

## APROXIMACIÓN A UN TRAZADO DE NUEVAS CARTAS DE IRRADIACIÓN SOLAR PARA ARGENTINA

R. Righini, H. Grossi Gallegos<sup>(1)</sup>

GERSolar, División Física, Departamento Ciencias Básicas, Universidad Nacional de Luján, Rutas 5 y 7, (6700) Luján,  
Buenos Aires, Argentina – Tel. (54-02323) 423171 - Fax (54-02323) 425795 – e-mail: righini@mail.unlu.edu.ar

**RESUMEN:** Teniendo en cuenta a nivel mundial los pobres avances logrados en el desarrollo de metodologías que estimen la irradiación solar en superficie, permitiendo mejorar las cartas existentes, y por otro lado, la abundancia de datos de heliofanía, se volvió a fijar la atención en ellos a fin de utilizarlos como base para estimar, con mayor resolución espacial, la irradiación solar a través de nuevos modelos, como el de Suehrcke, o de antiguas correlaciones como la de Ångström-PreScott, con coeficientes más precisos y regionalizados. En este trabajo se utilizan los resultados ya hallados acerca de la distribución espacio-temporal de este parámetro en Argentina, a las que se aplica constantes apropiadas para mejorar las cartas de irradiación solar existentes.

**Palabras Clave:** irradiación, distribución espacial, estimación, heliofanía, Argentina.

### INTRODUCCIÓN

Una de las formas más directas de ver los resultados de una evaluación del recurso solar a gran escala es el uso de mapas. Por años, ésta ha sido la elección de los investigadores de la radiación solar para mostrar los resultados del análisis de conjuntos de datos superficiales, medidos directamente o derivados a partir de otra información meteorológica, opción también válida para otro tipo de usuarios como los ingenieros agrónomos a quienes puede interesarles esta distribución u otras vinculadas, como por ejemplo la de la Radiación Fotosintéticamente Activa (PAR).

Las primeras versiones de estos mapas fueron generalmente isolíneas de parámetros del recurso solar dibujadas a mano sobre mapas ya impresos, pero la interpolación entre estaciones de datos resultaba muy subjetiva al utilizar esta aproximación. Uno de los primeros esfuerzos mejor conocidos en todo el mundo, todavía usado hoy en día, es el conocido como "Report 22" (Löft *et al.*, 1966). Los mapas producidos fueron ampliamente distribuidos a través de libros de ingeniería solar bien conocidos (como por ejemplo, Duffie and Beckman, 1974). Este trabajo fue esencialmente elaborado a partir de datos de radiación provenientes de 668 estaciones y de heliofanía de 233 localidades adicionales, utilizando la relación de Ångström con coeficientes apropiados de acuerdo con una cierta clasificación climática mundial.

Utilizando modernas herramientas de computación el usuario puede hoy desarrollar mapas nacionales (o regionales) e incorporar otros datos geo-espaciales, tales como la localización de líneas de transmisión, autopistas, centros de población, relieve o uso del suelo.

En Argentina, a partir de 1972, se presentaron a través del tiempo varios mapas dando cuenta de la distribución de la irradiación solar global recibida sobre un plano horizontal ubicado a nivel de tierra utilizando diferentes bases de tiempo y calidad de información, ya sean mediciones directas de la irradiación o estimaciones obtenidas a partir de correlaciones establecidas con otras variables meteorológicas (para un listado de ellas ver, por ejemplo, Grossi Gallegos, 1988).

En el último trabajo citado 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 la Red Solarimétrica o de heliofanía tomados por la Red del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), evaluándose el error cometido como inferior al 10% debido la inclusión de estimaciones e interpolaciones.

Como la Red Solarimétrica continuó perdiendo estaciones en funcionamiento por escasez de recursos para mantenerlas, se comenzaron a analizar diversas alternativas para procurar mejorar las citadas cartas. Así se estudió estadísticamente el ajuste de los datos satelitales disponibles en internet en la base conocida como Surface Solar Energy (SSE) Data Set Version 1.0 con los valores de tierra para evaluar la posibilidad de su utilización como complemento de los datos ya usados (Grossi Gallegos, 1999) y el uso de la misma a fin de trazar cartas en zonas homogéneas como la Pampa Húmeda, empleando métodos geoestadísticos (Righini y Grossi Gallegos, 2000).

Teniendo en cuenta a nivel mundial los pobres avances logrados en el tema y la abundancia de datos de heliofanía, se volvió a fijar la atención en ellos a fin de utilizarlos como base para estimar, con mayor resolución espacial, la irradiación solar a

---

<sup>1</sup> Miembro de la Carrera de Investigador del CONICET

nuevos modelos (Suehrcke, 2000) o de antiguas correlaciones como la de Ångström-Prescott, con coeficientes más precisos y regionalizados. Porque, a pesar de todas las críticas que se le pueden hacer (Gueymard *et al.*, 1995), y aún sabiendo que en un futuro no muy lejano esta metodología será obsoleta frente a los satélites meteorológicos que proveerán una mejor alternativa de obtener información solar (si bien todavía queda mucho por hacer hasta que se convierta en una rutina segura), este tipo de correlaciones puede recomendarse para muchas aplicaciones prácticas en países de la región.

La misma decisión se tomó en las reuniones de Coordinación de la ex-Red Iberoamericana de Solarimetría (RISOL), la cual pudo colectar en su banco datos de heliofanía de prácticamente todos los países de América del Sur (Grossi Gallegos, 2001). Este enfoque permitirá obtener cartas integradas a nivel continental y de allí poder trazar las de distribución de la irradiación solar global en la región.

## ANTECEDENTES

Con la intención de tratar de mejorar bajo este enfoque la resolución espacial de las cartas de irradiación global ya mencionadas se encaró el año anterior el análisis de la distribución de la heliofanía, tanto efectiva cuanto relativa, utilizando técnicas geoestadísticas para interpolar sus valores medios mensuales (Grossi Gallegos y Righini, 2002).

Para asegurar la representatividad de los promedios para la mayoría de las estaciones, dentro de la incerteza de la medición, se utilizaron series con más de 10 años de datos (Roberti *et al.*, 2002); en este mismo trabajo se descartó la existencia de tendencias temporales con un nivel de significación del 5%.

Esto llevó a que se emplearan 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 del país, las que fueron seleccionadas para dar continuidad a las isolíneas de heliofanía 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 podía generar una distorsión en los mapas que los alejara significativamente de la realidad.

Para intentar salvar este inconveniente se estudió la dependencia de la heliofanía efectiva con la altura durante los meses de enero y julio en la zona; se encontró así que la misma es aproximadamente lineal, obteniéndose las pendientes y las ordenadas al origen de la recta de correlación para los meses analizados, mientras que el promedio anual indica un incremento de más de una hora cada mil metros. Con dichos valores se estimaron promedios de heliofanía efectiva 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 salares de altura), valores que posteriormente fueron incorporados al análisis realizado empleando la metodología geoestadística ya mencionada.

El proceso de kriging se realizó sobre los datos de heliofanía relativa con el objeto de remover las tendencias asociadas con la variación de la duración del día con la latitud y el mes, las que fueron luego adicionadas para obtener como resultado final los mapas de heliofanía efectiva (Grossi Gallegos y Righini, 2002).

Disponiendo entonces de mapas trazados por métodos geoestadísticos utilizando una razonable base de datos de heliofanía, el paso que sigue es intentar obtener a partir de ellos cartas mensuales con la distribución espacial del promedio de la irradiación solar global diaria.

## MATERIALES Y MÉTODO

Dejando de lado por el momento la aplicación del modelo de Suehrcke ya mencionado, se puede encarar la utilización de la ecuación de Ångström-Prescott desde diferentes procedimientos.

Una de las formas de aplicación consiste en determinar la variación espacial de las constantes (Tiba, 2001) o con la latitud y la altura (Sahin and Sen, 1998) a partir de los valores determinados en cada lugar, utilizando para ello métodos geoestadísticos, y utilizar la ecuación lineal.

Otra de las formas se basa en utilizar las constantes de la correlación (a y b) determinadas para cada localidad en la que se cuenta con datos simultáneos de irradiación global y horas de insolación y analizar su validez regional relacionada con las características fitogeográficas y climáticas (como lo hicieron Löft *et al.* en el trabajo antes citado), teniendo en cuenta su variabilidad espacial (Grossi Gallegos y Atienza, 1992).

Una tercera alternativa sería establecer, mediante el análisis factorial en componentes principales (ACP), un posible agrupamiento zonal que tenga en cuenta la heliofanía como una de las variables.

En el presente trabajo se encara el primer enfoque, buscando determinar la distribución espacial de las constantes a y b a fin de aplicárselas a las isolíneas ya determinadas. Los valores mensuales de las constantes utilizadas para cada ubicación aparecen como subproducto de un programa desarrollado para consistir los datos de irradiación global diaria obtenidos por la Red Solarimétrica (Roberti *et al.*, 2000).

La ecuación de Ångström-Prescott tiene reconocida validez cuando se aplica a promedios mensuales, verificándose que puede estimar el índice de claridad medio con un error no superior al 10%. Si bien los valores de las constantes de ajuste dependen del período de integración considerado (diario, decadal, mensual, anual), como ya se dijera en un trabajo de Grossi Gallegos *et al.* (1988), su variación no es tan marcada como la intermensual (si bien en algunos casos, con baja estadística, las diferencias pueden alcanzar hasta un 50%), como ya fuera mostrado anteriormente en el mismo trabajo y también por Grossi Gallegos y Atienza (1991).

Se utilizaron entonces los valores de  $a$  y  $b$  determinados (con errores del orden de algunas centésimas) para 26 estaciones en las que se dispone de datos diarios de heliofanía y de irradiación solar global que ya fueron consistidos por el procedimiento citado. Esos datos fueron empleados para trazar cartas geográficas de isolinéas de los coeficientes  $a$  y  $b$  para los meses de Enero y Julio en todo el país, empleando el método de kriging. La distribución geográfica de las isolinéas fue utilizada para estimar los valores de dichos coeficientes en cada una de las 177 estaciones de Argentina, Bolivia, Chile, Brasil y Paraguay en las que se tienen datos de heliofanía. Se tomaron estaciones de países limítrofes con el objetivo de darles continuidad a las isolinéas más allá de los límites políticos.

Una vez determinados los coeficientes  $a$  y  $b$  para cada una de las estaciones, se empleó la ecuación de Ångström-Prescott para calcular la irradiación global media mensual en plano horizontal a nivel del suelo para los dos meses estudiados. Los resultados así obtenidos se representaron en el mapa de la República Argentina, empleando nuevamente kriging para trazar las isolinéas de irradiación. Se muestran isolinéas separadas cada  $2 \text{ MJ/m}^2$ , dado que ese es el límite impuesto por considerar un 10 % de error en la estimación de la irradiación media mensual mediante el método empleado.

## RESULTADOS

Las figuras que siguen (1 y 2 en esta página, 3 y 4 en la siguiente) muestran los valores de la pendiente y ordenada al origen utilizados en la ecuación de Ångström-Prescott para los meses de Enero y Julio en Argentina; y las figuras 5 y 6, los valores de la irradiación media mensual en plano horizontal a nivel del suelo, calculados empleando esa ecuación y utilizando kriging para el trazado de isolinéas.

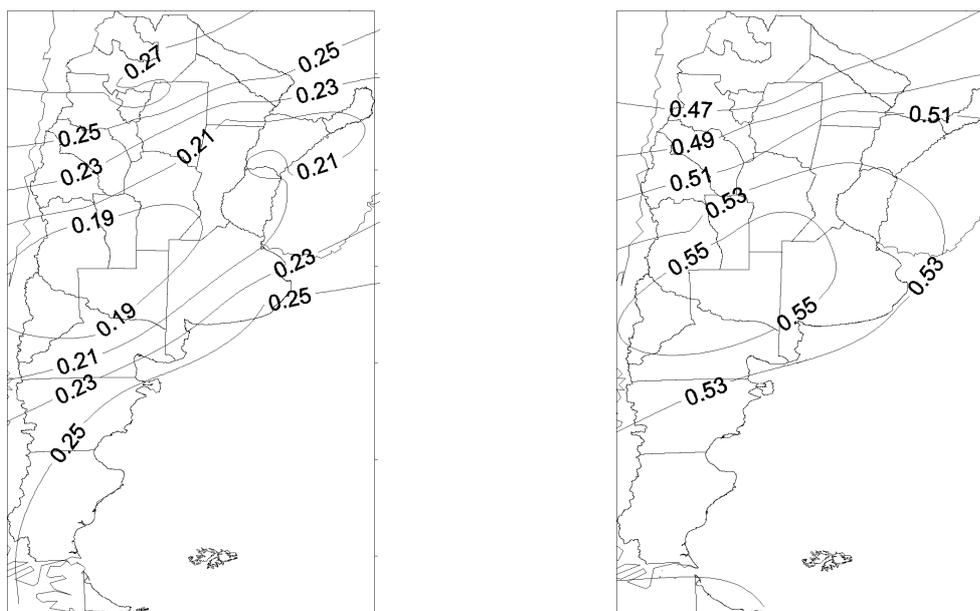
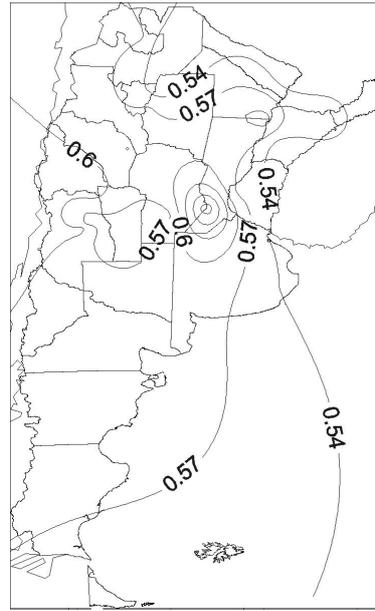
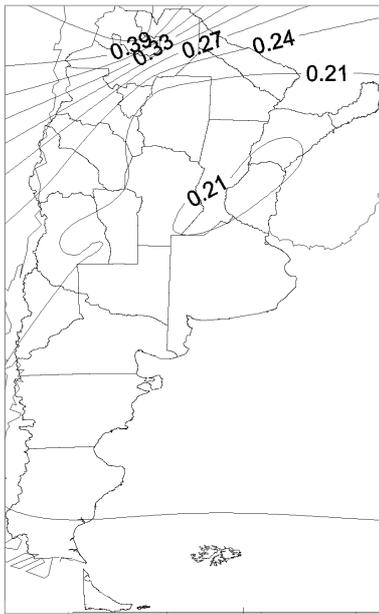


Figura 1 y 2. Ordenada al origen (izquierda) y pendiente (derecha) para todo el país obtenidas aplicando kriging para el mes de Enero.

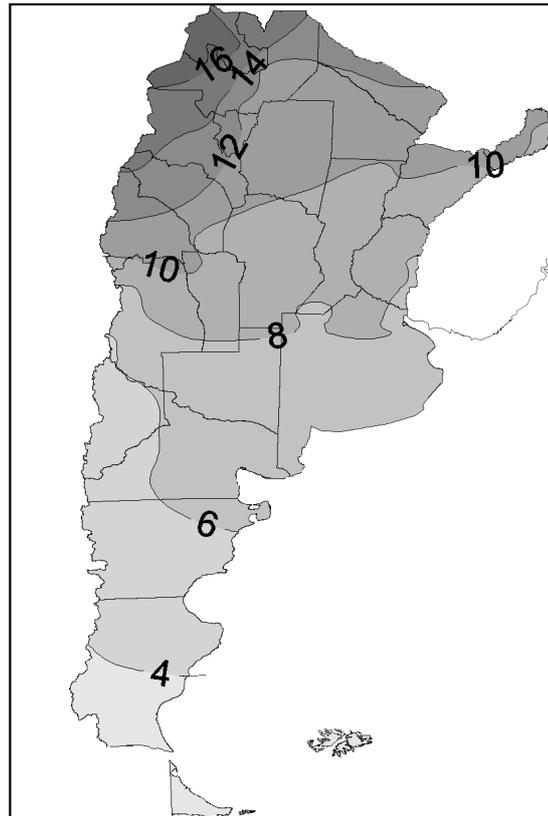
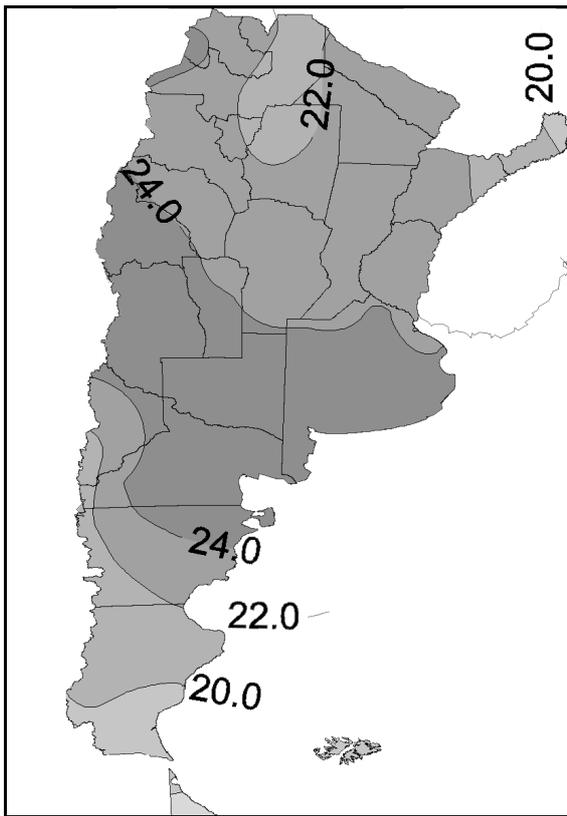
## CONCLUSIONES

Los mapas obtenidos muestran una buena concordancia con mapas anteriormente establecidos para nuestro país (Grossi Gallegos, 1998). En particular puede observarse en el mapa de Enero los niveles de baja radiación asociados con la cuña boscosa perteneciente a la selva Tucumano -Oranense. En ambos meses puede notarse el efecto que ejerce sobre las isolinéas de irradiación en la zona patagónica la barrera orográfica constituida por la cordillera de los Andes.

Es de destacar la importancia de obtener un mapa de irradiación como el conseguido, empleando solamente 26 estaciones para determinar los coeficientes  $a$  y  $b$  para todo el país. Los resultados muestran la razonabilidad de los métodos interpolación espacial como los empleados para determinar  $a$  y  $b$  en zonas extensas. Unas pocas estaciones donde se hubiesen determinado los coeficientes de Ångström-Prescott que presenten una adecuada distribución espacial, permitirían



Figuras 3 y 4. Ordenada al origen (izquierda) y pendiente (derecha) para todo el país obtenidas aplicando kriging para el mes de Julio.



Figuras 5 y 6. Valores de energía media mensual en  $\text{MJ/m}^2$  calculados empleando la ecuación de Ångström-Prescott para los meses de Enero (izquierda) y Julio (derecha).

determinar dichos coeficientes en una zona muy extensa y, sobre la base de ellos, calcular datos de irradiación media mensual en plano horizontal a nivel del suelo, y obtener una idea primaria de la distribución del recurso solar con un error del orden del 10 %.

## REFERENCIAS

- Duffie, J. A. and Beckman, W. A. (1974) *Solar Energy Thermal Processes*, pp. 34-37. John Wiley and Sons, New York.
- Grossi Gallegos, H. Atienza, G. Peralta, M. y García, M. (1988) Sobre la necesidad del estudio de la variación de los coeficientes de la ecuación de regresión entre las horas de insolación y la radiación global. En *Actas de la 12a. Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energía Solar*, Salta, Salta, vol. 1, pp. 107-112.
- Grossi Gallegos, H. y Atienza, G. (1991) Determinación de los coeficientes de ajuste de la ecuación de regresión entre las horas de insolación y la radiación global para diferentes zonas de Argentina y distintas épocas del año. En *Actas de la V Reunión Nacional de Agrometeorología*, Vaquerías, Córdoba, pp. 57-62.
- Grossi Gallegos, H. y Atienza, G. (1992) Análisis del comportamiento espacial de los datos de radiación solar en la Pampa Húmeda. En *Memoria del IV Congreso Interamericano y I Iberoamericano de Meteorología*, Cáceres y Salamanca, España, pp. 216-220.
- Grossi Gallegos, H. (1998) 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. (1999) Comparación de los valores satelitales del "Surface Solar Energy (SSE) Data Set Version 1.0" con datos de tierra de la Red Solarimétrica. *Energías Renovables y Medio Ambiente* 6, 1-6.
- Grossi Gallegos, H. (2001) La Red Iberoamericana de Energía en su tercer año de vida. En *Anales de la Conferencia Iberoamericana de Energías Renovables y Tercer Congreso Latinoamericano y del Caribe de Cocinas Solares*, versión CD-ROM, La Ceiba, Honduras.
- Grossi Gallegos, H. y Righini, R. (2002) Acerca de la distribución de la heliofanía en Argentina. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 6, 2, 11.37-11.41 versión CD-ROM.
- Gueymard, C. Jindra, P. and Estrada-Cajigal, V. (1995) A critical look at recent interpretations of the Ångström approach and its future in global solar radiation prediction. *Solar Energy* 54, 5, 357-363.
- Löft, G.O.G. , Duffie, J.A. and Smith, C.O. (1966) World Distribution of Solar Energy. *Solar Energy* 10, 27- 37 (1966).
- Righini, R. y Grossi Gallegos, H. (2000) Trazado de las cartas solarimétricas de la Pampa Húmeda empleando métodos geoestadísticos. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 4, 2, 11.25-11.29.
- Righini, R. y Grossi Gallegos, H. (2001)
- Roberti, A. Renzini, G. y Grossi Gallegos, H. (2000) Desarrollo de un software capaz de correlacionar y consistir datos de irradiación solar y heliofanía. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 4, 2, 11.37-11.38.
- Roberti, A. Renzini, G. Sierra, V. y Grossi Gallegos, H. (2002) Primeros resultados del análisis estadístico de los datos de heliofanía en la Argentina. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 6, 2, 11.31-11.35 versión CD-ROM.
- Sahin, A. D. and Sen, Z. (1998) Statistical analysis of the Ångström formula coefficients and application for Turkey. *Solar Energy* 62, 1, pp. 29-38.
- 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, 5, 417-425.
- Tiba, C. (2001) Solar radiation in the Brazilian Northeast. *Renewable Energy* 22, 565-578.

## APPROACH TO NEW SOLAR IRRADIATION CHARTS FOR ARGENTINA

R. Righini and H. Grossi Gallegos

**ABSTRACT** – The insufficient solar irradiation data with statistical conditions for temporal and space representativeness is the motivation for using meteorological information to estimates them through the old Ångström-Preseott equation or the new Suehrcke model.. In this work first results of bright sunshine hours spatial distribution in Argentina are used to trace solar irradiation charts applying appropriate constants obtained from contours maps calculated using geostatistical methods.

**KEYWORDS:** irradiation, spatial distribution, estimates, sunshine hours, Argentina.