

APROXIMACIÓN ALTERNATIVA A LA EVALUACIÓN DEL RECURSO SOLAR EN BRASIL EN BASE A DATOS DE TIERRA

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

GERSolar, Departamento de Ciencias Básicas, Universidad Nacional de Luján, Rutas 5 y 7, (6700) Luján,
Buenos Aires, ARGENTINA, Tel./Fax: (54-2323) 440241, E-mail: gersolar@yahoo.com.ar

RESUMEN: Teniendo en cuenta que la longitud de las series de datos medidos de irradiación solar de buena calidad no son suficientes en general para cumplir con las condiciones de representatividad espacial y temporal, aparecieron alternativas para estimarlos en base a la existencia de otras variables meteorológicas, una de las cuales es la heliofanía. En este trabajo se considera un número limitado de estaciones en las cuales se midieron simultáneamente la irradiación global y la heliofanía efectiva, lo que hace posible determinar las constantes de la ecuación de Ångström–Prescott. Las curvas de distribución espacial de esas constantes para todo el país fueron trazadas usando el método de kriging. Teniendo en cuenta los datos de heliofanía efectiva obtenidos en un gran número de estaciones, se trazaron las cartas con la distribución de la heliofanía relativa usando el mismo método de interpolación. Se operó sobre ellas con la ecuación lineal de Ångström–Prescott, encontrándose valores medios de irradiación global para todo el territorio. Se presentan a modo de ejemplo las cartas de Enero y Julio.

Palabras clave: irradiación global, promedios, distribución, alternativa, Brasil.

INTRODUCCIÓN

La problemática de la carencia de datos de radiación suficientes en cantidad y calidad es bastante generalizada (a nivel mundial, aproximadamente sólo en una de cada 500 estaciones meteorológicas se realizan observaciones de radiación solar incidente) y se hace evidente también en otros campos distintos al de su aprovechamiento energético, como por ejemplo, la aplicación de modelos que simulan procesos de fotosíntesis o evapotranspiración.

Dado que, en general, el número de estaciones de medición de la radiación solar global que operan los Servicios Meteorológicos Nacionales no ha aumentado o se ha visto reducido en los últimos años por problemas de financiamiento que dificultaron su mantenimiento en operación, se ha recurrido a métodos alternativos para tratar de obtener cartas que reflejen la distribución espacio temporal de la irradiación solar basadas en otras variables meteorológicas relacionadas con ella, que presenten registros con una extensión temporal que los haga confiables estadísticamente y que ofrezcan productos que puedan ser comparados con los datos de tierra. Así fue como este Grupo presentó recientemente (Righini *et al.*, 2004, 2005) un conjunto de cartas elaborado a partir de la conocida relación establecida entre el índice de claridad K_t y la heliofanía relativa.

ANTECEDENTES

En 1997 se presentó en Brasil un primer trabajo destinado a recuperar, evaluar, calificar, estandarizar y poner a disposición de los usuarios las mejores informaciones del recurso solar existentes en el país, las que fueron utilizadas para la elaboración de cartas mensuales y anuales con la distribución espacial de los promedios diarios de la irradiación solar global recibida sobre un plano horizontal y de la heliofanía efectiva (Tiba *et al.*, 1997; Tiba *et al.*, 1998, 2002, 2004; Tiba *et al.*, 2000).

Siguiendo los métodos empleados para el trazado de las cartas de Argentina (Grossi Gallegos, 1998a y b), sobre los mapas nacionales preparados a tal efecto en papel transparente en una escala de 1:5.000.000 se volcó la información de los promedios mensuales del valor diario que integran la base de datos, diferenciando los que fueron obtenidos con piranómetros termoelectrónicos (a los que se dio prioridad) de los que lo fueron con piranógrafos bimetálicos, y dentro de ellos, los registros que presentaban mayor extensión temporal. Se tuvieron en cuenta además el mapa de hipsometría preparado por el Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas (IBGE), las cartas pluviométricas del Atlas Climatológico de América del Sur y la de cobertura vegetal y, considerando verdaderos los resultados obtenidos en zonas homogéneas de Argentina, se tuvieron en cuenta las condiciones de variabilidad espacial para extrapolar los promedios de irradiación global medidos. En base a toda esta información se trazaron a mano 12 cartas correspondientes a cada mes y 1 anual.

De manera similar se trataron los valores de heliofanía. Para tratar de homogeneizar la densidad espacial de la información disponible, se dejaron las mismas localidades utilizadas para los datos de radiación y se agregaron otras en zonas que disponía de escasa información de radiación.

* Miembro de la Carrera del Investigador del CONICET

Posteriormente, Righini y Grossi Gallegos (2001) publicaron un trabajo en el que utilizaron de manera preliminar información GOES y métodos geoestadísticos para la evaluación del recurso solar en una extensa zona del Brasil. De manera contemporánea se publicaron otras evaluaciones dando cuenta de la distribución de la energía solar basada en estimaciones satelitales (Pereira *et al.*, 1996; Colle e Pereira., 1998; Pereira *et al.*, 2006). Vale la pena comentar que estos trabajos no dieron como resultado mapas mensuales basados en estadística confiable que permitieran compararlos con los ya citados. Recientemente, y como método alternativo de aprovechamiento de la información obtenida en tierra, Tiba *et al.* (2005) adaptaron el modelo usado en la elaboración del Atlas Europeo de Radiación Solar (ESRA) para la determinación de la irradiación de cielo claro, utilizando la ecuación de Suerhcke y comparando las estimaciones con valores de tierra, dejando abierta una puerta para el trazado de nuevas cartas.

MATERIALES Y MÉTODO

Los resultados hallados en Argentina mostraron que era razonable el 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 los mismos en una zona muy extensa. Luego, en base a ellos, podían calcularse 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 %.

Para determinar la variación espacial de las constantes de la correlación se emplearon métodos geoestadísticos de interpolación. 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 isóneas de irradiación global media separadas cada 0,5 kWh/m², 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 (Righini *et al.*, 2004, 2005).

Para el presente trabajo se dispuso de los datos diarios de la irradiación solar global adquiridos con piranómetros termoelectrónicos Eppley "Black and White" y de los promedios mensuales de heliofanía efectiva (horas de insolación) medida con heliógrafos del tipo Campbell-Stokes, facilitados en ambos casos por el Instituto Nacional de Meteorología del Brasil (INEMET).

RESULTADOS

Se procedió en primera instancia a confeccionar las cartas de distribución espacial de la heliofanía efectiva media mensual de Brasil, interpolando por el método de kriging los valores obtenidos en 101 estaciones del 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 isóneas de distribución espacial, se incorporaron al análisis los datos de 18 estaciones de países limítrofes que se consignan en la Tabla 1. La localización de la totalidad de los sitios considerados para la representación de la distribución de la heliofanía se muestra en la Figura 1.

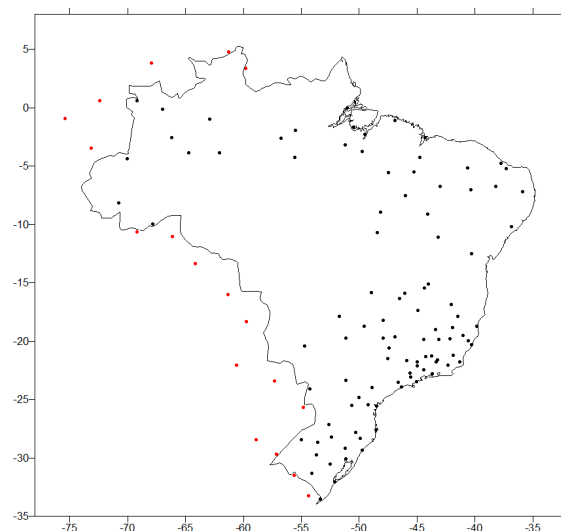


Figura 1. Localización de la totalidad de los sitios considerados para la representación de la distribución de la heliofanía efectiva (en rojo se señalan las ubicadas en países vecinos al Brasil).

| Estación | País | Latitud [°] | Longitud [°] |
|-----------------------|-----------|-------------|--------------|
| Santa Elena de Uairen | Venezuela | 4,6 | -61,12 |
| Puerto Inírida | Colombia | 3,83 | -67,92 |
| St. Ignatius (Lethem) | Guyana | 3,37 | -59,8 |
| Araracuara | Colombia | 0,62 | -72,4 |
| Nuevo Rocafuerte | Ecuador | -0,92 | -75,42 |
| Iquitos | Perú | -3,45 | -73,15 |
| Riberalta | Bolivia | -11,02 | -66,12 |
| Cobija | Bolivia | -11,08 | -68,87 |
| Magdalena | Bolivia | -13,33 | -64,15 |
| San Ignacio | Bolivia | -16,37 | -60,95 |
| Roboré | Bolivia | -18,32 | -59,75 |
| Mariscal Estigarribia | Paraguay | -22,03 | -60,62 |
| Concepción | Paraguay | -23,42 | -57,3 |
| Iguazú Aero | Argentina | -25,73 | -54,47 |
| Bella Vista INTA | Argentina | -28,43 | -58,92 |
| Paso de los Libres | Argentina | -29,68 | -57,15 |
| Rivera | Uruguay | -30,90 | -55,54 |
| Treinta y Tres | Uruguay | -33,22 | -54,39 |

Tabla 1. Listado y ubicación de las estaciones de países vecinos cuyos datos fueron utilizados para dar continuidad a las isóneas del Brasil (latitud Sur negativa, longitud Oeste negativa).

En la Figura 2 se muestran, a manera de ejemplo, los resultados obtenidos para los meses de Enero y Julio.

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:

$$\bar{K}_t = \frac{\bar{H}}{H_0} = a + b \left(\frac{\bar{n}}{\bar{N}} \right) \quad (1)$$

donde H es la irradiación solar global diaria registrada en superficie, H_0 la correspondiente irradiación fuera de la atmósfera y el cociente n/N la heliofanía relativa (las barras sobre los símbolos indican promedios mensuales). En la Tabla 2 se listan las 20 estaciones de Brasil que cuentan con la información necesaria.

Dado que, en varias de las estaciones antes señaladas, el número de casos con datos simultáneos de radiación y heliofanía por cada mes del año es relativamente bajo, se procedió a calcular las constantes a y b considerando por un lado sólo los casos del mes particular (*mensual*), por otro todos los casos de la estación correspondiente (*estacional*, esto es, solsticios y equinoccios) y por último, todos los casos existentes (*anual*). Los valores obtenidos localmente en cada estación para cada una de las distintas extensiones temporales propuestas fueron utilizados para confeccionar por kriging las grillas de distribución espacial de a y b en todo el territorio estudiado, las que aplicando la correlación (1) a las respectivas grillas antes calculadas de heliofanía relativa permitieron determinar la distribución espacial de la irradiación global media.

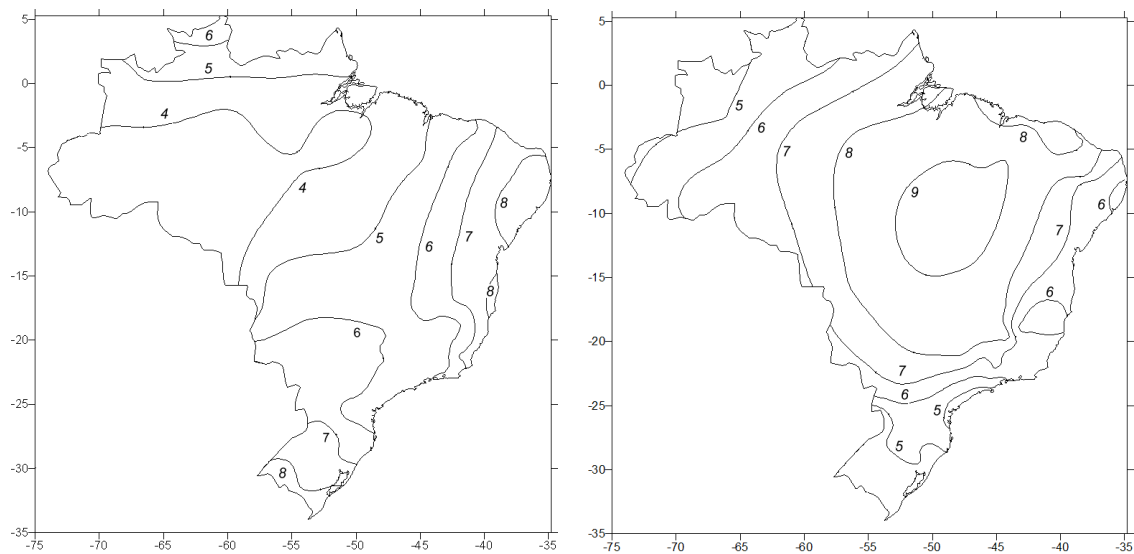


Figura 2. Distribución espacial de los valores medios mensuales de la heliofanía efectiva [horas] correspondientes a los meses de Enero (izquierda) y Julio (derecha).

| Estación | Latitud [°] | Longitud [°] |
|---------------------------|-------------|--------------|
| BELO HORIZONTE | -19,93 | -43,93 |
| BOM JESUS DA LAPA | -13,27 | -43,42 |
| BAGE | -31,33 | -54,10 |
| BELEM | -1,45 | -48,47 |
| BRASILIA | -15,78 | -47,93 |
| PETROLINA | -9,38 | -40,48 |
| SAO LUIZ GONZAGA | -28,40 | -55,02 |
| SALVADOR (ONDINA) | -13,02 | -38,52 |
| PORTO ALEGRE | -30,05 | -51,17 |
| PORTO NACIONAL | -10,72 | -48,42 |
| FORTALEZA | -3,77 | -38,55 |
| CAMPO GRANDE | -20,43 | -54,72 |
| CARAVELAS | -17,73 | -39,25 |
| CAROLINA | -7,33 | -47,47 |
| CURITIBA | -25,43 | -49,27 |
| MANAUS | -3,12 | -59,95 |
| SAO LUIS | -2,53 | -44,30 |
| SAO PAULO (M. DE SANTANA) | -23,50 | -46,62 |
| CUIABA | -15,55 | -56,12 |
| FLORIANO | -6,77 | -43,02 |

Tabla 2. Listado de estaciones con datos simultáneos de irradiación solar global y de heliofanía.

En la Figura 3 se presentan los tres mapas con la distribución espacial del promedio mensual de la irradiación global diaria correspondiente a enero estimados por este método utilizando las constantes mensuales, estacionales y por último, anuales.

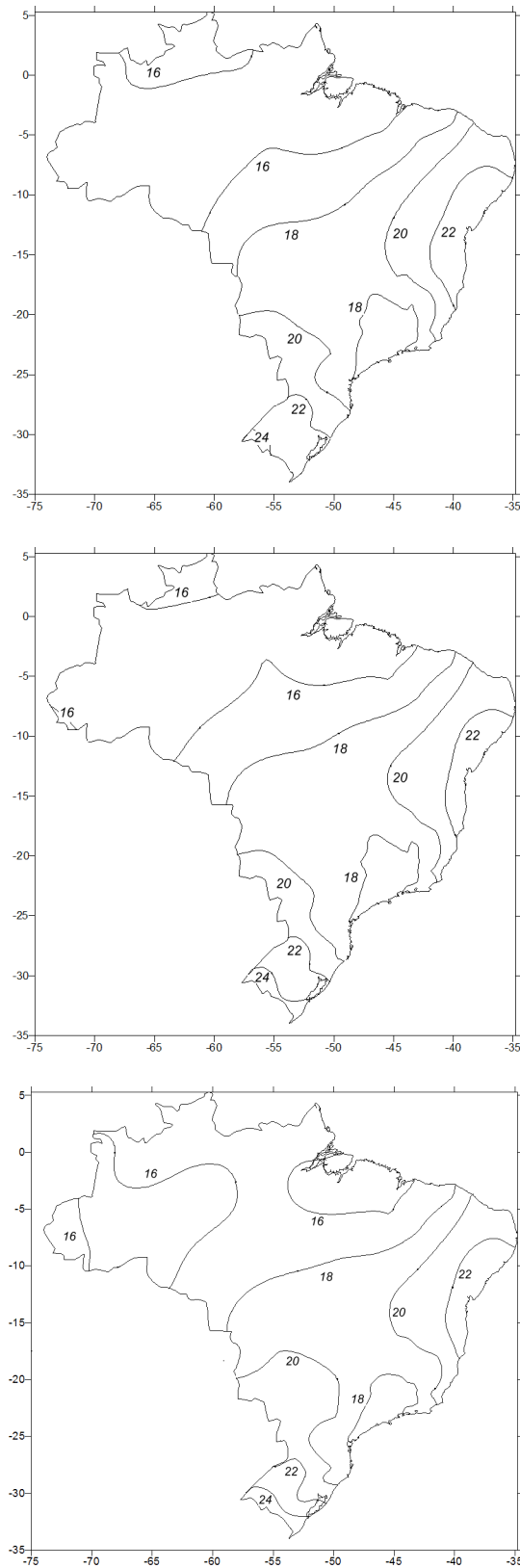


Figura 3. Distribución espacial de los promedios mensuales de la irradiación global diaria correspondiente a enero estimados por este método utilizando las constantes mensuales (arriba), estacionales (centro) y anuales (abajo), MJ/m².

En la Figura 4 se presentan los tres mapas con la distribución espacial del promedio mensual de la irradiación global diaria correspondiente a julio estimados por este método utilizando las constantes mensuales, estacionales y por último, anuales.

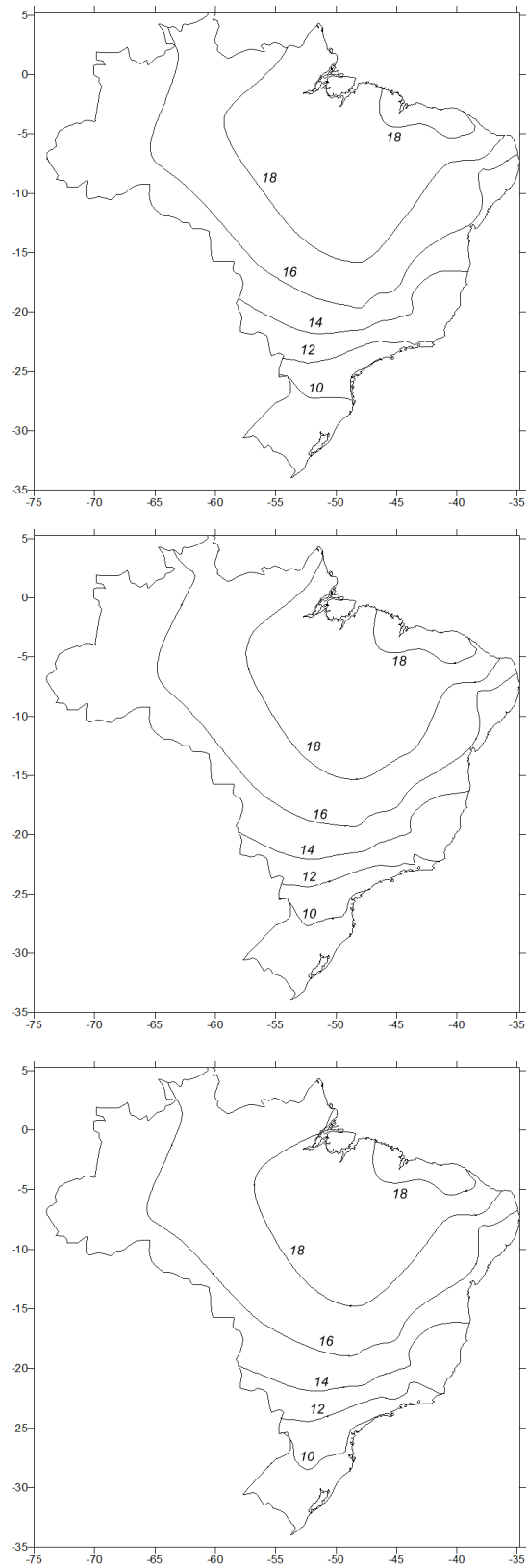


Figura 4. Distribución espacial de los promedios mensuales de la irradiación global diaria correspondiente a julio estimados por este método utilizando las constantes mensuales (arriba), estacionales (centro) y anuales (abajo), MJ/m².

Con el fin de evaluar el método empleado y poder a su vez comparar los distintos casos analizados, se cotejaron valores estimados de radiación solar global con datos medidos en estaciones que no fueron utilizadas, ya sea porque no se contaba con datos simultáneos de heliofanía o estos eran insuficientes, determinando así el error cuadrático medio relativo (RMSE) y el sesgo medio relativo (MBE), definidos como:

$$RMSE = \left[\sum_i^n (\bar{H}_{obs} - \bar{H}_{est})^2 / n \right]^{1/2} \quad (2)$$

$$MBE = \left[\sum_i^n (\bar{H}_{obs} - \bar{H}_{est}) / n \right] \quad (3)$$

divididos luego por el promedio anual de la irradiación medida y multiplicados por 100, lo que proporciona una evaluación relativa porcentual de los errores cometidos. En (2) y en (3) H_{obs} indica la irradiación observada en la estación i de referencia, y H_{est} el valor estimado en la misma.

Las estaciones utilizadas como referencia fueron: Boa Vista, Foz do Iguaçu, Petrolina, Rio de Janeiro y Rio Verde. Los resultados obtenidos se consignan en la Tabla 3.

| Constantes a y b | Enero | | Julio | |
|------------------|----------|---------|----------|---------|
| | RMSE [%] | MBE [%] | RMSE [%] | MBE [%] |
| Anual | 10,6 | 4,6 | 7,9 | 1,2 |
| Estacional | 10,5 | 7,2 | 8,0 | 0,7 |
| Mensual | 10,7 | 6,6 | 7,7 | 0,7 |

Tabla 3. Valores del error cuadrático medio relativo (RMSE) y el sesgo medio relativo (MBE) en los meses de enero y julio para cada uno de los distintos casos considerados.

La utilización de las constantes a y b de la ecuación de Ångström-Prescott calculadas para cada una de las distintas extensiones temporales propuestas dan por resultados valores del RMSE y del MBE del mismo orden (prácticamente coincidentes). Visualmente, la comparación con las cartas publicadas por Tiba *et al.* (1998) y Tiba *et al.* (2000) permite observar una alta similitud para el mes de julio, excepto en los estados de Amazonas y Roraima, acusando algunas diferencias para el mes de enero en los estados de Goiás y Minas Gerais, como así también en el oeste del estado de Amazonas y norte de Roraima. Tomando esas cartas como referencia parecería apropiado emplear para la estimación las constantes a y b denominadas *mensuales*, a pesar de que su estadística es más pobre.

CONCLUSIONES

Se presenta la aplicación de un método alternativo, ya utilizado en Argentina, para el trazado de cartas con la distribución de los promedios mensuales de la irradiación solar global diaria en Brasil. 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, tanto de irradiación global como de heliofanía, lo cual las valoriza.

Es de destacar la importancia de obtener mapas como los conseguidos, empleando solamente 20 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, como ya también lo mostrara Tiba (2001) en el nordeste del Brasil.

Agradecimientos. Los autores desean hacer presente su agradecimiento a las autoridades del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), por haber tramitado y facilitado, una vez obtenida, la información utilizada, y a las del Instituto Nacional de Meteorología del Brasil (INEMET) sin cuyo aporte no hubiera sido posible la realización de este trabajo, el que se llevó a cabo dentro del Convenio de Cooperación Mutua entre el SMN y la UNLu.

REFERENCIAS

- Colle S. e Pereira, E. B. (1998) *Atlas de Irradiação Solar do Brasil*. Instituto Nacional de Meteorologia/Laboratório de Energia Solar-EMC/UFSC, 58 páginas, Brasília-DF, Brasil.
- Grossi Gallegos H. (1998a) Distribución de la radiación solar global en la República Argentina. I. Análisis de la información. *Energías Renovables y Medio Ambiente* **4**, 119-123.

- 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.
- 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.
- Pereira E.B., Martins F.R., Abreu S.L. e Rütther, R. (2006) *Atlas brasileiro de energia solar*. INPE, São José dos Campos, SP, Brasil, 60 páginas (ISBN 978-85-17-00030-0).
- Righini, R. y Grossi Gallegos, H. (2001) Utilización preliminar de información GOES y métodos geoestadísticos para la evaluación del recurso solar en Brasil. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 5 N° 2, pp. 11.19-11.24 versión CD-ROM.
- Righini R., Grossi Gallegos H. y Raichijk C. (2004) Trazado de nuevas cartas de irradiación solar global para Argentina a partir de horas de brillo solar (heliofanía). *Energías Renovables y Medio Ambiente* **14**, 23-31.
- Righini R., Grossi Gallegos H. and Raichijk C. (2005) Approach to drawing new global solar irradiation contour maps for Argentina. *Renewable Energy* **30**, 1241-1255.
- Tiba C., Fraidenraich N., Lyra F.J.M., Nogueira A.M., Grossi Gallegos H., Moszkowicz M. e Cavalcanti E.S. (1997) *Atlas Solarimétrico do Brasil*. Relatório Técnico Final, Vol. I a IV (Convenio No. 004 Universidade Federal de Pernambuco/Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – ELETROBRÁS).
- Tiba C., Fraidenraich N., Grossi Gallegos H., Lyra F.J.M. (1998) Radiación solar en Brasil: una evaluación. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* **2**, 2, 11.9-11.12.
- Tiba C., Fraidenraich N., Lyra F.J.M., Nogueira A.M., Grossi Gallegos H., Moszkowicz M. e Cavalcanti E.S. (2000) *Atlas Solarimétrico do Brasil: banco de dados terrestres*. Ed. Universitária da UFPE, 111 páginas, Recife, PE, Brasil (ISBN: 85-7315-142-0).
- Tiba, C. (2001) Solar radiation in the Brazilian Northeast. *Renewable Energy* **22**, 565-578.
- Tiba C., Fraidenraich N., Grossi Gallegos H., Lyra F.J.M. (2002) Solar energy assessment – Brazil. *Renewable Energy* **27**, 383-400 (2002).
- Tiba C., Fraidenraich N., Grossi Gallegos H., Lyra F.J.M. (2004) Brazilian Solar Resource Atlas CD-ROM, *Renewable Energy* **29**, 991-1001.
- 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.

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, and one of the values used was the number of hours of bright sunshine. In this paper a limited number of stations is considered where the daily hours of bright sunshine and of global irradiation were measured simultaneously, thus making it possible to find the constants of the Ångström–Prescott equation. The spatial distribution curves of those constants for the whole country were drawn using the kriging method. From them, and taking into account the data from bright sunshine hours measured in a great number of stations, charts with the distribution of hours relative to bright sunshine were drawn using the above-mentioned interpolation method and the Ångström–Prescott linear equation was applied; mean values for the whole territory were thus found. The charts with the space–time distribution of the resource were drawn. The results obtained for the months of January and July are shown for illustration purposes.

Key words: global irradiation, mean values, distribution, alternative, Brazil.