

## **EMPLEO DE IMÁGENES SATELITALES GOES 8 EN EL CÁLCULO DE LA IRRADIACIÓN SOLAR GLOBAL EN DISTINTAS ZONAS DE ARGENTINA.**

Raúl Righini

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:** El mantenimiento de una red de medición de la radiación solar en un país tan extenso como Argentina es muy dificultoso. Es ésta la razón por la cual grandes áreas del mismo carecen de información confiable sobre la intensidad de la irradiación solar. Revertir la situación en el corto plazo es muy difícil. Es posible, sin embargo, emplear información satelital para estimar la irradiación solar incidente a nivel de superficie. En el presente artículo se emplea el modelo de Tarpley para tal fin en cinco localidades de Argentina, empleando imágenes del GOES 8. Las constantes de ajuste del modelo son calculadas usando datos piranométricos de tierra. El error cuadrático medio de los datos calculados, comparados con datos de tierra, se encuentra entre el 13 y el 24% para valores diarios, mientras que baja a menos del 1% para valores medios mensuales.

**Palabras Clave:** irradiación solar, GOES 8, satélite, Argentina.

### **INTRODUCCIÓN**

La medición de irradiación solar global en Argentina tiene una larga historia. El proceso comenzado a fines del siglo XIX con la instalación de heliógrafos en diversas zonas del país llegó a su culminación en el año 1983 con la operación por parte de la Red Solarimétrica Argentina de 41 estaciones de medición de la radiación solar. El objetivo de dicha red era evaluar el nivel de irradiación solar con vistas a su aprovechamiento como recurso energético. Durante algún tiempo hubo un flujo regular de información proveniente de dicha red, y como consecuencia de la información recolectada se elaboraron las primeras cartas de irradiación para Argentina (Grossi Gallegos, 1998). Desafortunadamente problemas de financiamiento, entre otros factores, determinaron que en la actualidad solamente funcionen 4 estaciones de aquella extensa red que cubría gran parte del territorio nacional. De esta manera la cobertura actual resulta inadecuada para evaluar los niveles de irradiación en un área tan extensa como la de Argentina. Y si bien es cierto que la intensidad de la radiación solar es medida por distintas estaciones privadas, o pertenecientes a algunos organismos públicos, es necesario admitir que el equipamiento existente no es uniforme, que los equipos la mayoría de las veces no son calibrados en tiempo y forma necesario, que la información no es procesada regularmente ni está centralizada, siendo asistemática en muchas ocasiones la toma de datos.

También debe tenerse en cuenta que las estaciones de medición se encuentran situadas la mayoría de las veces en las vecindades de núcleos de apreciable densidad poblacional, careciéndose de datos correspondientes a zonas aisladas. Es así que queda de manifiesto la magnitud del problema: se mide poco, sin coordinación, de manera no sistemática, y no se los hace en los lugares en los cuales la necesidad del empleo de energías alternativas es indispensable para impulsar el desarrollo y romper el aislamiento.

Este panorama parece difícilmente reversible en el mediano plazo. El mantenimiento de redes extensas, el procesamiento de datos, y la calibración regular de decenas de equipos, no es factible de lograrse en corto tiempo, aún contando con el financiamiento necesario para hacerlo.

Por otro lado, la necesidad creciente de contar con datos de energía solar para el desarrollo de múltiples actividades (secado solar, generación eléctrica, evaluación de agua disponible en suelo, estimación del rendimiento de cosechas, calentamiento de agua, etc.) es una realidad innegable.

Existen alternativas para lograr obtener la información buscada empleando pequeñas redes de medición e imágenes satelitales. Con ese objetivo se han desarrollado algoritmos diversos para evaluar la irradiación solar incidente a nivel de la superficie terrestre. Los métodos utilizados pueden separarse a grandes rasgos en dos: Físicos y Estadísticos.

Mientras que los métodos físicos modelan la interacción de la radiación solar con la atmósfera, introduciendo parámetros asociados con la absorción, reflexión y scattering, los modelos estadísticos evalúan la radiación solar en función del brillo del píxel de la imagen satelital, ajustando las constantes del modelo en base a datos obtenidos de mediciones en tierra.

Los modelos físicos en general necesitan de datos referentes a las condiciones atmosféricas (agua precipitable, ozono, tamaño de aerosoles, etc). Esto no ocurre con los modelos estadísticos que, en cambio, requieren un ajuste con las mediciones realizadas en superficie.

Un conocido modelo estadístico es el modelo de Tarpley (1979). Dicho modelo evalúa la irradiación solar en la superficie terrestre empleando imágenes obtenidas por sensores que operan en la banda visible del espectro electromagnético. Este modelo necesita de varias imágenes diarias para estimar la irradiación diaria, por lo que se emplean imágenes brindadas por un satélite geoestacionario.

El satélite geoestacionario GOES 8 brinda imágenes del continente americano que llegan en el sur hasta Tierra del Fuego. Su frecuencia de muestreo es de aproximadamente 30 minutos, y la resolución espacial es de 1 km en el nadir del satélite. Estas características lo hacen especialmente apropiado para evaluar el recurso solar en superficies tan extensas como la que presenta Argentina, empleando un modelo estadístico como el de Tarpley.

## ANTECEDENTES

El empleo de algoritmos de procesamiento de imágenes satelitales para evaluar el recurso solar lleva más de treinta años. Una revisión crítica de estos métodos puede encontrarse en Noia et al (1993).

En particular ha habido varios investigadores que han desarrollado algoritmos empleando satélites geoestacionarios. Entre otros podemos citar a Gautier et al (1980), Moser (1984) y al propio Tarpley (1979). Tarpley, usando observaciones horarias del satélite GOES y 8700 piranómetros, desarrolló su método para las Grandes Praderas de los Estados Unidos.

El algoritmo empleado en esa ocasión fue modificado por Justus y Tarpley (1984). Empleándolo, elaboraron un Atlas de insolación basado en imágenes satelitales para los Estados Unidos, México y Sud América. En fecha posterior Frulla et al (1988) compararon los datos obtenidos por la aplicación del algoritmo con datos de estaciones piranométricas del país. El modelo aplicado por Tarpley empleaba los coeficientes de ajuste obtenidos para las Grandes Praderas Norteamericanas. En esa ocasión se encontraron errores del orden del 25 % para valores diarios. Los errores se situaban entre el 15 y el 20% cuando se trabajaba con valores medios mensuales.

## MATERIALES Y MÉTODO

El modelo de Tarpley calcula la irradiación solar horaria (HG) emplea la relación :

$$1) \quad HG = F_0 \left( \frac{r_0}{r} \right)^2 \cos \theta \cdot [a + b \cdot \cos \theta + c \cdot \cos^2 \theta] + d \cdot (B_m^2 - B_0^2)$$

donde

$F_0$  es el valor total horario para la constante solar;

$B_m$  es el brillo del píxel

$B_0$  es el brillo despejado.

$\theta$  es el ángulo cenital solar.

$\left( \frac{r}{r_0} \right)^2$  es el factor estacional de corrección para la radiación extraterrestre.

a, b, c y d son las constantes de ajuste del modelo.

El brillo despejado  $B_0$ , es el brillo de un determinado píxel, observado durante un tiempo predeterminado. Se pretende evaluarlo para determinar la respuesta del suelo en el espectro visible. Su objetivo es quedarse con el valor menor de brillo del suelo. Cualquier valor mayor medido indica la presencia de nubosidad que disminuye la radiación solar a nivel de superficie. Es por ello que el coeficiente d es siempre negativo.

Para evaluar  $B_0$  se asume que, para un momento particular del día y para cada área blanco, el brillo bajo condiciones de cielo despejado  $B'_0$  y el correspondiente brillo promedio del blanco observado  $B_m$  son conocidos. Dos valores umbrales  $B_{\min}$  y  $B_{\max}$  son predeterminados, indicando la probable presencia de nubes en el momento de la observación ( $B_m > B_{\max}$ ) o una escena insuficientemente iluminada para estimaciones de insolación ( $B_m < B_{\min}$ ).

Se determina un nuevo valor de brillo despejado por las relaciones

$$\begin{array}{ll} B_0 = B'_0 & \text{si } B_m \geq B_{\max} \\ B_0 = w_1 \cdot B'_0 + (1 - w_1) \cdot B_m & \text{si } B'_0 < B_m < B_{\max} \\ B_0 = B_m & \text{si } B'_0 - 2 < B_m \leq B'_0 \\ B_0 = w_2 \cdot B'_0 + (1 - w_2) \cdot B_m & \text{si } B_{\min} < B_m < B'_0 - 2 \\ B_0 = B'_0 & \text{si } B_m < B_{\min} \end{array}$$

en donde los pesos  $w_1$  y  $w_2$  pueden ser valuados entre 0 y 1, y  $B_{\min}$  y  $B_{\max}$  han sido definidos por los valores predeterminados de umbral. Los valores de  $w_1$  y  $w_2$ , empíricamente determinados por Justus, y Tarpley (Justus y Tarpley, 1984), son 0,99 y 0,90 respectivamente.

En el presente trabajo se tomaron imágenes satelitales GOES 8, en su canal visible, para los meses de mayo de 2000 y enero de 2001. Las estaciones de medición consideradas para calcular las constantes de ajuste fueron Cerro Azul, Paraná, Córdoba, San Miguel y Luján (figura 1). Todas ellas contaban con piranómetros que integraban diariamente los valores de radiación solar recibidos. La estación de Luján no cuenta con datos de mayo de 2000, por lo que no fue considerada para los cálculos correspondientes a ese mes.

Se evaluó  $B_0$  para cada píxel, para 23 días de enero y 24 de mayo. La evaluación se hizo en cada uno de los horarios en los que el GOES brinda imágenes de Argentina. Se obtuvieron así matrices de  $B_0$  para cada horario.

Calculando a través de la expresión (1) la irradiación solar a nivel de superficie, se obtuvieron valores para cada píxel de la imagen GOES. Se obtuvo así una matriz con los valores de irradiación solar estimada por el algoritmo para cada píxel de la imagen. Seguidamente sobre la matriz de valores de irradiación se procedió a promediar los mismos. A cada píxel se le asignó el promedio de valores de la submatriz de 5x5 píxeles que lo tiene por centro. Este promedio es efectuado para considerar variaciones temporales debido a la dinámica de los procesos atmosféricos. De esta manera el promedio espacial evalúa un promedio temporal que tiene en cuenta, entre otros factores, las variaciones de nubosidad debido al viento los días parcialmente nublados.

Los valores dados por el modelo permitieron calcular la integral diaria (como un trapezoide) a lo largo del día. Para realizar todo el cálculo se partió de los valores de las constantes empleados por Justus y Tarpley para Estados Unidos. Una vez obtenidos los valores calculados, se procedió a comparar los resultados de las integrales diarias con los valores medidos para cada una de las localidades en las que se tenían datos calculándose la desviación cuadrática diaria entre ambos valores. La suma de las desviaciones diarias en cada localidad es una estimación del error cometido por el método.

Las constantes fueron luego recalculadas minimizando los valores de los errores cometidos para cada localidad, obteniéndose valores óptimos.

Los valores obtenidos para estas constantes fueron muy diferentes a los presentados por Justus y Tarpley en sus trabajos. De cualquier manera el procedimiento es análogo al realizado por él, y los resultados conseguidos muestran un buen ajuste con los valores medidos.

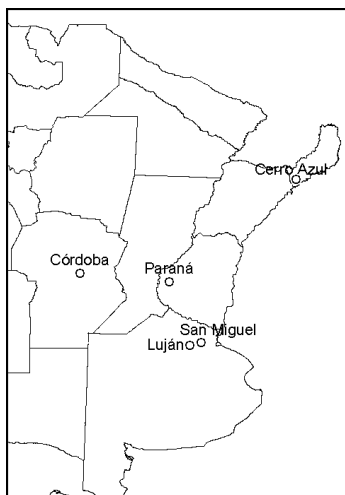


Figura. 1. Estaciones de medición empleadas para determinar los parámetros del modelo de Tarpley.

## RESULTADOS

Seguidamente se muestran los resultados obtenidos considerando datos diarios para todas las estaciones analizadas durante mayo de 2000 y enero de 2001. Se muestran los gráficos de correlación entre las mediciones efectuadas en tierra y las estimaciones a través del modelo de Tarpley para los meses de enero y mayo, tanto para los datos diarios (figuras 2 y 4) como para las medias mensuales (figuras 3 y 5).

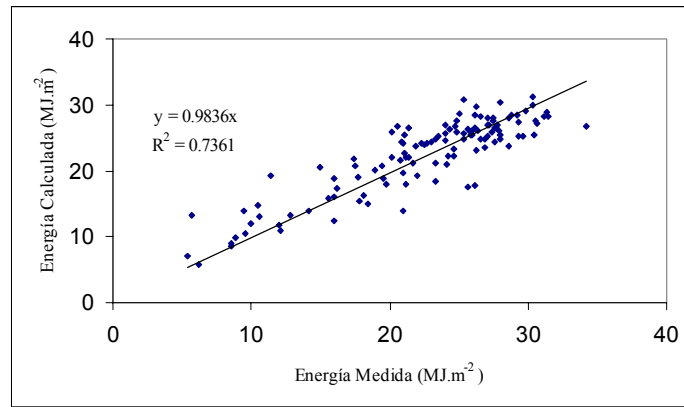


Figura 2. Valores diarios de irradiación medidos versus valores calculados empleando el modelo de Tarpley para el mes de enero de 2001. Datos de todas las estaciones.

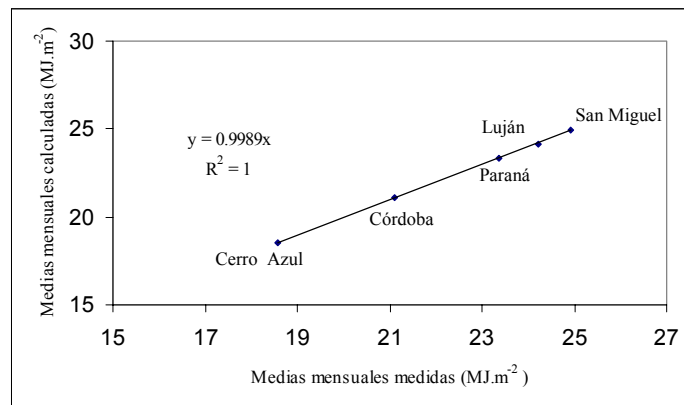


Figura 3. Valores medios mensuales de irradiación medidos versus valores calculados empleando el modelo de Tarpley para el mes de enero de 2001. Datos de todas las estaciones.

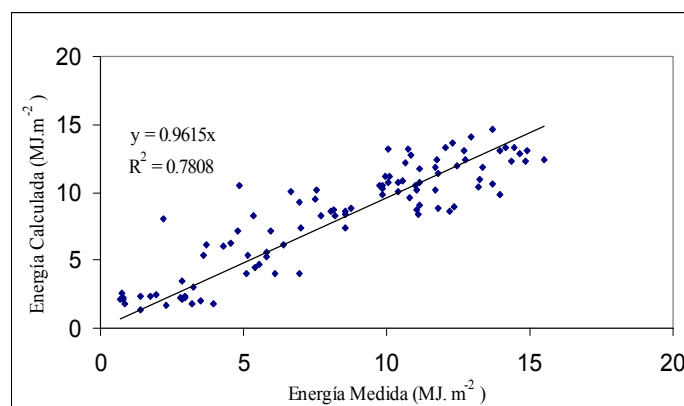


Figura 4. Valores diarios de irradiación medidos versus valores calculados empleando el modelo de Tarpley para el mes de mayo de 2000. Datos de todas las estaciones.

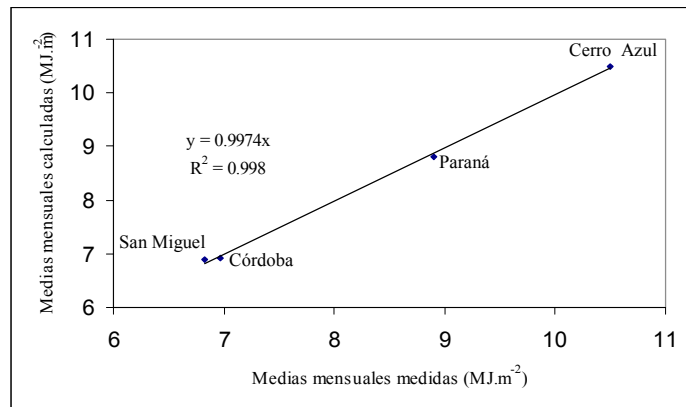


Figura 5. Valores medios mensuales de irradiación medidos versus valores calculados empleando el modelo de Tarpley para el mes de mayo de 2000. Datos de cuatro las estaciones.

En la tabla 1 se muestran los errores cometidos para las estimaciones diarias y medias mensuales durante los meses de enero y mayo de todas las estaciones. En la tabla 2, se muestran a modo de ejemplo los errores calculados para las estimaciones diarias de dos estaciones durante los meses de enero y mayo. En ambas tablas, los errores son calculados como:

Error medio porcentual = Promedio  $(100 * (X_{calculada} - X_{medida}) / X_{medida})$

$$\text{Error cuadrático medio porcentual} = 100 * \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_{calculado_i} - X_{medido_i})^2}{N} / \frac{\sum_{i=1}^N X_{medido_i}}{N}}$$

Errores	Enero de 2001	Mayo de 2000
Error medio porcentual. Datos diarios.	2,65	9,11
Error cuadrático medio porcentual. Datos diarios.	13,28	23,87
Error medio porcentual. Medias mensuales.	0,12	0,21
Error cuadrático medio porcentual. Medias Mensuales	0,13	0,75

Tabla 1. Errores de cálculo que surgen de la aplicación del modelo de Tarpley. Comparación con datos medidos en tierra.

Estación	Errores	Enero de 2001	Mayo de 2000
Córdoba	Error medio porcentual. Datos diarios.	0,91	4,73
Córdoba	Error cuadrático medio porcentual. Datos diarios.	10,36	4,73
Paraná	Error medio porcentual. Datos diarios.	5,06	1,56
Paraná	Error cuadrático medio porcentual. Datos diarios.	14,78	15,12

Tabla 2. Errores de cálculo que surgen de la aplicación del modelo de Tarpley para datos diarios. Datos obtenidos para las estaciones de Córdoba y San Miguel.

## CONCLUSIONES

Los resultados anteriormente presentados muestran la factibilidad de la aplicación del modelo de Tarpley a Argentina. El uso de constantes propias para las zonas analizadas muestra que es posible calcular datos diarios con errores cuadráticos medios

que alcanzan un máximo de 24% para el mes de mayo, valor que baja al 13,28% para enero para valores diarios para todas las estaciones. También son menores los errores medios porcentuales en cálculos diarios. Las medias mensuales calculadas muestran un ajuste mucho mejor (tal como era esperable). En todos los casos, los errores calculados para enero para todas las estaciones son inferiores a los de mayo. Preliminarmente podría argumentarse que la presencia de días con mucha nubosidad en el mes de mayo puede ser una posible explicación de este hecho. Los valores diarios muestran un ajuste comparable al obtenido por Frulla et al (1988), pero el ajuste para las medias mensuales es mejor que el presentado en ese trabajo. Sin embargo se trata de pocos datos. El objetivo en el corto plazo debe ser analizar períodos de tiempo más prolongados, del orden de un año, lo que permitiría tener una perspectiva más amplia del ajuste del método.

Es de destacar que este tipo de metodología permite la estimación de la radiación solar en grandes áreas de nuestro país, con desviaciones apreciables en datos diarios y con un muy buen ajuste en las medias mensuales. Una rutina operativa que tomara datos satelitales y los procesara diariamente, calculando las constantes de ajuste con unas pocas estaciones de medición ubicadas en sitios estratégicamente distribuidos, permitiría rediseñar una red que contara con estaciones solarimétricas de calidad, con un coste de mantenimiento menor al que insumiría una extensa red cuyo objetivo fuese brindar información de toda Argentina. El procesamiento de los datos que esta pequeña red permitiría, brindaría datos confiables de irradiación solar en áreas extensas de toda la República, con un coste sensiblemente inferior al que demandaría el mantenimiento de una red convencional.

## REFERENCIAS

- Frulla, L. A., Gagliardini, D. A., Grossi Gallegos, H., Lopardo, R. and Tarpley, J. D. (1988) Incident solar radiation on Argentina from the geostationary satellite GOES: comparison with ground measurements, *Solar Energy*, **41** (1), 61-69.
- Gautier, C., Diak, G. and Masse, S. (1980) A simple physical model to estimate incident solar radiation at the surface from GOES satellite data. *J. Appl. Meteor.* **19**, 1005-1012.
- 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.
- Justus, C. G. and Tarpley, J. D. (1984). Atlas of satellite-measured insolation in the United States, Mexico and South America. Technical Report. Georgia Institute of Technology. 270 pág.
- Moser, W. and Raschke, E. (1984) Incident solar radiation over Europe estimated from Meteosat data. *J. Climate Appl. Meteor.* **23**, 166-170.
- Noia, M., Ratto C. F. and Festa, R (1993) Solar irradiance estimation from geostationary satellite data: I. Statistical models. *Solar Energy* **51**, 6, 449-456.
- Noia, M., Ratto, C. F. and Festa, R (1993) Solar irradiance estimation from geostationary satellite data: II. Physical models. *Solar Energy* **51**, 6, 457-465.
- Tarpley, J. D. (1979) Estimating incident solar radiation at the surface from geostationary satellite data. *J. Appl. Meteor.* **18**, 1172-1181.

**ABSTRACT:** Maintaining a solar data network in a large country as Argentina is difficult. For this reason, extent areas of the country haven't got information of ground solar energy. It's very difficult to revert this situation in the short time. Is possible to use satellite information for estimating incident solar irradiation on the earth's surface. In these paper, solar irradiation is estimated with Tarpley model in five locations of Argentina employing GOES 8 images. The constants of the model are calculated using ground pyranometers data. The calculated data have a standard error between 13% and 24% for daily values, and lower than 1% for monthly mean values.

**KEY WORDS:** solar irradiance, GOES 8, satellite, Argentina