

## PROPUESTA PARA LA ELABORACIÓN DE UN ATLAS DE ENERGÍA SOLAR DE AMÉRICA DEL SUR

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

Grupo de Estudios de la Radiación Solar (GERSolar), Departamento de Ciencias Básicas,  
Universidad Nacional de Luján, Rutas 5 y 7, Luján, 6700 (Buenos Aires) Argentina  
gersolar@yahoo.com.ar

### RESUMEN

La escasez de mediciones directas confiables de la irradiación solar que cumplieran condiciones estadísticas como para ser consideradas representativas en el tiempo y en el espacio dio origen a la aparición de fórmulas de estimación que la correlacionaban con otras variables meteorológicas más fácilmente disponibles; los valores utilizados fueron horas de brillo solar y amplitud térmicas. En este trabajo se consideró un número limitado de estaciones de Argentina en las que se midieron simultáneamente estas variables permitiendo evaluar relaciones establecidas entre ellas. Se trazaron para todo el país cartas con la distribución de los valores medios mensuales de la irradiación solar global, evaluando y comparando los errores de estimación. Se concluye que son la única alternativa a corto plazo para disponer de cartas integradas de América del Sur.

**PALABRAS CLAVE:** Energía Solar, América del Sur, Evaluación, Alternativas.

### ABSTRACT

Given the shortage of solar irradiation measured data accurate enough to fulfill statistical conditions to be considered representative in time and space, there appeared alternatives for estimating them on the basis of the existing meteorological information; the values used were the number of hours of bright sunshine and thermal amplitude. In this paper a limited number of stations in Argentina where pairs of variables were measured simultaneously are considered, thus making it possible to test some relationships and use with these models geostatistical interpolation methods. Charts with the distribution of solar global irradiation monthly mean values for the whole territory were thus found. Errors of estimates were evaluated and compared. This methodology developed is considered as the only valuable alternative for South America in the short time.

**KEYWORDS:** Solar Energy, South America, Assessment, Alternatives.

## INTRODUCCIÓN

En oportunidad de realizarse el I Congreso Iberoamericano de Energía Solar, Grossi Gallegos *et al.* (1987a) presentaron un trabajo en el que se mostraban los primeros resultados obtenidos al procesar los escasos datos disponibles de irradiación solar global diaria en la región meridional de América del Sur, tanto medidos como estimados, incluyendo dos mapas correspondientes a los meses de enero y julio. Tras evaluar los resultados, se consideró importante recomendar la instalación de nuevas estaciones piranométricas para mejorar la calidad de los datos y la cobertura espacial.

Poco después, Grossi Gallegos *et al.* (1987b) elaboraron un conjunto de 12 cartas mensuales con la distribución espacial del valor medio mensual de la radiación solar global diaria sobre un plano horizontal en la región ubicada entre los paralelos 10° y 60° de latitud Sur. Utilizaron para ello los datos disponibles de 63 piranómetros distribuidos en la subregión, complementándolos con estimaciones obtenidas en base a datos de horas de brillo solar de 117 heliógrafos, con la información indicativa de 28 piranógrafos chilenos y con las estimaciones satelitales del GOES previamente validadas.

En casi todos los países de Centro y Sudamérica se han hecho estudios acerca de la distribución de este recurso energético renovable a partir de mediciones o estimaciones, pero un intento de integrar los mismos en América del Sur mostró las dificultades que ello implicaba y las carencias existentes (Grossi Gallegos, 1998a). El resultado final puede considerarse como un producto superior a la carta de Grossi Gallegos *et al.* (1986), ya que cubre todo el subcontinente e incluye todas las mediciones piranométricas disponibles, pero puso en evidencia a su vez un largo camino por recorrer de manera conjunta. El espaciamiento entre isolinéas fue el propuesto por la OMM (2.5 MJ/m<sup>2</sup>- día) y resultó apropiado si se tienen en cuenta los distintos valores de incerteza del instrumental y las metodologías de interpolación y estimación utilizadas (sería equivalente a considerar una incerteza del 12.5 % en el valor máximo registrado en la región). Las unidades elegidas fueron las solicitadas por la Organización Meteorológica Mundial para la preparación de las cartas de radiación solar de la Asociación Regional III (América del Sur).

Teniendo en cuenta esta realidad y, por otro lado, la necesidad de mejorar la calidad de las mediciones de la irradiación solar con el fin de reducir la incerteza en el conocimiento del recurso para hacer más competitivo su aprovechamiento, en la XXIX Reunión del Consejo Técnico Directivo del Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED) celebrada en Madrid el día 1 de junio de 1998 fue aprobada la creación de la Red Iberoamericana de Solarimetría (RISOL) a propuesta del Coordinador Internacional del *Subprograma VI. Nuevas Fuentes y Conservación de la Energía*.

Los objetivos planteados originalmente para esta Red Temática fueron (a) procurar el rescate de la información solarimétrica existente en los países iberoamericanos, procediendo a clasificarla y calificarla de acuerdo con su procedencia; (b) promover la discusión y la unificación de las metodologías de obtención, tratamiento y almacenamiento de los datos y el intercambio de experiencias; (c) promover la capacitación de recursos humanos en el tema de la evaluación del recurso solar y de la posterior utilización de la información, como así también del mantenimiento del instrumental; (d) promover la elaboración de proyectos tendientes a mejorar la calidad de la información y la cobertura

espacial y temporal de las mediciones y (e) procurar la elaboración de cartas preliminares de la distribución de la radiación global a nivel del suelo.

Esta Red estuvo integrada por institutos de 19 países iberoamericanos (Argentina, Bolivia, Brasil, Colombia, Costa Rica, Cuba, Chile, Ecuador, El Salvador, España, Guatemala, Honduras, México, Nicaragua, Panamá, Paraguay, Perú, Portugal y Venezuela), participando de ella algo más de 100 investigadores. A lo largo de su existencia se realizaron cuatro Cursos Regionales de Solarimetría, en los que fundamentalmente se trató la obtención de información (terrena o satelital) y la cartografía de la misma por métodos geoestadísticos (“kriging”); se elaboró un banco de datos unificado, tanto de irradiación global cuanto de horas de brillo solar (en el cual consta la longitud de los datos, el instrumental utilizado y el control de calidad del mismo) y se adoptó una terminología y simbología apropiada para facilitar la comunicación entre los investigadores provenientes de diferentes áreas laborales.

La mayoría de los sensores utilizados en la región son inadecuados y brindan una cobertura espacial insuficiente, tanto en lo temporal cuanto en lo espacial, careciendo en general de un adecuado mantenimiento; lamentablemente, los años que siguieron fueron dejando de lado esta prioridad y en la mayor parte de los países la situación emperoró. A pesar de ello, algunos de los países integrantes disponen hoy de su Atlas solar, trazado en base a sus escasas mediciones complementadas por valores provenientes de estimaciones (Sánchez y Collante, 1993; Grossi Gallegos, 1998b; Tiba *et al.*, 1999; SENAMHI-MEM, 2003).

## ANÁLISIS DE DIFERENTES ALTERNATIVAS DE ESTIMACIÓN

Al fin de la existencia de la RISOL se pudo ver que, si bien la base de datos provenientes de piranómetros era escasa, no lo era la de horas de brillo solar, ni en cobertura espacial ni en extensión temporal. En vista de ello, este Grupo de Trabajo dió comienzo al ensayo y evaluación en Argentina de metodologías alternativas para la estimación de la distribución espacio-temporal de los promedios mensuales de la irradiación solar global.

### Horas de Brillo Solar. Correlación de Ångström-Prescott

En este primer trabajo realizado (Righini *et al.*, 2004, 2005) se consideró un número restringido de estaciones en las que se midieron simultáneamente las horas de brillo solar y la irradiación global, permitiendo obtener así las constantes de la ecuación de Ångström-Prescott para cada mes. Utilizando el método de kriging se trazaron las curvas de distribución espacial de dichas constantes para todo el país. A partir de ellas, y teniendo en cuenta los datos de horas de brillo solar registrados en 177 estaciones de estaciones de Argentina, Bolivia, Brasil y Paraguay, se obtuvieron por el método de interpolación antes mencionado las cartas con la distribución de las horas relativas de brillo solar y se operó sobre ellas con la ya citada ecuación lineal, estimándose así los valores medios de la irradiación solar global diaria para todo el territorio. Utilizando nuevamente la interpolación geoestadística se trazaron las cartas mensuales con la distribución espacial del recurso.

Estos resultados muestran la razonabilidad del uso de los métodos de interpolación espacial como los empleados para posibilitar, con unas pocas estaciones (sólo 26) 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%: cuando se compararon los valores estimados con aquéllos medidos en estaciones que no fueron utilizadas para el cálculo de las constantes de regresión, se obtuvieron valores del error cuadrático medio (RMSE) que varían entre 6,9 % y 11,6 % con un promedio anual de 9,4% y para el error promedio (MBE), entre -1,2 % y -6,9 % con un promedio anual de -4 %.

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

Como paso siguiente se ensayó esta metodología para datos de enero y julio del Brasil (Raichijk *et al.*, 2007). Se procedió en primera instancia a confeccionar las cartas de distribución espacial de los promedios mensuales de las horas de brillo solar, interpolando por el método de kriging los valores obtenidos en 101 estaciones de ese país en el período 1961-2004 con una extensión mayor de 30 años en el período antes mencionado. A su vez, y con el objeto de poder dar continuidad a las isocías de distribución espacial, se incorporaron al análisis los datos de 18 estaciones de países limítrofes.

El paso siguiente, teniendo en cuenta los trabajos antes mencionados, fue determinar para un conjunto ya más reducido de estaciones con datos simultáneos de irradiación solar global y heliofanía, los coeficientes  $a$  y  $b$  de la correlación lineal de Ångström-Prescott que relaciona ambas variables.

La evaluación de la metodología resultó satisfactoria, con valores para el RMSE del orden del 10 % en enero y del 8 % en julio, mientras que los valores del MBE fueron del orden o menores al 7 % en enero y del 1 % en julio. También resultó satisfactoria la comparación realizada con las cartas trazadas sin utilizar los programas de interpolación geoestadística (Tiba *et al.*, 1999), tanto de irradiación global como de heliofanía, lo cual las valoriza.

#### Horas de Brillo Solar. Correlación de Suehrcke

El modelo desarrollado por Suehrcke (2002) es simple y vuelve a las fuentes al retomar el concepto de día claro para estimar la fracción de irradiación difusa en base al índice de claridad. Este modelo fue ensayado a escala mundial 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) y que no quedaba en claro estadísticamente que su capacidad predictiva superara a la de los viejos métodos. 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 se consideró necesario derivar localmente este tipo de correlaciones (Grossi Gallegos *et al.*, 2003).

Una alternativa interesante es el método seguido por Tiba *et al.* (2005) en Brasil, quienes adaptaron el modelo utilizado en la elaboración del Atlas Europeo de Radiación Solar

(ESRA) para determinar la irradiación de cielo claro y compararon luego, a partir del modelo de Suehrcke antes mencionado, la irradiación solar global estimada con valores de tierra. En este trabajo los autores tomaron los valores del factor de turbidez para aeromasa 2,  $T_L(AM2)$ , para diferentes tipos de atmósfera adoptados en Europa y los modificaron simplemente pasando los de invierno del Hemisferio Norte al verano en el Hemisferio Sur y así correlativamente.

Para 20 estaciones de Argentina se eligieron los valores del factor de turbidez de Linke que, aplicados al modelo de cielo claro antes mencionado y aplicado a la ecuación de Suehrcke, dieran un mejor ajuste con los valores de tierra obtenidos con los piranómetros de referencia (Raichijk y Grossi Gallegos, 2007).

El valor promedio del RMSE de todas las localidades para los meses de enero y julio fue de 4,1 %, con valores mínimos de 2.0 % y máximos de 11,2 %, mientras que para el MBE se obtuvieron valores comprendidos entre -10.0 % y 4,7 %, con un valor promedio de -0,52 % (ambos errores máximos corresponden a la misma localidad). Dejando de lado las 2 estaciones que dieron un RMSE del orden del 10 % y comparando con los valores medidos en tierra se obtuvo un muy buen ajuste lineal con un coeficiente de determinación de 0,99.

### Amplitud Térmica

Se ensayó en este caso la correlación de Hargreaves (1985) establecida entre los valores medios del índice de claridad y la raíz cuadrada de la amplitud térmica. Utilizando datos del Servicio Meteorológico Nacional de una serie de 106 estaciones con una extensión temporal de más de 30 años cada una, se obtuvieron por kriging las grillas de distribución espacial de los promedios mensuales de la amplitud térmica diaria para cada mes del año que, multiplicadas según propone la correlación estudiada, permiten elaborar los mapas de irradiación solar global diaria media mensual para todo el país. A su vez, y con el objeto de evaluar el nivel de ajuste de la metodología empleada, se cotejaron valores estimados con datos de superficie medidos en algunas estaciones reservadas a tal efecto siendo posible determinar así el error cuadrático medio y el error promedio relativos para cada mes del año (Raichijk *et al.*, 2005).

Para el RMSE se observaron valores que varían desde 9 % en enero hasta 14,2 % en marzo con un promedio anual del 11 %, y para el MBE desde -1,2 % en noviembre hasta -7,1 % en febrero con un promedio anual de -3,7 %.

## CONCLUSIONES

En vista de los resultados obtenidos se puede concluir que la alternativa recomendable a corto plazo para disponer de cartas integradas de América del Sur se basa en el uso de los datos de horas de brillo solar, ya sea mediante correlaciones del tipo Ångström-Prescott establecidas localmente o con el modelo de Suehrcke modificado; éste podría ofrecer aún mejores resultados si se determinaran los valores del índice de claridad correspondiente a cielo claro a partir de una base local de datos diarios y se utilizaran luego los algoritmos propuestos en el ESRA para el modelo de cielo claro.

Debe tenerse en cuenta que los métodos que utilizan información satelital ofrecen datos basados en sólo 10 años, por lo que su representatividad climatológica es objetable,

mientras que la incerteza de los resultados publicados va del 13 al 16 %, de acuerdo con lo evaluado por sus responsables (<http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>).

## REFERENCIAS

- Grossi Gallegos H., Lopardo R., Atienza G., García M. y Peralta M. (1986) Distribución de la energía solar en la región meridional de América del Sur. *Memoria Técnica del 5° Congreso Latinoamericano de Energía Solar*, 27-30 de octubre, Valparaíso, Chile, tomo I, pp. 1-11.
- Grossi Gallegos H., Lopardo R., Atienza G., García M. y Peralta, M. (1987a) Distribución espacio-temporal del promedio mensual de la radiación solar global diaria en la región meridional de América del Sur. *Proceedings del III Congreso Ibérico-I Congreso Iberoamericano de Energía Solar*, 22-24 de abril, Madrid, España, Doria J., de Andrés, M.C. y Armenta, C. (Eds), tomo I, pp. 110-117.
- Grossi Gallegos H., Atienza G. y García M. (1987b) Cartas de radiación solar global para la región meridional de América del Sur. *Anales del II Congreso Interamericano de Meteorología*, Buenos Aires, Argentina, pp. 16.3.1-16.3.10.
- Grossi Gallegos, H. (1998a) Distribución espacial del promedio anual de la radiación solar global diaria en América del Sur. *Información Tecnológica* 9 N° 2, 259-264.
- Grossi Gallegos H. (1998b) Distribución de la radiación solar global en la República Argentina. II. Cartas de radiación. *Energías Renovables y Medio Ambiente* 5, 33-42.
- Grossi Gallegos H., Roberti A., Renzini G. y Sierra V. (2003) Algunos comentarios sobre el modelo de Suehrcke y su aplicación en Argentina. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 7 N° 2, 11.01-11.05 versión CD-ROM.
- Hargreaves G.L., Hargreaves G.H. and Riley J.P. (1985) Irrigation water requirement for Senegal River Basin. *J. Irrig. Drain. Eng.*, ASCE 111, 265-275.
- Raichijk C., Grossi Gallegos H. y Righini, R. (2005) Método alternativo para la estimación de valores medios mensuales de irradiación global en Argentina. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 9 N° 2, 11.05-11.08 versión CD-ROM (2005).
- Raichijk C., Aristegui R., Grossi Gallegos H. y Righini R. (2007), Aproximación alternativa a la evaluación del recurso solar en Brasil en base a datos de tierra. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 11, 11.45. -11.52 versión CD-ROM.
- Raichijk C. y Grossi Gallegos H. (2007) Evaluación de una aplicación alternativa de la fórmula de Suehrcke en la República Argentina, *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 11, 11.25 -11.30 versión CD-ROM.
- Righini R., Grossi Gallegos H. and Raichijk C. (2005) Approach to drawing new global solar irradiation contour maps for Argentina. *Renewable Energy* 30 N° 8, 1241-1255.
- Sánchez M. y Collante B. (1993) Atlas de radiación solar de Colombia. MME, INEA e HIMAT, Bogotá, Colombia, p.85.
- SENAMHI-MEM (2003) "Atlas de Energía Solar del Perú. Proyecto PER/98/G31: Electrificación Rural en base de Energía Solar Fotovoltaica en el Perú", Lima, Perú.
- Suehrcke H. (2000) On the relationship between duration of sunshine and solar radiation on the earth's surface: Ångström's equation revisited. *Solar Energy* 68 N°5, 417-425.
- Tiba C., Grossi Gallegos H., Fraidenraich N. and Lyra F. J. M. (1999) On the development of spatial/temporal solar radiation maps: a Brazilian case study. *Renewable Energy* 18, 393-408.
- Tiba C., Aguiar R., Fraidenraich N. (2005) Analysis of a new relationship between monthly global irradiation and sunshine hours from a database of Brazil. *Renewable Energy* 30, 957-966.