 %.

Si la zona a estudiar tuviera variaciones importantes de altura se hace necesario analizar previamente la influencia de la misma sobre las horas de brillo solar, como se mostró en este trabajo.



**Figura 2.** Distribución espacial del promedio mensual de la irradiación solar global diaria sobre un plano horizontal en Argentina en los meses de enero (arriba) y julio (abajo) expresados en kWh/m<sup>2</sup>-día, según [12].

Por lo tanto, consideramos que la metodología desarrollada constituye una alternativa válida

para todos aquellos países que disponen de un número elevado de estaciones de medición de las horas de brillo solar, con registros suficientemente extensos, y con pocas estaciones de medición simultánea de la irradiación solar global con piranómetros.

Comparando los valores estimados con los medidos en estaciones que no fueron utilizados en el cálculo de las constantes se observa en general una subestimación media del 4% (con valores que van de -1.2% en mayo a -5.7% en marzo) y un error cuadrático medio del 9.4% (con valores que van de 6.9% en agosto a 11.6% en junio y diciembre).

### 2.2.2. Correlación de Suehrcke

El modelo desarrollado por Suehrcke [13] es simple y vuelve a las fuentes al retomar el concepto de día claro, utilizando en su deducción la ecuación establecida por Page [14] para estimar la fracción de irradiación difusa en base al índice de claridad. Este modelo fue ensayado a escala mundial [15] y también localmente [16] utilizando un único coeficiente medio de claridad de día claro con un valor de 0.70, mostrándose que su comportamiento era adecuado, que la irradiación estimada presentaba una gran dispersión (12% en promedio, en el trabajo citado en primer término) y que no quedaba en claro estadísticamente que su capacidad predictiva superara a la de los viejos métodos.

La relación propuesta por Suehrcke es:

$$\frac{\bar{n}}{N} = \left( \frac{\bar{K}_t}{K_c} \right)^2 \quad (2)$$

en donde  $K_c = H_c/H_0$  es el índice medio de claridad de días claros,  $H_c$  la irradiación medida en día claro,  $n$  el número de horas de brillo de Sol registradas en un heliógrafo de Campbell-Stokes y  $N$  la duración teórica del día medida en horas y en donde las barras indican promedios mensuales.

Debe tenerse en cuenta que así utilizada no abarca la diversidad de condiciones locales que pueden afectar a la radiación solar que llega a la superficie, por lo que consideramos necesario derivar localmente este tipo de correlaciones.

Para tratar de tener en cuenta esta diversidad Grossi Gallegos et al. [17] determinaron para Argentina los promedios mensuales de  $K_c$  para 21 estaciones de la Red Solarimétrica. Lo que se hizo a continuación fue estimar para cada estación, para los meses de enero y julio, los valores medios de la irradiación global con el modelo de Suehrcke, utilizando en primer lugar

el valor de 0.70 para el promedio del índice de claridad correspondiente a días claros para todos los meses y para todas las estaciones; y en segundo lugar, se estimaron estos valores utilizando en cada estación y para cada mes los valores determinados localmente. Un resumen de los resultados obtenidos se muestra en la Tabla 1.

Período	$K_c = 0.70$	$K_c$ local
Mes de enero	7.3	4.3
Mes de julio	13.2	9.8

Tabla 1. Errores relativos porcentuales promedio cometidos en las estimaciones efectuadas por el método de Suehrcke utilizando un índice de claridad medio único (0.70) o el determinado para cada estación y para cada mes, según [17].

Se puede observar que para los dos meses elegidos, que suelen corresponder a los valores máximos y mínimos de la irradiación solar global, la estimación efectuada con el método de Suehrcke con coeficiente fijo (esto es, 0.70) difiere más de la medida con piranómetros de lo que lo hace la efectuada con el mismo método pero utilizando el valor promedio del índice de claridad correspondiente a días claros determinados localmente.

Estos valores de  $K_c$  fueron tomados por Raichijk et al. [18] para aplicar una metodología similar al trabajo ya citado [12], esto es, utilizando métodos geoestadísticos obtuvo las cartas con la distribución espacial de los  $K_c$  y obtuvo su valor para cada localidad en la que contaba con valores de heliofanía. Operaron con ellos aplicando la ecuación de Suehrcke a cada ubicación dentro de la región considerada para calcular así la irradiación global media mensual en plano horizontal a nivel del suelo y aplicaron nuevamente el kriging para obtener un juego de 12 cartas mensuales con su distribución espacial. En la Figura 3 se muestran los resultados obtenidos para los meses de Enero y Julio. Comparando los valores estimados por este método con datos medidos en tierra en estaciones no utilizadas para establecer ambas correlaciones se calculó el error cuadrático medio (MRSE) y el error medio (MBE) para evaluar su bondad. Comparando de manera similar los valores estimados con los medidos en estaciones que no fueron utilizados en el cálculo de las constantes se observó en general una subestimación media del 3.8% (con valores que van de -0% en junio a -5.8% en enero y octubre) y un error cuadrático medio del 9.4% (con

valores que van de 7.7% en agosto a 12.1% en junio).

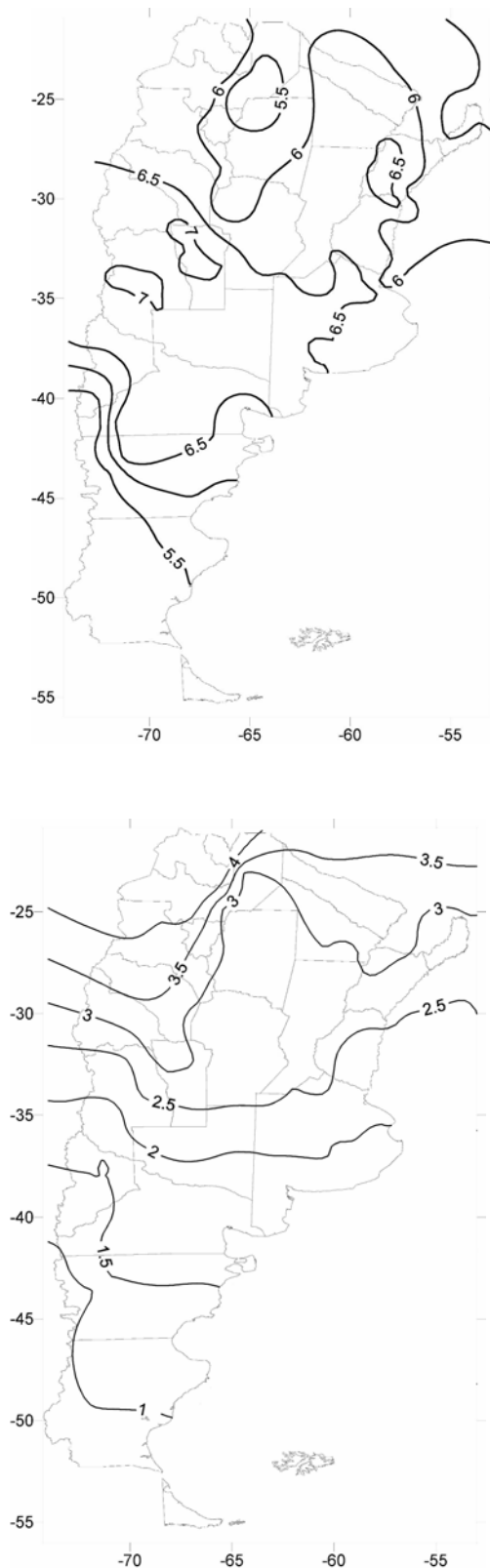


Figura 3. Distribución espacial del promedio mensual de la irradiación solar global diaria sobre un plano horizontal en Argentina en los meses de enero (arriba) y julio (abajo) expresados en  $\text{kWh/m}^2\text{-día}$ , según [18].

Una alternativa a la planteada [19] consiste en calcular la irradiación global para un día claro a través de un modelo teórico simplificado (ley de Beer-Bouguer-Lambert) usando un coeficiente de atenuación único  $k_R$  para la dispersión (sin la dependencia con la longitud de onda que establece Rayleigh).

### 2.3. Establecimiento de un modelo de evaluación de la irradiación global a partir de datos satelitales.

Tarpley [20], usando observaciones horarias del satélite GOES y de 22 piranómetros, desarrolló su método para las Grandes Praderas de los Estados Unidos.

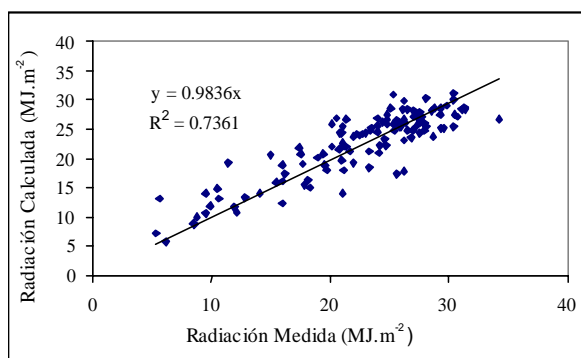
El algoritmo empleado fue modificado por Justus y Tarpley [21], empleándolo para la elaboración de un Atlas de radiación solar basado en imágenes satelitales para los Estados Unidos, México y parte de Sud América. Posteriormente, Frulla et al. [22] compararon los resultados obtenidos por la aplicación del algoritmo con datos de estaciones piranométricas del país, encontrando errores medios del 15 al 20% valores para diarios, los que se reducían 8 % cuando se trabajaba con valores medios mensuales.

El satélite geostacionario GOES 8 brinda imágenes del continente americano que llegan en el sur hasta Tierra del Fuego. Su frecuencia de muestreo es de aproximadamente 30 minutos, y la resolución espacial es de 1 km en el nadir del satélite. Estas características lo hacen especialmente apropiado para evaluar el recurso solar en superficies tan extensas como la que presenta Argentina, empleando un modelo estadístico como el de Tarpley.

En un trabajo reciente Righini [23] presentó los primeros resultados tendientes a establecer localmente un modelo de estimación satelital basado en el de Tarpley. Se tomaron imágenes satelitales GOES 8, en su canal visible, para los meses de mayo de 2000 y enero de 2001. Las estaciones de medición consideradas para calcular las constantes de ajuste fueron Cerro Azul, Paraná, Córdoba, San Miguel y Luján. Todas ellas contaban con piranómetros que integraban diariamente los valores de radiación solar recibidos. La estación de Luján no cuenta con datos de mayo de 2000, por lo que no fue considerada para los cálculos correspondientes a ese mes.

En la Figura 4 se presentan los resultados de la correlación de los valores diarios estimados con este modelo y los valores medidos en tierra, los que muestran la factibilidad del desarrollo y la

aplicación en Argentina de un modelo del tipo del propuesto por Tarpley.



**Figura 4.** . Valores diarios de irradiación global estimados empleando el modelo de Tarpley versus valores medidos para todas las estaciones en el mes de enero de 2001, expresados en  $\text{MJ}/\text{m}^2$ , según [23].

El uso de constantes propias para las zonas muestra que es posible calcular datos diarios con errores cuadráticos medios que alcanzan un máximo de 24%, comparable al hallado en [22], y los promedios mensuales calculados mostraron un mejor ajuste (si bien se trata de pocos datos).

### 2.4. Análisis de correlaciones establecidas entre los promedios de la irradiación global y la amplitud térmica.

Como las estaciones meteorológicas más sencillas miden las temperaturas máxima y mínima del aire y la precipitación diarias, se han destinado variados esfuerzos para tratar de estimar la irradiación global a partir de dichas mediciones.

Una de las más sencillas fue la establecida por Hargreaves et al. [24] como una función lineal de la raíz cuadrada de la amplitud térmica, esto es:

$$\frac{\overline{H}}{\overline{H}_0} = a + b(\overline{T_{\max} - T_{\min}})^{1/2} \quad (3)$$

en donde  $(T_{\max} - T_{\min})$  es el salto térmico diario. Por otra parte, en la preparación del Atlas Solar del Perú publicado recientemente [25] se utilizó para completar los datos de tierra la relación de Bristow-Campbell [26]:

$$\frac{\overline{H}}{\overline{H}_0} = a \left\{ 1 - \exp \left[ -b(\overline{T_{\max} - T_{\min}})^c \right] \right\} \quad (4)$$

en donde  $a$ ,  $b$  y  $c$  son constantes a determinar localmente, obteniendo un mejor ajuste que con la de Ångström-PreScott.

Ambas ecuaciones han tenido un amplio uso entre los agrometeorólogos y están siendo analizadas para ver la factibilidad de su uso en Argentina, obtener con ellas nuevas cartas y evaluar la calidad de la estimación.

#### 4. CONCLUSIONES

Dado que las posibilidades de mejoramiento de la cobertura espacial con una red de estaciones de medición de la irradiación solar global en tierra en Argentina con instrumental apropiado son pocas, consideramos que estas metodologías alternativas constituyen una propuesta válida para nuestro país y todos aquellos que disponen de un número elevado de estaciones de medición de las horas de brillo solar, con registros suficientemente extensos, y con unas pocas estaciones de medición simultánea de la irradiación solar global con piranómetros.

Analizando los errores de estimación que se cometen al utilizarlas pueden a la vez servir para determinar en qué zonas sería conveniente instalar algunas estaciones piranométricas que mejoren el conocimiento del recurso.

Por otra parte, es de destacar que la metodología satelital permite la estimación de la irradiación solar en grandes áreas de nuestro país con un muy buen ajuste en las medias mensuales, si bien con desviaciones apreciables en los datos diarios. Una rutina operativa que tomara datos satelitales y los procesara diariamente, calculando las constantes de ajuste con unas pocas estaciones de medición de calidad ubicadas en sitios adecuadamente distribuidos, permitiría rediseñar una Red Solarimétrica que sólo contara con algunas estaciones de precisión. Esta metodología brindaría datos confiables de irradiación solar en áreas extensas de todo el país, con un coste sensiblemente inferior al que demandaría el mantenimiento de una red convencional.

La explotación de una red integrada por instrumental de medición de la radiación solar de calidad controlada permite establecer relaciones locales entre los valores de la irradiación global y los de las horas de insolación, correlaciones que hacen posible rehabilitar series históricas de promedios mensuales de heliofanía. Teniendo en cuenta los promedios de irradiación solar global (tanto medidos como estimados), los valores de calidad comparable de países vecinos y los estudios satelitales, es posible pensar entonces en el trazado de cartas nacionales o regionales con la distribución espacial de esta fuente alternativa de energía y en el estudio de las características de la variabilidad de la misma. Un conocimiento adecuado de los promedios permitiría también

acceder a técnicas de construcción de series temporales sintéticas con las mismas características de las reales, las que podrían facilitar los ensayos simulados de funcionamiento de los sistemas de aprovechamiento.

#### 5. REFERENCIAS

1. Crivelli, E., y Pedregal, M. A., *Meteorológica*, **III**, 1,2 y 3, 1972, 80-97.
2. Grossi Gallegos, H., *Energías Renovables y Medio Ambiente*, **4**, 1998, 119-123.
3. Grossi Gallegos, H., *Energías Renovables y Medio Ambiente*, **5**, 1998, 33-42.
4. Grossi Gallegos, H., *Energías Renovables y Medio Ambiente*, **6**, 1999, 1-6.
5. Righini, R., y Grossi Gallegos, H., *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, **4**, 2, 2000, 11.25-11.29.
6. Gueymard C., Jindra P. and Estrada-Cajigal, V., *Solar Energy*, **54**, 5, 1995, 357-363.
7. Righini, R., y Grossi Gallegos, H., *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, **6**, 2, 2002, 11.37-11.41, versión CD-ROM.
8. Organización Meteorológica Mundial, "Atlas Climático de América del Sur", vol. I (J. Hoffmann, Ponente). O.M.M., Ed. UNESCO, Cartographia, Budapest, Hungría, 1975, 28 cartas.
9. Servicio Meteorológico Nacional, "Atlas Climático de la República Argentina", SMN, Buenos Aires, Argentina, 1960, 84 cartas.
10. Ångström, A., *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **50**, 1924, 121-125.
11. Prescott, J.A., *Trans. R. Soc. Sci. Aust.*, **64**, 1940, 114-125.
12. Righini, R., Grossi Gallegos, H., and Raichijk, C., *Renewable Energy*, **30**, 2005, 1241-1255.
13. Suehrcke, H., *Solar Energy*, **68**, 5, 1992, 417-425.
14. Page, J., *Proc. UN Conf. On New Sources of Energy*, Paper No. 35/5/98, 1961, 378-389.
15. Driese A. and Thevenard D., *Solar Energy*, **72**, 2, 2002, 167-175.
16. Torres Deluigi, M., y Fasulo, A., *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, **6**, 2, 2002, 11.19 – 11.24.
17. Grossi Gallegos, H., Roberti, A., Renzini, G., y Sierra, V., *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, **7**, 2, 2003, 11.01-11.05, versión CD-ROM.

18. Raichijk, C., Grossi Gallegos, H., y Righini, R. comunicación privada, 2005.
19. Tiba, C., Fraidenraich, N., and Aguiar, R., comunicación privada, 2004.
20. Tarpley, J., *J.Appl.Meteor.*, **10**, 1979, 1172-1181.
21. Justus, C. G., and Tarpley J. D., Technical Report. Georgia Institute of Technology, 1984, p. 270.
22. Frulla, L., Gagliardini, D., Grossi Gallegos, H., Lopardo, R., and Tarpley, J., *Solar Energy* **41**, 1, 1989, 61-67.
23. Righini, R., *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, **8**, 2, 2004, 11.01-11.06, versión CD-ROM.
24. Hargreaves, G., Hargreaves, G. H., and Riley, J. P., *J. Irrig. Drain. Eng. ASCE* **111**, 1985, 265-275.
25. SENAMHI-MEM, "Atlas de Energía Solar del Perú. Proyecto PER/98/G31: Electrificación Rural en base de Energía Solar Fotovoltaica en el Perú", Lima, junio de 2003.
26. Bristow, K. and Campbell, G. *Agric. For. Meteorol.*, **31**, 1984, 159-166.