

## RADIACION SOLAR EN BRASIL : UNA EVALUACION

C. Tiba<sup>1</sup>, H. Grossi Gallegos<sup>2</sup>, N. Fraidenraich<sup>1</sup> y F. Lyra<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Grupo de Pesquisas em Fontes Alternativas de Energia, Depto. de Física Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, Av. Prof. Luiz Freire, 1000 - Cidade Universitária, 50.740-540-Recife-PE- BRASIL-FAX: (55-81) 271 8250

<sup>2</sup> División Física, Dpto. de Ciencias Básicas, Universidad Nacional de Luján, Rutas 5 y 7, 6700 Luján, Buenos Aires, ARGENTINA, Fax : (54-323) 25795 E-mail: grossi@mail.unlu.edu.ar

<sup>3</sup> Divisão de Projetos de Fontes Alternativas, Companhia Hidro Elétrica do São Francisco, Rua Edelmiro Gouveia, 333, 50.761-901-Recife-PE-BRASIL

### RESUMEN

Este trabajo trata de resumir la información recientemente incluida en el Atlas Solarimétrico del Brasil. Se plantea aquí la necesidad de este tipo de producto a fin de reducir la incidencia de los costos de capital por unidad de energía generada, teniendo en cuenta el significativo aumento experimentado en la instalación de sistemas de electrificación rural con tecnología fotovoltaica en el país. Se describe la metodología y se discuten los resultados, concluyéndose que las cartas elaboradas responden adecuadamente a los datos disponibles en el Brasil dentro de las condiciones que se impusieron en la metodología; aparecen regiones en las cuales sería necesario analizar más detalladamente la información de base y otras en las cuales se hace necesario mejorar la cobertura o utilizar otra metodología complementaria.

### INTRODUCCION

El aumento significativo experimentado en la instalación de sistemas de electrificación rural con tecnología fotovoltaica en los últimos años en Brasil, ya sea para iluminación doméstica como para bombeo de agua (Barbosa *et al.*, 1996) exige con urgencia mejorar el conocimiento de la distribución del recurso solar con el objetivo de reducir la incidencia de los costos de capital por unidad de energía generada. Si bien las fuentes de información de radiación solar existentes en el país son muchas, la calidad de los datos es muy variada y las series presentan discontinuidades tanto en lo espacial cuanto en lo temporal, no estando estandarizados ni los instrumentos de medición ni las unidades utilizadas.

El objetivo de la tarea encarada fue recuperar, evaluar, calificar, estandarizar y poner a disponibilidad de los usuarios las mejores informaciones del recurso solar existentes en el Brasil, las que fueron utilizadas para la elaboración de cartas mensuales y anuales de la distribución espacial de los promedios de la radiación solar global recibida sobre un plano horizontal y de las horas de insolación (Tiba *et al.*, 1997). Se prepararon así 26 cartas en una escala 1:5.000.000 con las isolíneas de los dos parámetros antes citados.

En el presente trabajo se presentan los antecedentes previos a la elaboración de las mencionadas cartas, se expone la metodología utilizada para el trazado de las mismas, se discute la representatividad temporal de los promedios y se formulan algunas consideraciones acerca de la distribución espacial de la radiación solar, relacionándosela con las condiciones climáticas y geográficas. Se incluyen, además, algunas de las cartas del Atlas Solarimétrico del Brasil.

### ANTECEDENTES

Los estudios sistemáticos sobre la radiación solar incidente en el Brasil se iniciaron en la década del sesenta; en la mayor parte de los casos se trataba de trabajos motivados por el interés agrícola en los que se estimaba la radiación global a través de correlaciones del tipo de Angström a partir de los datos de heliofania. A fines de la década del setenta la radiación solar comienza a ser estudiada por grupos de investigación de las universidades, de meteorología o por empresas interesadas en su aprovechamiento energético. Aparecen así estudios que presentan registros medidos con piranógrafos o piranómetros; también fueron hechas nuevas estimaciones utilizando correlaciones establecidas en otros países.

Todas las cartas con la distribución mensual o anual del promedio de la radiación solar diaria, ya sea de alcance nacional o regional, fueron elaboradas con datos medidos por piranógrafos, o a través de estimaciones o mediante una combinación de ambos procedimientos. Este período fue ciertamente uno de los más productivos; durante el mismo que se obtuvieron, procesaron e hicieron disponibles la gran mayoría de las informaciones con las que hoy se cuenta. Entre los trabajos realizados en este período cabe destacar las cartas mensuales elaboradas para el Cono Sur de América Latina, las que presentaron la distribución de las medias mensuales de la radiación global diaria medidas con piranómetros en el territorio brasileño ubicado al Sur de la latitud 10°S (Grossi Gallegos *et al.*, 1987b).

Recientemente fueron presentados los resultados de la aplicación de un modelo para la estimación de la distribución espacial del promedio mensual de la radiación a nivel de la superficie terrestre elaborada a partir de datos satelitales

(Pereira *et al.*, 1996), trabajo que incluyó 4 cartas correspondientes a la radiación global y a la difusa en los períodos de invierno y de verano para la parte del territorio nacional comprendida entre las longitudes 30°W y 60°W preparadas en base a 2 años de datos. Comparado con valores medidos en tierra con piranómetros termoelectrónicos el modelo arrojó un error cuadrático medio (RMSE) de 13% sobre las medias mensuales.

## METODOLOGIA

Cuando se encara la preparación de un Atlas Preliminar de un recurso renovable como el solar se pretende que el mismo refleje, a partir de la información existente, la distribución global del mencionado recurso, dejando de lado en esta etapa particularidades propias de la pequeña y la mediana escala (entre 10 y 100 km en distancia horizontal) frente a las de la macro-escala. Se buscó así, dentro de las posibilidades de la información disponible, compatibilizar la base de datos (de procedencia muy diversa, tanto por el instrumental con que fueron obtenidos cuanto por la extensión y tratamiento a que fueron sometidos) y determinar zonas bien diferenciadas, sin perder de vista el carácter preliminar del producto final.

### Procedimiento seguido para el trazado de las cartas

Sobre las mapas nacionales preparados a tal efecto en papel transparente en una escala de 1:5.000.000, en proyección policónica con meridiano central 54°W, se volcó la información de la media anual de los valores diarios y de los promedios mensuales de los mismos que integran la base de datos, diferenciando los que fueron obtenidos con piranómetros termoelectrónicos de los que lo fueron con piranógrafos bimetálicos, y dentro de ellos, los registros que presentan mayor extensión temporal. Los valores procedentes de estimaciones calculadas con diversos modelos se dejaron de lado para ser utilizados en caso de presentarse alguna duda durante el desarrollo del trabajo. Cada uno de estos mapas transparentes fue superpuesto al de hipsometría de Brasil preparado por el Instituto Brasileiro de Geografia y Estadísticas (IBGE), a intervalos de altura de 200m.

En primer lugar, teniendo en cuenta que el error que pueden introducir los piranómetros termoelectrónicos operando en una red se encuentra entre el 3 y el 5%, dependiendo del modelo (Stanhill and Moreshet, 1992; Grossi Gallegos, 1998) y que el de los piranógrafos registrando valores diarios sobre banda de papel puede variar entre el 10 y el 15% si cuentan con un mantenimiento razonable (Lopardo y Fernández, 1976; Esteves and De Rosa, 1989; World Meteorological Organization, 1981), se dio prioridad a la información obtenida con los primeros, provenientes de estaciones del Instituto Nacional de Meteorología (INMET) y de la Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG).

En segundo lugar, se consideraron las condiciones de variabilidad espacial de los promedios mensuales provenientes de mediciones piranométricas diarias en regiones aproximadamente homogéneas (suponiendo isotropía); como no fueron analizadas para el Brasil, se utilizaron las determinadas para la región de la Pampa Húmeda argentina, lo que permitió extrapolar sus valores hasta aproximadamente 200 km sin exceder un error del 10% dentro de un nivel de confianza del 90% (Grossi Gallegos and Lopardo, 1988).

En tercer lugar, se tuvieron en cuenta los valores promedio de la radiación global obtenidos en las zonas fronterizas de países vecinos y los trabajos similares llevados a cabo en ellos (Grossi Gallegos *et al.*, 1986; Grossi Gallegos *et al.*, 1987a; Grossi Gallegos *et al.*, 1993). Como apoyo complementario se utilizaron las cartas pluviométricas del Atlas Climatológico de América del Sur (Organización Meteorológica Mundial, 1975) y la de cobertura de vegetación del IBGE.

Los valores de los promedios de la radiación solar global diaria se expresaron en MJ/m<sup>2</sup> y los números sobre las isocías se ubicaron del lado creciente de los valores. Como consecuencia de las anteriores consideraciones se estableció como espaciado adecuado entre isocías sucesivas 2 MJ/m<sup>2</sup>, utilizándose una línea de trazos en aquellas regiones en las que la información no existe o no era lo suficientemente confiable.

De manera similar se trataron los valores de heliofanía. En primer lugar, para tratar de homogeneizar la densidad espacial de la información disponible, se dejaron las mismas localidades utilizadas para los datos de la primera parte y se agregaron otras en las zonas que disponían de poca información de radiación. Al no disponer de un análisis acerca de la calidad de los datos obtenidos con los heliógrafos de Campbell-Stokes, se asignó "a priori" la misma confiabilidad a todos, considerando un error no inferior al 10%.

### Análisis de la representatividad temporal de los promedios de radiación global

A fin de establecer la representatividad temporal de los datos de radiación utilizados se analizaron los promedios mensuales provenientes de estaciones piranométricas, aplicándose para ello el tratamiento dado en trabajos anteriores realizados por Hay (1977), Black (1981) y Grossi Gallegos (1998) basándose en el teorema central del límite. Considerando que podría suponerse que la incerteza de los piranómetros de segunda clase utilizados (Eppley modelo 8-48 "Black and White" y Schenk "Stern") sin un control periódico tomara valores entre el 5 y el 7.5% de los promedios mensuales, se calculó el índice de confianza de los promedios utilizados y de allí se obtuvo el nivel de confianza, esto es, qué porcentaje del tiempo la media muestral se mantiene dentro de una franja de  $\pm 7.5\%$  de la media a largo plazo ("long term mean"). Se pudo ver así que el 95% de los valores medios cumplían con la condición establecida; el restante 5% podría sugerir la existencia de problemas en el mantenimiento de los instrumentos o en el procesamiento de los datos. Basados en estos resultados, se trazaron las isocías de la distribución de los promedios de la radiación global

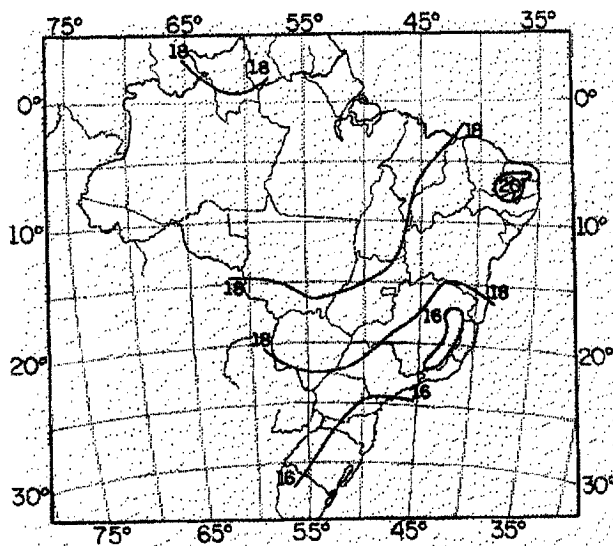


Figura 1. Isolíneas de la distribución espacial del promedio anual de la radiación solar global diaria ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ ).

diaria, tanto en base anual cuanto mensual. Como ejemplo, en la figura 1 se muestra la distribución anual, mientras que en la figura 2 las correspondientes a los meses de enero y julio.

### DISCUSION DE LOS RESULTADOS

El promedio anual de la radiación global diaria en Brasil está centrado prácticamente en el intervalo  $(18 \pm 2) \text{ MJ}/\text{m}^2\text{-día}$ , con dos excepciones: por un lado, existe una zona de valores mayores que  $20 \text{ MJ}/\text{m}^2\text{-día}$ , lo que es similar a lo registrado en Sud América sólo en la Guajira colombiana y en el Altiplano compartido por Argentina, Bolivia, Chile y Perú (Grossi Gallegos, 1997), ubicada en el extremo Nordeste del país (la que podría llegar a ser algo más extensa longitudinalmente si se tiene en cuenta el área de bajas precipitaciones - menores que 600 mm anuales - y alta heliofanía - 8 horas - que allí se registra). Por otro lado, se encuentran dos zonas de valores inferiores a  $16 \text{ MJ}/\text{m}^2\text{-día}$  ubicadas, una en el Sudeste (región oriental del Estado de Minas Gerais - motivada por efectos locales de la serranía - que también podría llegar a extenderse hasta el Atlántico) y la otra en el Sur (cubriendo aproximadamente la mitad de los Estados de Paraná, Santa Catarina y Rio Grande do Sul).

Los máximos valores medios mensuales (mayores que  $24 \text{ MJ}/\text{m}^2\text{-día}$ ) se alcanzan en el extremo meridional del país, en una parte del Estado de Rio Grande do Sul, los meses de diciembre y enero, coincidentemente con los valores alcanzados en los territorios limítrofes de Argentina, Paraguay y Uruguay. También las mínimas medias mensuales (menores que  $10 \text{ MJ}/\text{m}^2\text{-día}$ ) se registran en la misma región en junio y julio, alcanzándose valores menores que  $8 \text{ MJ}/\text{m}^2\text{-día}$  sólo en el extremo sur costero del Estado de Rio Grande do Sul. Por lo tanto, esta región es la que registra la mayor amplitud en la variación intermensual del promedio de la radiación global (del orden de  $14 \text{ MJ}/\text{m}^2\text{-día}$ ).

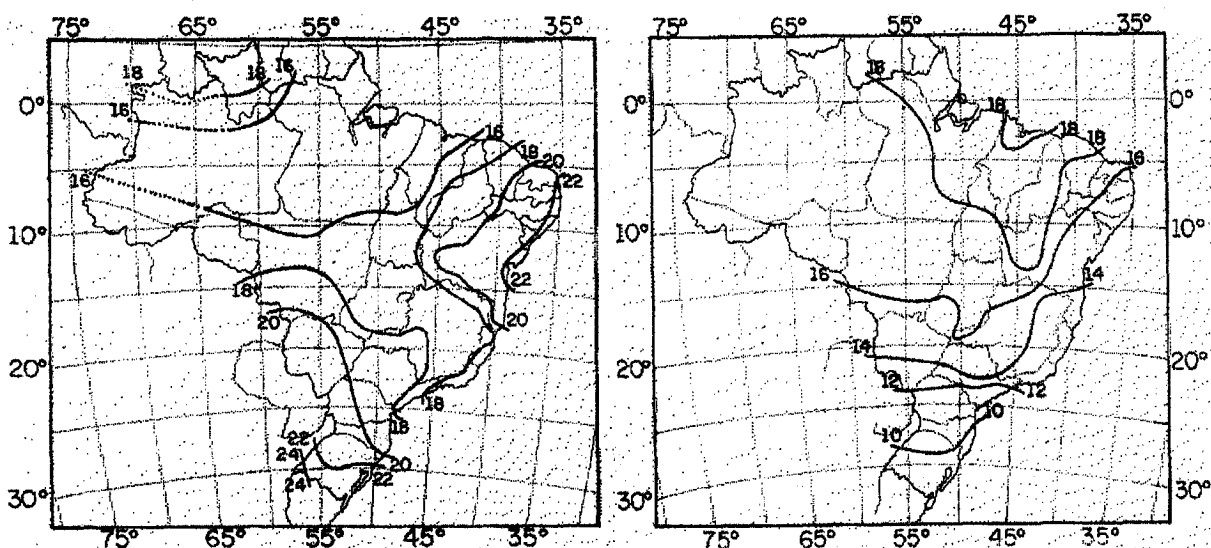


Figura 2. Isolíneas de la distribución espacial del promedio mensual de la radiación solar global diaria ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ ) correspondientes a los meses de enero (izquierda) y julio (derecha).

Algunos desajustes en los valores hallados con los valores obtenidos en las estaciones piranométricas del Estado de Minas Gerais indicarían la necesidad de analizar el mantenimiento prestado al instrumental ya que los piranómetros Schenk que las integran han mostrado en otros trabajos apartamientos de hasta el 10% en las sumas diarias con respecto a solarímetros de primera clase (World Meteorological Organization-International Council of Scientific Unions, 1986). La región amazónica comprendida entre 50° y 74° de longitud Oeste y 0° y 15° de latitud Sur es la que tiene cobertura muy escasa o inexistente, por lo que estos resultados tienen que ser considerados como meramente indicativos (tampoco es adecuada la cobertura en los países limítrofes de la región occidental).

## CONCLUSIONES

Puede considerarse que las cartas de radiación global elaboradas responden adecuadamente a los datos disponibles en el Brasil, dentro de las condiciones que se impusieron en la metodología, siendo compatibles con el mejor nivel del estado del conocimiento del recurso en América del Sur. Aparecen claramente en cada mes regiones bien diferenciadas, correlacionadas razonablemente con las condiciones pluviométricas imperantes y con la heliofania, siendo posible su integración con los trabajos similares que puedan ser llevados a cabo en países vecinos (estos problemas podrán mejorarse con una complementación satelital cuando estas técnicas alcancen la precisión necesaria).

## REFERENCIAS

- Barbosa, E., Fraidenraich, N., Fraga, A. and Tiba, C. (1995). Photovoltaic Electrification. Social and Technical Diagnosis of Systems Installed in the Northeast of Brazil after one Operating Year. En *Proc. 13<sup>th</sup> European Photovoltaic Energy Conference*, Freiesleben, W., Paltz, W., Ossenkopf, H. and Helm, P. (Eds.), pp. 1088-1091, Nice, France.
- Black, J.N. (1981) Some aspects of the climatology of solar radiation. En *Proc. U.N. Conference in New Sources of Energy*, Paper E/CONF. 35/513, pp. 311-316, Rome, Italy.
- Esteves, A. and De Rosa, C. (1989). A simple method for correcting the solar radiation readings of a Robitzsch-type pyranometer. *Solar Energy* 42, 1, 9-13.
- Grossi Gallegos, H., García, M., Atienza, G. y Castel, M.E. (1986) Estimación de la distribución de la radiación solar global en la República del Paraguay. En *Actas de la 11a. Reunión de Trabajo de la ASADES*, pp. 197-202, S. Luis, Argentina.
- Grossi Gallegos, H., Atienza, G., García, M., Renzini, G., Peralta, M., Saravia U., I. y Arteaga T., A. (1987a) Estimación de la distribución de la radiación solar global en la República de Bolivia. En *Actas de la 12a. Reunión de Trabajo de la ASADES*, vol. I, pp. 83-93, Buenos Aires, Argentina.
- Grossi Gallegos, H., Atienza, G. y García, M. (1987b) Cartas de radiación solar global para la región meridional de América del Sur. En *Anales del II Congreso Interamericano de Meteorología*, pp. 16.3.1-16.3.10, Buenos Aires, Argentina.
- Grossi Gallegos, H. and Lopardo, R. (1988). Spatial variability of the global solar radiation obtained by the Solarimetric Network in the Argentine Pampa Humeda. *Solar Energy* 40, 5, 397-404.
- 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*, pp. 216-220, Cáceres y Salamanca, España.
- Grossi Gallegos, H., Atienza, G. y Castel, M.E.G. de (1993) La medición de la radiación solar en la República del Paraguay. *Actas del 7mo. Congreso Latinoamericano de Energía Solar - 16a. Reunión de Trabajo de la ASADES*, tomo I, pp. 303-308, La Plata, Buenos Aires, Argentina.
- Grossi Gallegos, H. (1997). Acerca del campo de los promedios anuales de la radiación solar global diaria en América del Sur. *Energías Renovables y Medio Ambiente* 2, 75-79.
- Grossi Gallegos, H. (1998). Distribución de la radiación solar global en la República Argentina. I. Análisis de la información. *Energías Renovables y Medio Ambiente* 4, 119-123.
- Hay, J. (1977). *An analysis of solar radiation data for selected locations in Canada*. Climatological Studies No. 32, Atmospheric Environment, Downsview, Canada, 158 p.
- Lopardo, R. y Fernández, R. (1979) Estudio técnico-económico del instrumental necesario para la Red Solarimétrica en la Argentina. En *Atas do 2º Congresso Latino-Americano de Energia Solar*, Vol. I, pp. 113-120, João Pessoa, Brasil.
- Organización Meteorológica Mundial (1975) *Atlas Climático de América del Sur*, Vol. I (J. Hoffmann, Ponente). O.M.M., UNESCO, Cartographia, Budapest, Hungría, 28 cartas.
- 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.
- Stanhill, G. and Moreshet, S. (1992). Global radiation climate changes: the World Network. *Climatic Change* 2, 57-75.
- Tiba, C., Fraidenraich, N., Lyra, F.J., 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).
- World Meteorological Organization (1981) *Meteorological Aspects of the Utilization of Solar Radiation as an Energy Source*. Technical Note No. 172, WMO-No. 557, pp. 59-81, Gêneve, Switzerland.
- World Meteorological Organization-International-Council of Scientific Unions (1986) *Revised instructions manual on radiation instruments and measurements*. C. Frölich and J. London (Eds.), WMO/TD-No. 149, Davos, Switzerland, 140 p.