



UTILIZACIÓN PRELIMINAR DE INFORMACIÓN GOES Y MÉTODOS GEOESTADÍSTICOS PARA LA EVALUACIÓN DEL RECURSO SOLAR EN BRASIL

R. Righini y H. Grossi Gallegos (*)

División Física, Departamento de Ciencias Básicas, Universidad Nacional de Luján
Rutas 5 y 7, (6700) Luján, Buenos Aires ARGENTINA - E-mail: righini@mail.unlu.edu.ar

RESUMEN: Teniendo en cuenta la disponibilidad en INTERNET de valores de promedios mensuales correspondientes a una estimación de baja resolución espacial elaborada mediante la aplicación del algoritmo de Pinker a datos satelitales de 4 años, se analiza su ajuste con información de tierra y se muestran resultados de la aplicación de métodos cartográficos geoestadísticos al tratamiento de los mismos para el territorio costero de Brasil. Los mapas obtenidos son comparados con los que actualmente se hallan en INTERNET.

Palabras clave: radiación solar, Brasil, kriging, isolíneas

INTRODUCCION

La importancia de contar con información debidamente validada de la radiación solar global recibida a nivel de superficie no puede ser subestimada. El dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos de abastecimiento eléctrico, así como el diseño de colectores solares para calentamiento de agua necesitan de dicha información. Por otro lado el dato de la energía solar es cada vez más utilizado para estimar rendimientos de cosechas, proyectar sistemas de riego y predecir abundancia de agua en suelo.

Las grandes superficies de los países Sudamericanos en general, y del Brasil en particular, hacen particularmente difícil la operación de una red solarimétrica de la suficiente extensión y densidad que permita contar con datos confiables en zonas tan amplias. Es, por lo tanto, de gran interés el uso de métodos alternativos para la evaluación del recurso solar.

Existen muchos modelos que utilizan la información recogida por los instrumentos embarcados en satélites con este objetivo. Uno de ellos fue desarrollado en la Universidad de Maryland por R. T. Pinker y L. Laszlo; se trata de un modelo físico de estimación de la radiación solar global a nivel del suelo basado en cálculos de transferencia radiativa usando la aproximación delta Eddington (Pinker, y Lazlo, 1992).

El método plantea los flujos ascendentes y descendentes de radiación solar a tope de atmósfera y a nivel del suelo, determinándolos a través de las mediciones realizadas por los instrumentos de imagen embarcados en el satélite operacional, los cuales miden la radiancia en bandas espectrales estrechas. Para computar los flujos mencionados deben determinarse los albedos espectrales en superficie y las funciones ópticas. El algoritmo calcula estos flujos a través del modelo radiativo, y necesita como entrada el valor de las radiancias medidas por el satélite a tope de atmósfera. El modelo contiene valores espectrales de las funciones ópticas precalculadas para valores discretos del ángulo cenital solar y cantidades de vapor de agua, ozono, aerosol y espesor óptico de nubes. Los valores de estas variables son por lo tanto estimados comparando los valores de radiancia medidos con los precalculados por el modelo. La aproximación delta-Eddington fue elegida por sobre métodos más sofisticados debido a que provee un cálculo relativamente preciso y rápido de los flujos sobre el ancho rango de los parámetros ópticos.

El satélite geoestacionario GOES es particularmente apropiado para brindar la información usada por el método de Pinker. Lo es, tanto por su cobertura espacial, ya que brinda imágenes de prácticamente todo el continente americano, como por la cantidad de imágenes diarias que entrega. Además su resolución espacial (1,1 km. en el nadir) lo hace adecuado para evaluar el recurso solar en el nivel de mesoescala.

Para cuantificar el nivel de radiación solar es habitual el empleo de cartas solarimétricas, que siempre han sido una herramienta de indudable importancia para la evaluación del recurso solar en una determinada zona. Las mismas permiten visualizar gráficamente la variabilidad espacial y temporal de la irradiación solar, lo que constituye una información imprescindible para las tecnologías que se valen de la radiación del sol como recurso energético.

El trazado de estas cartas siempre es una tarea ardua, que requiere una base de datos depurada y un conocimiento empírico de la meteorología de la zona para obtener un producto confiable. En particular, es de destacar que la presencia de grandes masas boscosas, de montañas y de microclimas hacen dificultoso el trazado de mapas de irradiación solar global basándose

(*) Miembro de la Carrera del Investigador del CONICET

únicamente en los datos proporcionados por estaciones terrenas de medición de la radiación solar (Grossi Gallegos, 1998 a y b). No obstante, en zonas planas, cuya característica general sea la regularidad del terreno, es posible trazar cartas de irradiación solar global empleando métodos geoestadísticos de interpolación entre estaciones para el trazado de las isolinéas.

Dentro de los métodos geoestadísticos, el krigaje (también conocido como “kriging”) es un método de interpolación lineal óptimo (Krigge, 1951) ya que minimiza los errores cometidos en la estimación del campo de radiación, incorporando información de la estructura de ese campo por medio de una función denominada variograma (Aguiar, 1999): si H_i es el valor registrado en una localidad y H_j el registrado en otra separada por una distancia h , esta función se construye de la siguiente manera:

$$\text{var}(H_i - H_j) = 2\gamma(h) = \sum (H_i - H_j)^2 / N(h)$$

donde la sumatoria está calculada sobre todos los $N(h)$ pares de puntos distanciados en h (el variograma difiere de la covarianza en una constante y el error de estimación se expresa en función de la covarianza). El estimador H_0^* se puede expresar como una combinación de los valores registrados, esto es:

$$H_0^* = \sum H_i \lambda_i \quad \text{con } \sum \lambda_i = 1$$

en la que los pesos de cada uno no sean los mismos sino que se los determine de manera tal que minimicen el error de estimación. La objetividad de dicho método en el trazado de isolinéas le ofrece un campo de aplicación amplio en llanuras extensas, donde la baja densidad de las redes de medición (o su inexistencia en algunos casos) obliga a emplear métodos de interpolación para la obtención de las cartas de irradiación solar.

De igual forma, el método se revela particularmente apto para tratar con datos obtenidos mediante los modelos existentes de evaluación de la irradiación solar global empleando datos satelitales ya que permite el trazado de isolinéas que representen el campo de radiación solar con un mínimo de error y de manera no arbitraria.

ANTECEDENTES

El trazado de cartas solarimétricas en el territorio de Brasil tiene larga historia. Son varias las cartas existentes para dicho país, entre las que se puede citar las elaboradas por Vila Nova y Salatti (1977), Nunes *et al* (1978), Pereira *et al* (1996) y Tiba *et al* (1998). Si bien la información utilizada en ellas para su trazado ha sido analizada y depurada, la preferente distribución costera de las estaciones hace difícil determinar las isolinéas en el resto del territorio.

Esta dificultad ha tratado de ser superada apelando a modelos físicos y estadísticos para el cálculo de la radiación solar global en superficie. Al respecto puede mencionarse un trabajo de Justus *et al* (1986), empleando un modelo estadístico, continuado luego por Frulla *et al*. (1990) en el sur del país. Más recientemente varios grupos han aplicado modelos físicos al tratamiento de la información satelital; en particular pueden citarse el modelo GL1 (Ceballos *et al.*, 1998) y el BRAZILSR (Pereira *et al*, 1996), los que se encuentran en estado operativo y brindan un cálculo diario de la radiación solar global empleando datos provenientes del satélite GOES.

En general, pocos resultados obtenidos por medio del tratamiento de información satelital para el cálculo de la radiación solar global emplean herramientas geoestadísticas para el trazado de las isolinéas. Esta herramienta provee de un criterio no arbitrario para la determinación de las mismas y ya ha sido utilizada para algunas zonas de América del Sur (Righini y Grossi Gallegos, 2000 y 2001).

MATERIAL Y MÉTODOS

Teniendo en cuenta la disponibilidad de valores de los promedios mensuales de irradiación global que se tenía en INTERNET, correspondientes a una estimación de baja resolución espacial elaborada mediante la aplicación del algoritmo de Pinker a información de 46 meses obtenida por el satélite geostacionario GOES (Grossi Gallegos, 1999), se decidió evaluar con ellos la distribución del recurso solar, a pesar de la limitada extensión temporal de los mismos. Se aplicó este algoritmo a una zona del Brasil, con datos que abarcan el período 1985-1988, considerando 94 celdas (figura 1 de la página siguiente), a fin de elaborar un mapa en el que se trazaron las isolinéas utilizando el método de “kriging” para minimizar los errores. El mapa existente en la actualidad en INTERNET (<http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>) presenta la irradiación solar global media diaria mensual, la cual es calculada aplicando el algoritmo de Pinker a celdas de 250 km de lado, considerando un período de 10 años que va desde 1983 a 1993.

Se calcularon entonces para el período 1985-1988 los variogramas tomando los valores medios correspondientes a los meses de enero y julio para todas las celdas consideradas. Se empleó una distancia máxima entre estaciones de 2235 km y se consideraron 31 clases, utilizando un estimador lineal para el cálculo del variograma, mientras que el error instrumental supuesto fue del 10%. Los mapas se realizaron considerando 10 nodos en la grilla bidimensional en la cual se trazan las isolinéas (las unidades utilizadas fueron MJ/m²). Las figuras 2 y 3 de la página siguiente presentan los variogramas y las rectas de ajuste consideradas para el estimador lineal de los mismos.

Otros mapas de isolinéas fueron realizados para los meses de enero y julio con los datos existentes de 21 estaciones piranométricas del Brasil, para poder comparar los resultados con los anteriormente obtenidos. Esta información proviene de la red piranométrica del Instituto Nacional de Meteorología (INMET), equipada con piranómetros termoeléctricos Eppley

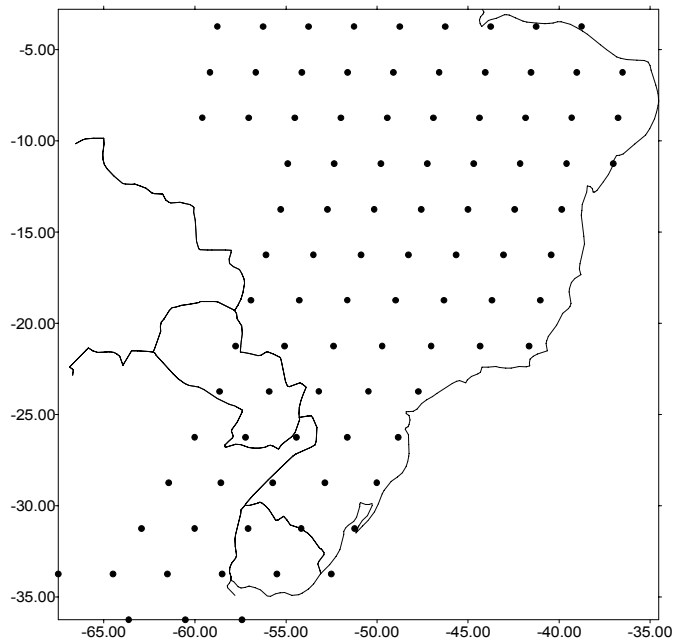


Figura 1. Los puntos están situados en el centro de cada una de las celdas consideradas para la realización de los mapas de irradiación solar global en el período 1985-1988. En los ejes se indican latitud y longitud en grados.

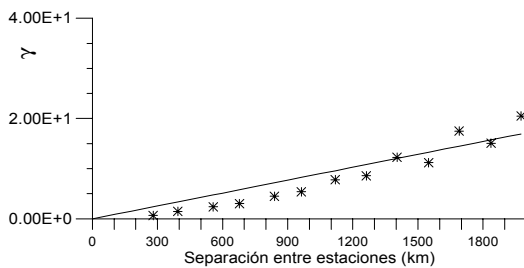


Figura 2. Variograma correspondiente al mes de enero y su estimador lineal representado en el gráfico.

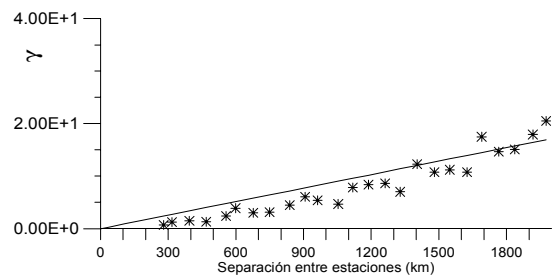


Figura 3. Variograma correspondiente al mes de julio y su estimador lineal representado en el gráfico.

“Black and White” acoplados a integradores HOBECO; abarcan un período de tiempo aproximadamente equivalente al que se extiende entre 1985-1988 y su ubicación es fundamentalmente costera.

RESULTADOS

En las siguientes figuras se pueden comparar los mapas existentes actualmente en INTERNET (figura 4 en la página siguiente) con los obtenidos mediante el empleo de métodos geoestadísticos al algoritmo de Pinker con datos del período 1985-1988 (figuras 5 y 6, en la página que sigue).

Es posible verificar la semejanza, tanto en la distribución de isolíneas como en los valores de radiación propiamente dichos que existen entre los mapas presentes en INTERNET y el elaborado en base al mismo algoritmo de Pinker aplicado a un período de tiempo menor. Este hecho indica, por lo tanto, que las medias diarias mensuales de radiación solar global calculados por el algoritmo de Pinker no han variado sustancialmente entre los períodos 1985-1988 y 1983-1993. Se puede verificar la coherencia que el trazado de las isolíneas de irradiación solar global por el método de kriging tiene para la zona costera de Brasil.

En la figura 8 y 9 que se encuentran más adelante se presentan las cartas de radiación solar global correspondientes a los meses de enero y julio, habiendo trazado las isolíneas por métodos geoestadísticos, y considerado únicamente los datos provenientes de 21 estaciones piranométricas de Brasil cuya ubicación se muestra en la figura 7 de la misma página. Los datos de las estaciones corresponden a períodos aproximadamente equivalentes al que se extiende entre 1985-1988. Se consideraron aproximaciones exponenciales y lineales para los variogramas respectivos.

La comparación entre los mapas de isolíneas obtenidos usando datos de las estaciones piranométricas y los anteriores, trazados empleando las estimaciones obtenidas mediante el algoritmo de Pinker, pone de manifiesto las discrepancias

existentes entre ellos. Estas diferencias se manifiestan tanto en lo que respecta a la distribución de las líneas de igual radiación como a los valores mismos de radiación interpolados en el territorio de Brasil.

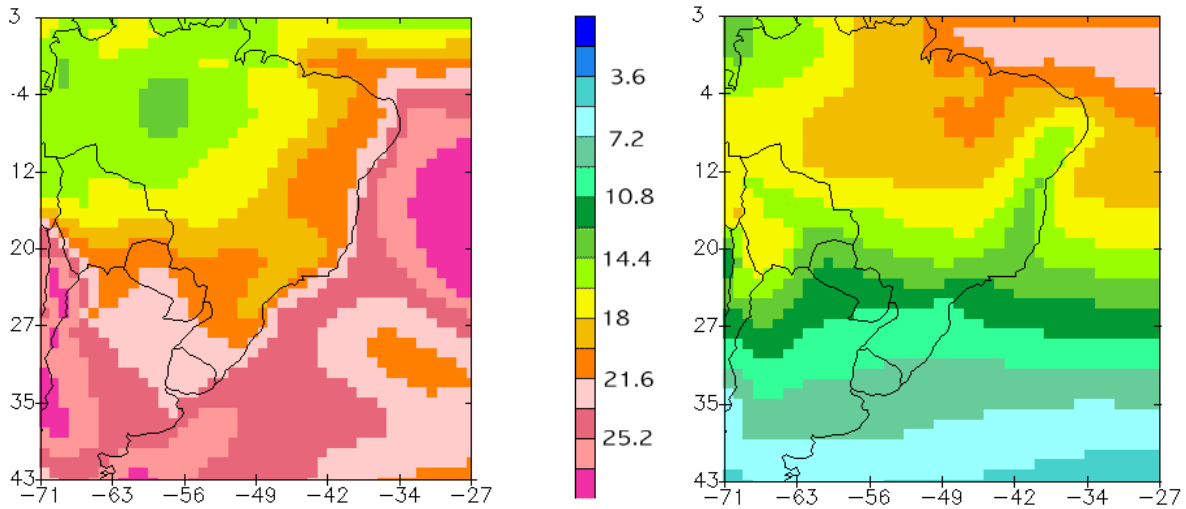


Figura 4. Distribución espacial promedio de la irradiación global diaria correspondiente al mes de enero, a la izquierda, y al mes de julio, a la derecha, presente en Internet, dada en MJ/m^2 -día. Los cálculos se hicieron sobre datos que abarcan el periodo julio de 1983-junio de 1993. En los ejes se indican latitud y longitud en grados.

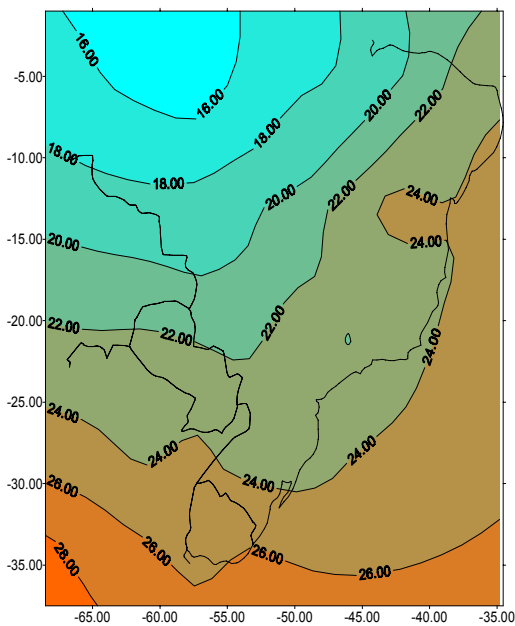


Figura 5. Distribución de las isolíneas de la irradiación global diaria correspondiente al mes de enero, calculada en MJm^2 -día para el periodo 1985-1988. En los ejes se indican latitud y longitud

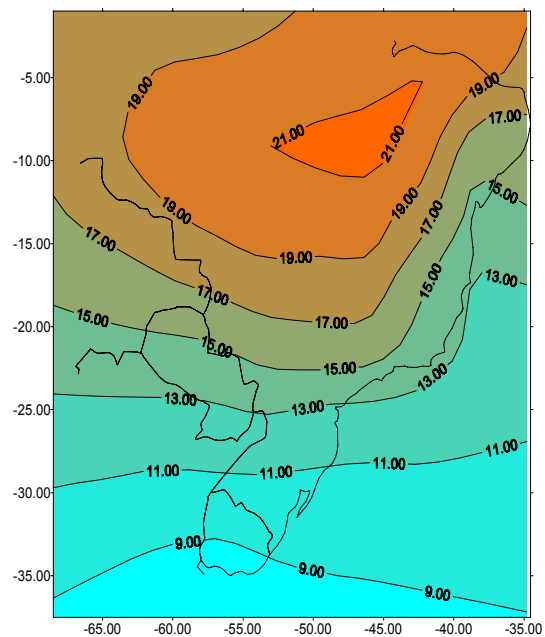


Figura 6. Distribución de las isolíneas de la irradiación global diaria correspondiente al mes de julio, calculada en MJm^2 -día para el periodo 1985-1988. En los ejes se indican latitud y longitud

Las causas pueden ser varias: en primer lugar, el trazado del mapa de isolíneas considerando los datos de las estaciones puede verse influido por la distribución preferentemente costera que tiene las estaciones de medición. Este efecto puede ocasionar una interpolación que dé un peso excesivo a las estaciones costeras, deformando inadecuadamente el resultado del mapa de isolíneas que toma sus valores como referencia. Otra causa posible es que esta ubicación no permita evaluar adecuadamente la variabilidad espacial asociada a las diferentes regiones fitogeográficas: en el trazado de las cartas del trabajo de Tiba *et al.* ya citado se complementó esa base de datos con la información de precipitaciones del Atlas Climatológico de América del Sur (O.M.M., 1975) y con los mapas de cobertura vegetal. Finalmente, otra posible causa es que se desconoce la existencia de calibración periódica de los sensores utilizados, por lo que el error podría ser mayor al considerado.

CONCLUSIÓN

Los mapas de irradiación solar global obtenidos aplicando el método de krigaje al trazado de isólinas a los valores estimados con el modelo de Pinker para el período 1985-1988 revelan información equivalente, lo que permite concluir que las medias diarias mensuales calculadas usando este modelo no han variado sustancialmente entre los períodos 1985-1988 y 1983-1993, al menos para este país. Al mismo tiempo queda verificada la coherencia que el trazado de isólinas de radiación solar global por el método de “kriging” tiene para la zona costera de Brasil.

Los mapas de isólinas trazados utilizando únicamente datos de las estaciones piranométricas presentan diferencias importantes con respecto a los dos mencionados anteriormente, lo cual no se observa si se los compara con los elaborados por Tiba *et al.* (estas diferencias se manifiestan tanto en lo que respecta a la distribución de las líneas de igual radiación como a los valores mismos de radiación interpolados).

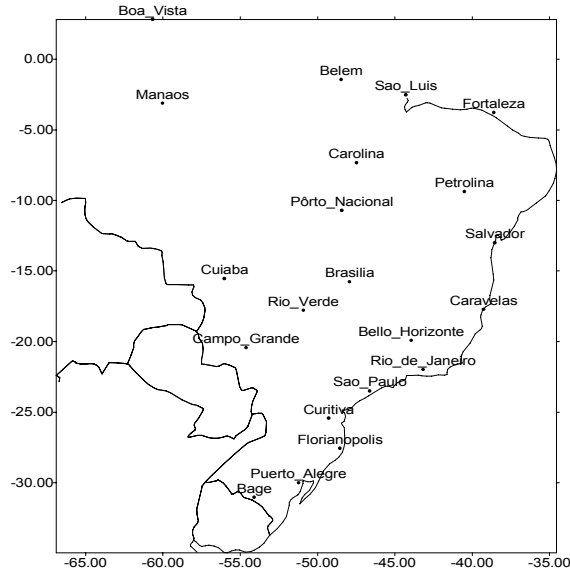


Figura 7. Ubicación de las estaciones piranométricas consideradas para el trazado de las isólinas de irradiación global por el método de kriging. En los ejes se indican latitud y longitud en grados.

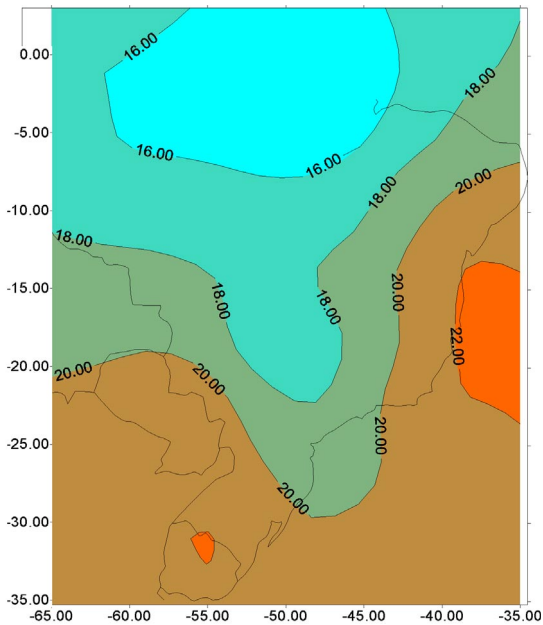


Figura 8. Distribución de las isólinas de la irradiación global diaria correspondiente al mes de enero, calculada en MJ/m²-día sobre la base de datos de estaciones piranométricas. En los ejes se indican latitud y longitud.

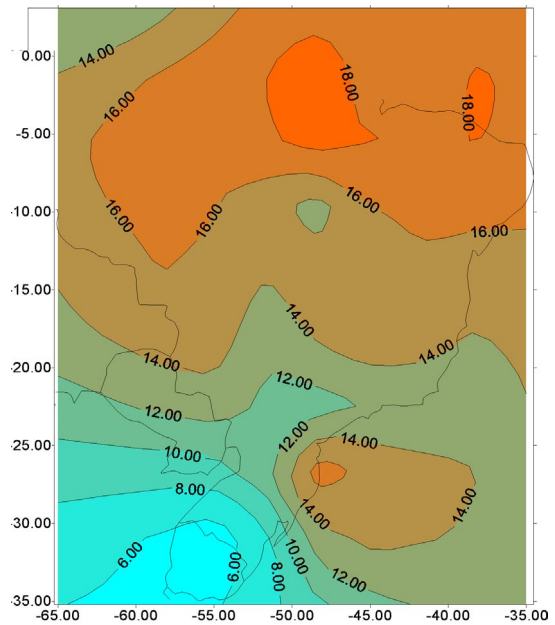


Figura 9. Distribución de las isólinas de la irradiación global diaria correspondiente al mes de julio, calculada en MJ/m²-día sobre la base de datos de estaciones piranométricas. En los ejes se indican latitud y longitud.

Por lo que puede apreciarse, al carecer de una cobertura espacial adecuada, el método de krigaje produce mapas diferentes de lo obtenido con otros modelos, lo que se podría reducir utilizando otra información complementaria ("co-kriging"). Quedaría pues por investigar esta posibilidad en una próxima etapa del trabajo ya que ésta es una situación muy común en toda Sudamérica.

REFERENCIAS

- Aguar, J. F. (1999). *Cartografía de la Radiación Solar por Métodos Geoestadísticos*, 39 p., Red Iberoamericana de Solarimetría (RISOL).
- Ceballos J. C., Pereira R. C. G., Bastos, E., J. B., y Moraes, E. C. (1998.) Solar radiation monitoring using a physical model and GOES-8 VIS imagery. Pre-prints, IX Conference on Satellite Meteorology and Oceanography, Paris, Francia, 430-431.
- Frulla, L., Grossi Gallegos, H., Gagliardini, D. and Atienza, G. (1990) Analysis of satellite-measured insolation in Brazil. *Solar & Wind Technology* 7 N°5, 501-509.
- Grossi Gallegos H. (1998 a). 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. (1998 b). Evaluación a nivel de superficie de las radiación solar global en la República Argentina. Trabajo de Tesis para optar al título de Doctor de la Universidad Nacional de Luján, 180 p., Anexo 2.
- 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.
- Justus, C., Paris, M. V. and Tarpley, J. D. (1986) Satellite Measured Insolation in United States, Mexico and South America. *Remote Sensing and Environment* 20, 57-83.
- Kriege, D. (1951). A statistical problem to some basic mining valuation problems on the Witwatersand. *Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of the South Africa* 7, 119-139.
- Nunes, G.S., André, R.G.B., Vianello, R. L. e Marques, V. S. (1978) Estudo da Distribuição da Radiação Solar sobre o Brasil. INPE, São José dos Campos, SP, Brasil, 45 pp.
- Pereira, E. B., Abreu, S. L., Stuhlmann, R., Rieland, M. and Colle, S. (1996). Survey of the incident solar radiation in Brazil using the Meteosat satellite data. *Solar Energy* 57, 2, 125-132
- Pinker T. and Laszlo L. (1992). Modeling Surface Solar Irradiation for Satellite Applications on a Global Scale. *Journal of Applied Meteorology* 31, 194-211.
- Righini, R. y Grossi Gallegos, H. (2000) Evaluación de la distribución de la irradiación solar global en la República del Paraguay en base a datos satelitales. *Energías Renovables y Medio Ambiente* 8, 9-12.
- Righini, R. y Grossi Gallegos, H. (2001) Evaluación preliminar de la distribución de la irradiación solar global en el Gran Chaco Americano. En *Anales del IX Congreso Latinoamericano e Ibérico de Meteorología - VIII Congreso Argentino de Meteorología*, versión CD-ROM, Buenos Aires, Argentina.
- Tiba, C., Grossi Gallegos, H., Fraidenraich, N. and Lyra, F. (1999) On the development of spatial/temporal solar radiation maps: a Brazilian case study. *Renewable Energy* 18, pp. 393-408.
- Vila Nova, N.A. e Salatti, E. (1977) Radiação Solar no Brasil. En *Anais do I Simposio Anual da Academia de Ciencias do Estado de São Paulo*, pp. 27-61.

ABSTRACT: Considering the availability on the internet of the values of monthly averages corresponding to an estimation of low spatial resolution elaborated by using Pinker's algorithm to four years of satellite data, its adjustment with ground information is analysed and the results of the application of geostatistical cartographic methods in the treatment of them are presented. The obtained maps are compared with those that internet actually show.

Keywords: solar radiation, Brazil, kriging, isolines.