

6

Disponibilidad y características de la radiación solar en Sudamérica

Hugo Grossi Gallegos

Grupo de Estudios de la Radiación Solar, Universidad Nacional de Luján, Rutas 5 y 7, (6700) Luján, Provincia de Buenos Aires, Argentina. Correo electrónico: grossi@mail.unlu.edu.ar; Red Solarimétrica, Servicio Meteorológico Nacional, Avenida Mitre 3100, (1663) San Miguel, Provincia de Buenos Aires, Argentina. Correo electrónico: postmast@grossi.cyt.edu.ar.

1. Introducción

La energía solar mantiene a la gran mayoría de los organismos vivos conocidos, proveyendo todo el calor y la luz que nuestro planeta recibe. Así, ha sido y sigue siendo el principal factor en moldear el curso de la evolución en la Tierra.

El Sol es una estrella, la más cercana al planeta Tierra; la que le sigue en proximidad dista algo más de 4 años luz (Alfa, de la constelación del Centauro), esto es, aproximadamente 37,8 billones de kilómetros ($37,8 \times 10^{12}$ km). Su edad se estima en unos 5.000 millones de años y es representativa de muchas otras más distantes, pero el hecho de su relativa cercanía permite la observación de algunos detalles que hablan acerca de su constitución.

La capa muy fina de gases que protege a la Tierra (la atmósfera) es muy sensible a la radiación solar y un mejor conocimiento de las características de la energía que ella recibe y de los procesos que sigue al atravesarla significará mejoras en el pronóstico del tiempo, en la química de la alta atmósfera, en la evaluación del recurso solar a nivel del suelo y en la planificación de su aprovechamiento con diferentes fines.

Una propiedad esencial del Sol es su masividad: 2×10^{30} kg (unas 330.000 veces la masa de la Tierra). Bajo la acción de su propio campo gravitacional el plasma solar (un gas altamente ionizado, constituido fundamentalmente por hidrógeno y helio) fue comprimido de tal forma que en su centro la alta densidad y temperatura permitieron que tuvieran lugar reacciones nucleares. Esas reacciones nucleares son la fuente de energía que continuamente es radiada al espacio y que controla la actividad solar.

La energía generada es transferida hacia la superficie por radiación. Fuera del núcleo, la temperatura, la presión y la densidad decrecen rápidamente, como también lo hace la energía media de un fotón. Los fotones son absorbidos y re-emitidos muchas veces a medida que difunden hacia la superficie; de esta manera, la energía que fluye desde el núcleo en forma de rayos γ de alta energía se cambia a rayos X, luego a rayos del extremo-ultravioleta (EUV), después rayos ultravioletas (UV) y finalmente

a luz visible de menor energía, que es más característico de la energía solar radiada libremente al espacio.

El radio del sol es 109 veces el de la Tierra, esto es, $6,96 \times 10^5$ km (diámetro de $1,39 \times 10^6$ km) y se encuentra ubicado a una distancia media de la Tierra de $1,496 \times 10^8$ km (se habla de distancia media pues la misma varía a lo largo del año).

Una imagen que permite apreciar estas dimensiones es la siguiente: si la Tierra tuviera el tamaño de una cabeza de alfiler (1,3 mm), el Sol sería una esfera de unos 14 centímetros de diámetro ubicada a aproximadamente 15 metros de distancia.

La radiación que atraviesa la superficie del Sol tiene una potencia de alrededor de 60 MW/m^2 (megawatts sobre metro cuadrado), llegando al tope de la atmósfera terrestre sólo algo más de $1,3 \text{ kW/m}^2$; este valor es conocido como *constante solar* I_{cs} y se la define como la energía proveniente del Sol que, por unidad de tiempo, es recibida en la unidad de área por una superficie perpendicular a la radiación ubicada en el espacio a la distancia media Sol-Tierra, y cuyo valor aceptado (O.M.M., 1982) es $I_{cs} = (1367 \pm 7) \text{ W/m}^2$.

Luego de pasar por la atmósfera terrestre, donde es parcialmente absorbida y redistribuida, la radiación solar alcanza la superficie de la Tierra con valores máximos que raramente superan 1 kW/m^2 en días despejados. Esta energía corresponde a radiación cuya longitud de onda va desde 10^{-13} m hasta 10 m, pero el 98 % de ella se concentra en el intervalo entre $0,3 \mu\text{m}$ y $4,0 \mu\text{m}$, límites que casi coinciden con los de una de las «ventanas» de la atmósfera.

El valor máximo se encuentra alrededor de los $0,48 \mu\text{m}$. A la radiación de esta zona, proveniente del espectro solar, se la llama en general radiación de *onda corta*, en contraste con la radiación de *onda larga*, que se produce en el suelo o en la atmósfera, en el rango de 5 a $100 \mu\text{m}$.

2. Interacción de la radiación solar con atmósfera terrestre

La atmósfera terrestre actúa como una gran cúpula protectora que evita, durante el día, que incida sobre el suelo determinado rango de la radiación solar que perjudicaría a los seres vivos y, durante la noche, la pérdida excesiva de calor.

A medida que los sistemas biológicos fueron evolucionando se pasó de una atmósfera de química anaeróbica a una aeróbica. Una vez que se formó una cantidad suficiente de oxígeno gaseoso, la interacción del mismo con la radiación solar ultravioleta dio lugar a la aparición del ozono (ver Capítulo 7). Este gas filtra un pequeño rango de longitudes de onda por lo que, llegado a un estado estacionario de la cantidad de ozono incorporado a la atmósfera, continuaron evolucionando en la biosfera los organismos no compatibles con las longitudes de onda filtradas.

Como se verá en más detalle en el Capítulo 7, la radiación solar que llega a la superficie de la Tierra está atenuada en su intensidad por diversos procesos que se producen a lo largo de su recorrido a través de la atmósfera. Estos procesos son:

- 1) absorción selectiva por los gases y por el vapor de agua;
- 2) dispersión molecular (o de Rayleigh) por los mismos componentes;
- 3) dispersión por aerosoles (o de Mie) y absorción por los mismos.

Éstos modifican las características de la radiación incidente: una parte de la misma, procedente del Sol y de la zona circumsolar ($\approx 3^\circ$) mantiene la dirección y se

conoce como *radiación directa*; la dispersada por el aire y las nubes pierde la dirección definida y llega al suelo desde todo el hemisferio superior, denominándose la *radiación difusa*. Si se agrega a esta última la dispersada por la superficie terrestre y la directa se obtiene el parámetro de interés energético que se mide sobre un plano: la *radiación global* (a veces conocida también como total o hemisférica).

3. Medición de la radiación global en la superficie terrestre

Los equipos instalados inicialmente con el fin de evaluar de alguna manera la radiación solar global fueron en general *heliógrafos* de Campbell-Stokes (destinados a medir las horas diarias de insolación o de brillo de sol, también conocida como *heliofanía efectiva*), *piranógrafos* bimetálicos del tipo de Robitzsch o *piranómetros* esféricos de Bellani (también llamados *lucímetros a destilación*) a fin de registrar la radiación global incidente a diario (o semanalmente) sobre un plano horizontal.

Históricamente, dentro del campo de la Meteorología, se le dio relativamente poca importancia a la precisión de las mediciones de la radiación solar, las que resultaban así afectadas por errores importantes y variables a través del tiempo por el indebido mantenimiento que se prestaba al instrumental, porque el disponible hace más de tres décadas no permitía una muy buena calidad de la información y por los errores introducidos en el procesamiento de los registros de papel utilizados.

Las primeras mediciones solarimétricas en esta región americana las inició en México el Dr. Ladislao Gorczyński en el año 1911, continuándolas hasta el año 1917; un segundo período de mediciones lo realizó el personal del Servicio Meteorológico Mexicano (SMM) bajo la dirección del mismo investigador desde 1923 hasta 1928.

El interés por el conocimiento de la radiación solar recibida a nivel de tierra y de su variación espacial y temporal en los países del Cono Sur americano motivó que, a partir de las primeras estaciones destinadas a medir la constante solar (en 1920 en el Cerro Moctezuma, Calama, Chile, y en 1923 en La Quiaca, Jujuy, Argentina), se planificara la instalación de equipos de medición distribuidos en las redes meteorológicas de cada país.

Además de los problemas referidos a los sensores en sí, el registro en bandas de papel traía aparejado un requerimiento elevado de horas-hombre y en el procesamiento de esta información se introducían nuevos errores que aumentaban la incerteza en el conocimiento del recurso (hoy en día se podría disminuir los mismos digitalizándolos).

En el año 1957, con motivo del Año Geofísico Internacional (IGY), en varios países de la región se mejora calidad de la medición de la irradiación global mediante la instalación de algunas estaciones equipadas con *piranómetros termoeléctricos*.

Pero las necesidades de los interesados en el aprovechamiento de la energía solar no siempre coincidieron con las de los meteorólogos sencillamente porque los objetivos son distintos, fijando a través del tiempo distintas exigencias con respecto a la precisión buscada en la medición. Es fundamental en este momento, si uno persigue como objetivo que los aprovechamientos de esta fuente de energía sean competitivos, mejorar la precisión para reducir la incerteza en el conocimiento de la disponibilidad de la energía solar, optimizando así el diseño de los sistemas de captación y acumulación.

Es por eso que existe dentro de la comunidad científica un grupo de investigadores que trata de atender a las necesidades de los profesionales ligados a la Ingeniería,

Arquitectura, Agronomía y Silvicultura que, formando parte o no de los Servicios Meteorológicos Nacionales, se mueven en ambientes distintos a los de los meteorólogos «clásicos», en espacios más ligados a la *Energía* que al *Clima*.

4. Primeras cartas para Sudamérica

En 1956 apareció el conocido trabajo de Black [1] sobre la distribución de la radiación solar sobre la superficie terrestre, basado en su mayor parte en datos estimados a partir de correlaciones establecidas entre el índice de nubosidad y la radiación global: 12 cartas mundiales que, si bien cubren el área objeto de este estudio, no utilizan datos de estaciones sudamericanas. En 1958, Burdecki llevó a cabo una comparación entre estos resultados y los datos del Observatorio de Voeikov [2]. En 1961, Landsberg publicó una revisión que tuvo en cuenta nuevas mediciones llevadas a cabo durante el Año Geofísico Internacional, en ese trabajo presentó un mapa de la distribución anual de la radiación global en intervalos de 20 kcal/cm²-año, al que comparó con los trabajos anteriores (1 kcal/cm² equivale a 41,86 MJ/m² o 11,63 kWh/m²) [3].

Cinco años más tarde se publicó el trabajo de Löff y col. (1966) [4] en el que se presentaron 4 mapas mundiales de la distribución de la radiación total diaria incidente sobre una superficie horizontal, elaborados a partir de datos medidos de radiación o de horas de insolación (heliofanía) en diferentes localidades. Para el trazado de las líneas de igual valor se tuvieron en cuenta el peso estadístico de los promedios, la clasificación climática y la vegetación.

La resolución espacial de estos trabajos no era muy grande pero permitió una primera estimación de las condiciones que presentaba la región para el aprovechamiento de esta fuente de energía.

En el año 1981 la Organización Meteorológica Mundial (OMM) reprodujo 3 mapas elaborados por la *Météorologie National de France* [5] y publicó 12 mapas con la distribución de la radiación solar global, expresada como fracción de la teórica a tope de atmósfera, basados en datos obtenidos desde satélites [6], mapas que incluían a esta zona de interés.

La Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) [7] preparó un juego de cartas mensuales para América del Sur y el Caribe, estimando la irradiación a partir de una correlación del tipo de Ångström-Prescott, utilizando solamente un par de constantes para todo el territorio, lo que la hizo muy vulnerable a la crítica.

Al año siguiente Grossi Gallegos y col. [8] presentaron un trabajo sobre la distribución del promedio anual de energía solar diaria en la región meridional de América del Sur, publicando en 1987 otro que incorporaba dos cartas con la distribución espacial del promedio mensual de la radiación global diaria incidente sobre un plano horizontal para los meses de enero y julio. Grossi Gallegos y col. [9] tuvieron en cuenta para ello la información previa del Brasil y la actualizada de la red piranométrica de su Instituto Nacional de Meteorología-INMET, la disponible en Chile (proveniente de piranógrafos) y se vieron obligados a elaborar evaluaciones preliminares para Paraguay y Bolivia, basándose para ello en correlaciones establecidas con las horas de insolación.

Finalmente, Grossi Gallegos y col. [10] 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 insolación de 117 heliógrafos, con la información indicativa de 28 piranógrafos chilenos y con las estimaciones satelitales del GOES previamente validadas [11, 12].

5. Carta integral sudamericana de la irradiación solar global media

5.1. Evaluación en base al tratamiento de mediciones terrestres

Como consecuencia de la información disponible hasta ese momento en América del Sur, Grossi Gallegos [13] trató de compatibilizarla en una carta anual, encontrándose con extensas zonas en el centro del territorio en las que no se dispone de ninguna información confiable y otras en la que la misma es incompatible con otros registros.

Podría esperarse que la distribución estadística de las diferencias entre los promedios anuales siguiera una función gaussiana, con una dispersión $[(\sigma_i^2 + \sigma_j^2)/365]^{1/2}$, en donde σ_i es considerada como la incerteza en la medición del valor diario de la radiación en cada estación. Aceptando que dichas incertezas fueran del mismo orden en todas las estaciones que tienen equipo similar, los promedios anuales considerados se distribuirían alrededor del valor medio con un desvío estándar de $(2/365)^{1/2}\sigma$ (suponiendo que no hubiera variación secular en los promedios); esto daría por resultado una incerteza de $\sim 0,15\%$ para sensores de primera clase y de $\sim 0,37\%$ para los de segunda.

Pero el corrimiento de $\sim 2\%$ aceptado en la estabilidad de los sensores termoelectricos de primera clase obliga a una incerteza mayor; y si se tiene en cuenta además la introducida en la calibración de laboratorio o de campo (estimada del orden de $\sim 1,5\%$) se llega a que la incerteza instrumental asociada a la comparación de los promedios anuales medidos con piranómetros de primera clase no puede ser menor al $\sim 2,8\%$.

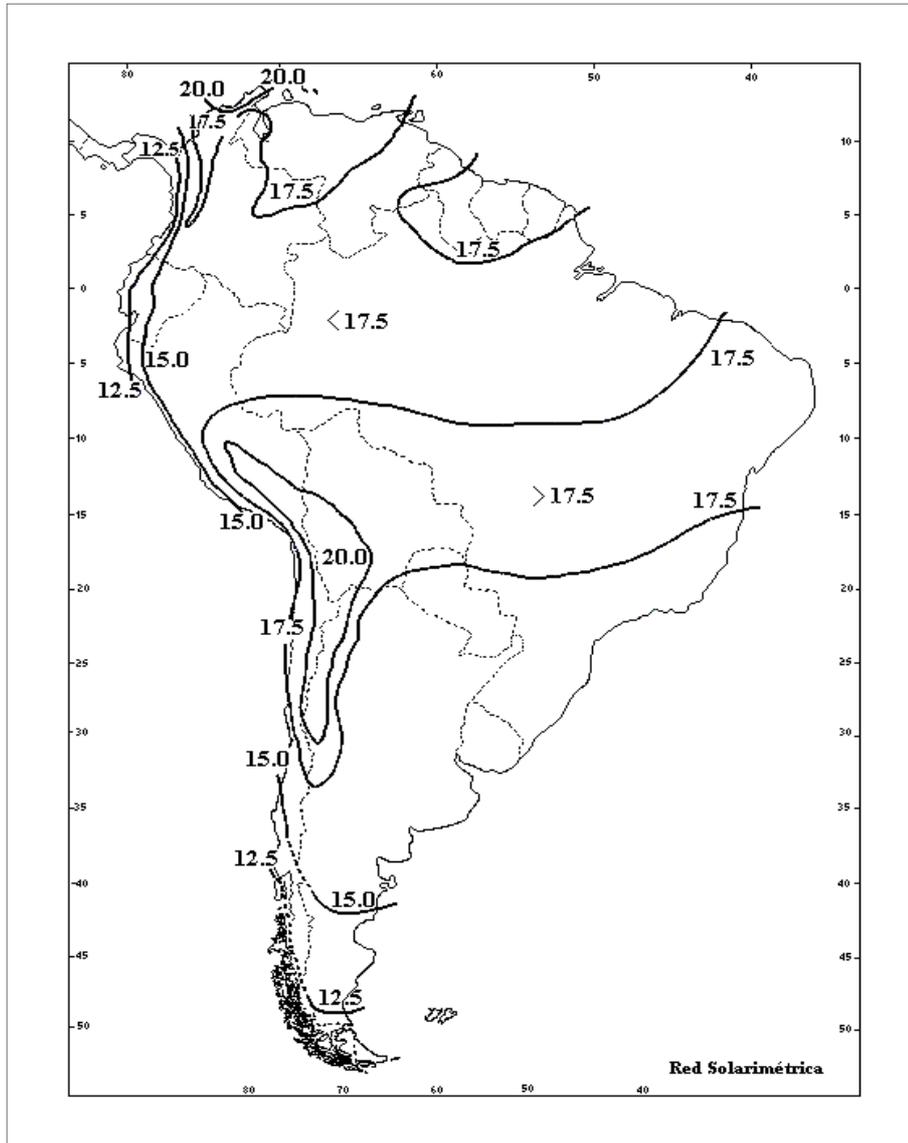
La mayoría de los sensores termoelectricos utilizados en las redes latinoamericanas son de segunda o tercera clase, por lo que la incerteza es consecuentemente mayor a la analizada (dando por supuesta la contrastación periódica de los mismos, lo cual no siempre se cumple). Las extrapolaciones de valores mensuales medidos están afectadas por incertezas del 10% si se las extiende en regiones homogéneas hasta distancias del orden de los 200 km del lugar de medición (con un nivel de confianza del 90%) y las estimaciones determinadas en base a correlaciones del tipo de la de Ångström están afectadas por incertezas no menores al 10%.

El resultado final, presentado en la figura, puede considerarse como un producto superior a la carta de 1986 (ya que cubre todo el subcontinente e incluye todas las mediciones piranométricas disponibles), pero que abre a su vez un largo camino por recorrer de manera conjunta. El espaciamiento entre isóneas es el propuesto por la OMM ($2,5 \text{ MJ/m}^2 \text{ día}$) y resulta 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).

Los valores máximos se alcanzan en el Altiplano compartido por Argentina, Bolivia, Chile y Perú, habiéndose registrado en el año 1989 un promedio diario de 22,5

MJ/m² en Patacamaya, Bolivia; se observan también valores elevados en la árida Guajira colombiana.

Figura 1. Distribución del promedio anual de la irradiación solar global diaria sobre un plano horizontal en América del Sur (MJ/m² día) basada en determinaciones de superficie.



Los valores mínimos se dan en los faldeos occidentales de los Andes en Chile, por un lado, y en Ecuador y Colombia, por el otro. Esto se debe a la elevadísima nubosidad que produce en ambas regiones precipitaciones anuales entre 4.000 y 6.000 mm. Debido a la falta de información, la resolución espacial del presente trabajo impide reflejar la presencia de microclimas propios de los valles longitudinales y transversales de toda la región andina del continente; lo mismo vale para la región amazónica.

5.2. Evaluación a partir del tratamiento de estimaciones satelitales

En la década de 1970 se hicieron varios intentos de efectuar estimaciones de la radiación solar a nivel del suelo a partir de los datos obtenidos por radiómetros embarcados en satélites en órbitas polares y geostacionarios ecuatoriales. Estos últimos son los que han dado mejores resultados, en particular por realizar mediciones cada media hora.

Para lograr este objetivo se han seguido fundamentalmente tres líneas: una, que estima la radiación solar utilizando métodos puramente estadísticos tomando información medida en el suelo, una segunda que agrega algún componente físico, como lo hizo por ejemplo Tarpley [14] y una tercera, que trata de estimar la radiación solar a través de modelos físicos a partir del cálculo de la transmitancia atmosférica, que fue la forma en que lo encararon, entre otros, Gautier y col. [15]. Excelente información al respecto se puede encontrar en los trabajos de Noia y col. [16, 17].

Uno de los modelos que debe mencionarse es el desarrollado por Pinker y Laszlo [18] basado en un análisis detallado de la interacción del espectro radiativo solar con los componentes atmosféricos, utilizado para generar una base de datos de baja resolución ($2.5^\circ \times 2.5^\circ$), puesta por la NASA a libre disposición durante algún tiempo en Internet en la base conocida como Surface Solar Energy (SSE) Data Set, Versión 1.0. Se comparó en Argentina el ajuste para algunas localidades que tenían mediciones contemporáneas hechas a nivel del suelo obteniéndose para promedios mensuales sobre casi cuatro años desvíos medios que van de 3.8 a 24.5%, dependiendo de la orografía del lugar [13]. Los interesados pueden consultar los resultados en <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>; los promedios ofrecidos se basan en sólo 10 años y su representatividad climatológica es objetable, mientras que la incerteza de los resultados publicados va de 13 a 16%, de acuerdo con lo evaluado por sus responsables.

En este tipo de procedimiento se hace necesario una calibración del albedo de la superficie, el cual varía no sólo estacionalmente sino también con el cambio del tipo de utilización del suelo; por lo tanto, la calibración mencionada tiene que ser reverificada continuamente, como así también la del sensor embarcado que, en el caso del GOES-8, ha mostrado una rápida degradación.

Conclusión

En la introducción de su trabajo pionero en el tema, Landsberg comentaba en 1961 que «la explotación de la radiación solar en la superficie de la tierra ha llegado a ser más que un sueño utópico. Los diseños para transformar esta energía en formas utilizables están aumentando en número y eficiencia. Extrañamente, no se obtiene fácilmente información acerca de la energía incidente de esta fuente. El costo de los equipos para registrar la intensidad de la radiación solar y el experto cuidado necesario para este equipamiento ha demorado el progreso en este campo por muchos años» [3]. Si bien las cosas no han cambiado tanto en las regiones de Sudamérica en las que se ubican las poblaciones que más necesitan del recurso solar para mejorar su calidad de vida, podríamos considerar que la incerteza actual en el conocimiento del recurso permite un primer dimensionamiento razonable de los sistemas de aprovechamiento de esta fuente energética pues prácticamente todos los países de la región han elaborado cartas con la distribución del recurso en base a mediciones o a estimaciones basadas en otras variables meteorológicas.

Por otro lado, la explotación de una red solarimétrica integrada por instrumental de calidad controlada permite establecer relaciones locales entre los valores de la irradiación global y los de las horas de insolación, correlaciones que hacen posible rehabilitar series históricas de promedios mensuales de heliofanía, a la par de servir de ajuste a los modelos satelitales («verdad terrestre»). Teniendo en cuenta los promedios de irradiación solar global (tanto medidos como estimados), los valores de calidad comparable de países vecinos y los estudios satelitales, es posible pensar entonces en el trazado de nuevas cartas regionales con la distribución espacial de esta fuente alternativa de energía y en el estudio de las características de la variabilidad de la misma. Un conocimiento adecuado de los promedios permite también acceder a técnicas de construcción de series temporales sintéticas con las mismas características de las reales y que pueden facilitar los ensayos simulados de funcionamiento de diferentes sistemas.

Referencias

- [1] J.N. Black, The Distribution of Solar Radiation Over the Earth's Surface, *Arch. Met. Geophys. Biokl.*, B.Bd 7, H.2., 165-189, (1956).
- [2] F. Burdecki, Remarks on the Distribution of Solar Radiation Over the Surface of the Earth, *Arch. Met. Geophys. Biokl.*, B.Bd 8, 326-335, (1958).
- [3] H. Landsberg, Solar Radiation over the Earth's Surface, *Solar Energy*, V (3), 95-98, (1961).
- [4] G. Löf, J. Duffie y C. Smith, World Distribution of Solar Radiation, *Solar Energy*, 10 (1), 27-37, (1966).
- [5] World Meteorological Organization, *Meteorological aspects of the utilization of solar radiation as an energy source*, Technical Note No. 172, WMO-No. 557, 59-81, Geneva, Switzerland, (1981).
- [6] World Meteorological Organization, *Meteorological aspects of the utilization of solar radiation as an energy source*, Technical Note No. 172, WMO-No. 557, Anexo, Geneva, Switzerland, (1981).
- [7] OLADE, *Solarimetría y evaluación energética*, Serie Documentos D-PLACE N° 9, vol. I y II, Quito, Ecuador, (1983).
- [8] H. Grossi Gallegos, R. Lopardo, G. Atienza, M. García y M. Peralta, Distribución de la energía solar en la región meridional de América del Sur, en *Memoria Técnica del 5° Congreso Latinoamericano de Energía Solar*, Valparaíso, Chile, I, 1-11 (1986).
- [9] H. Grossi Gallegos, R. Lopardo, G. Atienza, M. García y M. Peralta, Distribución espacio-temporal del promedio mensual de la radiación solar global diaria en la región meridional de América del Sur, en *Proc. del III Congreso Ibérico-I Congreso Iberoamericano de Energía Solar*, Madrid, España, I, 110-117, (1987).
- [10] H. Grossi Gallegos, G. Atienza y M. García, Cartas de radiación solar global para la región meridional de América del Sur, en *Anales del II Congreso Interamericano de Meteorología*, Buenos Aires, Argentina, 16.3.1-16.3.10, (1987).
- [11] L.A. Frulla, D.A. Gagliardini, H. Grossi Gallegos, R. Lopardo y J.D. Tarpley, Incident solar radiation on Argentina from the geostationary satellite GOES: comparison with ground measurements, *Solar Energy*, 1, 61-69, (1989a).
- [12] L. Frulla, H. Grossi Gallegos, D. Gagliardini y G. Atienza, Analysis of satellite measured insolation in Brazil, *Solar & Wind Technology*, 7 No. 5, 501-509, (1990).
- [13] H. Grossi Gallegos, 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, (1999).
- [14] J.D. Tarpley, Estimating incident solar radiation at the surface from geostationary satellite data, *J. Appl. Meteor.*, 18, 1172-1181, (1979).
- [15] C. Gautier, G. Diak y S. Masse, A simple physical model to estimate incident solar radiation at the surface from GOES satellite data, *J. Appl. Meteor.*, 19, 1005-1012, (1980).
- [16] M. Noia, C.F. Ratto y R. Festa, Solar irradiance estimation from geostationary satellite data: I. Statistical models, *Solar Energy*, 51, 6, 449-456, (1993).
- [17] M. Noia, C.F. Ratto y R. Festa, Solar irradiance estimation from geostationary satellite data: II. Physical models, *Solar Energy*, 51, 6, 457-465, (1993).
- [18] T. Pinker y L. Laszlo, Modelling Surface Solar Irradiation for Satellite Applications on a Global Scale, *J. Applied. Meteor.*, 31, 194-211, (1992).