

## ESTIMACIÓN DE VALORES HORARIOS DE RADIACIÓN DIRECTA MEDIANTE UNA MODIFICACIÓN DEL MODELO HELIOSAT

M.A. Rubio (\*), G.Lopez (\*\*), Tovar, J. (\*\*\*) , F.J.  
Batlles (\*)

[mrubio@ualm.es](mailto:mrubio@ualm.es)

(\*) Dpto. Física Aplicada, Universidad de Almería.

04120, Almería

(\*\*) Dpto. de Física Aplicada e Ingeniería Eléctrica,  
Universidad de Huelva, 21819, Huelva.

(\*\*\*) Dpto de Física Aplicada, Universidad de Jaen,  
23071, Jaen.

### ABSTRACT

Incoming shortwave solar radiation is an important component of surface energy balance. A continuous in time and detailed spatial analysis of global solar radiation at the earth surface is needed in numerous applications, ranging from solar energy resources to the study of agricultural and biological processes. Networks of meteorological stations that measure continuously solar radiation are generally sparse in comparison to the spatial scale of solar radiation variability. Satellite measurements can provide solar radiation estimates over extensive areas and with a high temporal frequency. In this paper we present a statistical model that estimates hourly values of solar direct irradiance from Meteosat observations. And validate it using ground measurements from southern Spain.

### RESUMEN

La radiación solar incidente en la superficie es una componente muy importante en el balance radiativo terrestre. Un análisis espacial y temporal detallado de la radiación solar resulta de gran utilidad en diferentes aplicaciones, como pueden ser la evaluación de recursos energéticos solares o el estudio de procesos biológicos. Desafortunadamente en la mayoría de los casos no se disponen de redes de medida adecuadas que permitan tener en cuenta la variabilidad espacial y temporal de la radiación solar. Las medidas de satélite nos permiten obtener estimaciones de la radiación solar incidente en áreas extensas y con una gran frecuencia temporal. En este trabajo presentamos un modelo estadístico para estimar valores horarios de irradiación directa a partir de medidas del satélite Meteosat. Los

resultados del modelo son validados utilizando medidas de tierra obtenidas en el sur de España.

**Palabras clave:** teledetección, radiación solar, radiación directa, energía solar, recursos energéticos solares.

### INTRODUCCIÓN

La irradiancia directa normal es una variable muy importante en la evaluación del funcionamiento de centrales solares de producción de energía y, en general, de cualquier sistema que concentre la radiación solar. Desafortunadamente en la actualidad sólo se disponen de medidas de radiación directa en zonas muy localizadas. Esto dificulta la correcta evaluación de los recursos energéticos solares ya que normalmente no se dispone de series de medidas de irradiancia directa en la zona de interés. Este hecho también dificulta la estimación del potencial energético solar en zonas extensas, ya que en general no se conoce cual es la variabilidad espacial de la radiación solar (Gautier 1982).

La posibilidad de obtener estimaciones de la radiación directa a partir de imágenes de satélite ampliaría considerablemente la información disponible, ya que las imágenes de satélite proporcionan información de cualquier punto de la superficie y con una frecuencia adecuada. Sin embargo, si se desea una correcta estimación de la irradiancia directa mediante teledetección es fundamental tener en cuenta los distintos procesos de atenuación que tienen lugar en la atmósfera. En este sentido las nubes juegan un papel fundamental. El efecto de las nubes sobre la radiación directa es uno de los más relevantes y uno de los más complejos de evaluar ya que depende fundamentalmente de la distribución espacial de los cúmulos y de su espesor óptico.

Un método que permite obviar estas dificultades es el desarrollo de relaciones estadísticas entre magnitudes radiométricas y estimaciones de la nubosidad obtenidas a partir de imágenes de satélite. La principal dificultad de este tipo de modelos estadísticos reside en la selección de las variables más adecuadas. Esta selección se hace en función del papel que juegan en la interacción de la radiación solar con la atmósfera.

En la estimación de la irradiancia global se han desarrollado varios modelos entre los que destaca sobre todo el modelo Heliosat (Cano et al. 1986; Diabaté 1989) que son capaces de estimar la irradiancia solar a partir de imágenes del canal

visible del satélite Meteosat. Este tipo de modelos son muy utilizados ya que son modelos muy simples y pueden ser implementados de manera sencilla. Sin embargo no se ha estudiado en profundidad la utilización de este tipo de modelos para estimar la irradiancia directa.

En el presente trabajo vamos a desarrollar un modelo que permite estimar la irradiancia directa en la superficie terrestre a partir de los valores de nubosidad efectiva obtenidos en el canal visible del satélite Meteosat. Para ello, en primer lugar obtendremos una magnitud que caracterice adecuadamente la presencia de nubes y su espesor óptico, parámetro denominaremos nubosidad efectiva. Posteriormente correlacionaremos las medidas obtenidas con medidas de irradiancia directa realizadas en la superficie y utilizaremos el modelo así obtenido para estimar la irradiancia directa.

## DATOS EXPERIMENTALES

Las medidas utilizadas en el presente trabajo se obtuvieron a lo largo del año 1996 en la localidad de Almería (36.83°N, 2.41°W). Se han utilizado medidas horarias de irradiancia global y difusa. Los valores de irradiancia directa se obtuvieron a partir de medidas de irradiancia global y difusa. Tanto para la medida de radiación global como de radiación difusa se utilizaron piranómetros Kipp&Zonnen modelo CM-11, uno de los cuales lleva incorporada una banda de sombra. Las medidas realizadas con banda de sombra se han corregido mediante el método propuesto por (Batlles et alii 1995)

Las imágenes Meteosat seleccionadas para este trabajo han sido imágenes de alta resolución obtenidas cada hora. Dichas imágenes han sido suministradas por EUMETSAT. Y comprenden la región delimitada por los paralelos 26°N y 65°N y los meridianos 20°W y 45°E. En las estimaciones se utilizaron grupos de 3\*3 píxeles en torno a la estación de tierra

## DESCRIPCIÓN DEL MODELO

Diversos autores (Lopez et al, 2000) han puesto de manifiesto que la fracción directa  $k_b$ , es la variable que mejor describe las variaciones de la irradiancia directa. Esta magnitud adimensional se define como la razón entre los valores horarios de radiación directa y la radiación solar extraterrestre. Obtendremos la irradiancia directa a partir de la definición de la fracción directa:

$$I = k_b I_0$$

Donde  $I$  es la radiación directa medida e  $I_0$  es la radiación extraterrestre.

En este trabajo se va a obtener  $k_b$  a partir de la nubosidad efectiva. La nubosidad efectiva nos permite caracterizar adecuadamente el tamaño y el espesor óptico de las nubes presentes en la atmósfera.

### Estimación de la nubosidad efectiva

La nubosidad efectiva,  $n$ , se obtiene a partir de una comparación de las medidas que suministra el satélite Meteosat con aquellas obtenidas en condiciones de cielo despejado y cielo cubierto, a partir de la siguiente expresión:

$$n = \frac{\rho - \rho_{des}}{\rho_{cub} - \rho_{des}}$$

Donde  $\rho$  es el albedo relativo obtenido a partir de la imagen por satélite,  $\rho_{cub}$  el albedo relativo asociado a condiciones de cielo cubierto y  $\rho_{des}$  el albedo relativo asociado a condiciones de cielo despejado.

El albedo relativo correspondiente a cielos completamente cubiertos,  $\rho_{cub}$ , se ha obtenido utilizando el método propuesto por Costanzo (1994). Este método consiste en aplicar un filtro de medias con una ventada de 10\*10 píxeles a la imagen de los máximos, y tomar como valor del albedo relativo el máximo del histograma de la imagen resultante.

El albedo relativo correspondiente a condiciones de cielo despejado,  $\rho_{des}$ , lo obtenemos a partir del histograma de los albedos relativos para Almería a lo largo del año. El valor que se tomó como albedo relativo en condiciones de cielo despejado fue el valor correspondiente al quinto percentil (Cano et al, 1986)

Para estimar el albedo relativo hemos utilizado una modificación del modelo propuesto por Moussu et al (1989). Este modelo considera que la superficie terrestre se puede considerar una superficie lambertiana. La expresión obtenida es la siguiente:

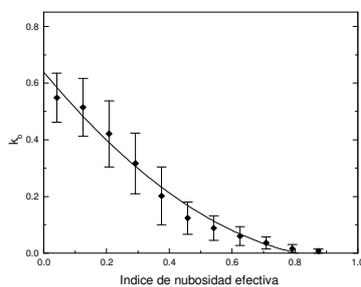
$$\rho = \frac{c - c_o}{0.7R(\text{sen}\alpha)^{1.15}(\cos\theta_v)^{0.15}}$$

Donde  $\alpha$  es la altura solar,  $c$  es la medida

proporcionada por el sensor,  $c_0$  es la coordenada en el origen en la ecuación de calibración del sensor.  $c_0$  se estima a partir de la medida obtenida por el sensor cuando apunta al espacio exterior.  $R$  es la distancia de la Tierra al Sol normalizada de tal manera que la distancia media vale 1.  $\theta_0$  es el ángulo entre la línea de visión del satélite y la normal a la superficie terrestre.

### Obtención del modelo

En la figura 1 se muestran los valores medios de  $k_b$  y la desviación típica en función del índice de nubosidad efectivo. Se observa claramente que en este caso la relación no es lineal y que los valores de  $k_b$  tienden a desplazarse por debajo de la diagonal para valores intermedios de la nubosidad efectiva, por lo que queda justificado la utilización de un polinomio de segundo orden. Esta desviación indica que el índice de nubosidad efectiva afecta más a la irradiancia directa que a la irradiancia global para valores intermedios.



**Figura 1.** Índice de claridad frente a nubosidad efectiva y ajuste polinómico.

Una posible explicación a este hecho se halla en que la radiación directa interceptada por las nubes no es reflejada en su totalidad a la atmósfera sino que es dispersada a través de la misma. Estos resultados coinciden con los obtenidos por otros autores (Inechnein y Perez, 2000) que han propuesto ajustes polinómicos de hasta 11s coeficiente en función de la nubosidad y de la elevación solar para ajustar el modelo adecuadamente.

A partir de los resultados anteriores se obtiene la siguiente ecuación:

$$k_b = 0.639 - 1.333n + 0.676n^2 \quad r = 0.913$$

Donde  $n$  es el índice de nubosidad efectivo.

El coeficiente de correlación de 0.913 nos indica que las medidas realizadas se ajustan bien a una ecuación polinómica de segundo grado. La ordenada en el origen nos indica el valor de la irradiancia directa en condiciones de cielo despejado. El valor obtenido, 0.639, concuerda con el valor promedio de las medidas realizadas en condiciones de cielo despejado en estaciones meteorológicas. Cuando la nubosidad efectiva toma valores próximos a la unidad, se obtiene un valor de la fracción directa prácticamente nulo.

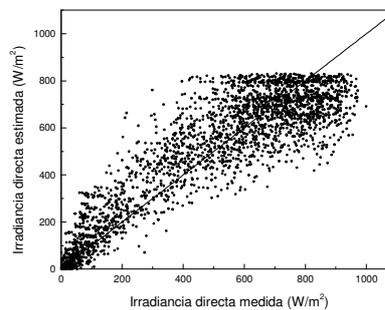
### RESULTADOS

A partir de la correlación obtenida podemos estimar valores horarios de la radiación directa en todo tipo de condiciones de cielo a partir de la siguiente expresión:

$$I = I_0 (0.639 - 1.333n + 0.676n^2)$$

Donde  $I$  es la irradiancia directa,  $I_0$  es la radiación solar extraterrestre y  $n$  es el índice de nubosidad efectivo.

Los resultados estadísticos proporcionados por este modelo muestran una desviación media poco significativa y un error cuadrático medio del orden del 31%. Este es un valor relativamente alto aunque inferior al obtenido por otros autores que llegan a alcanzar valores superiores al 40% (Inechnein y Perez, 2000) y similar al obtenido mediante otro tipo de modelos, (Rubio, 2002). El elevado valor del error cuadrático medio nos indica que el índice de nubosidad efectivo es insuficiente para obtener la irradiancia directa.

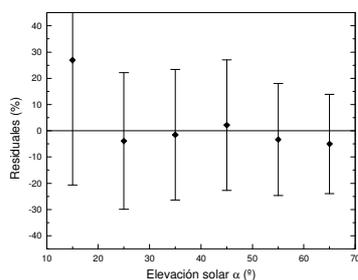


**Figura 2.** Valores horarios de irradiancia directa medidos frente a estimados e histograma de los residuales

En la figura 2 se representan los valores horarios

estimados de irradiancia directa frente a los medidos. En este caso las estimaciones muestran una dispersión apreciable respecto de la línea de perfecto ajuste 1:1.

En la figura 3 se muestra la distribución de los residuales del modelo en función de la elevación solar. Para elevaciones solares por encima de 20° los residuales se pueden considerar nulos y la desviación típica es prácticamente constante. Para elevaciones solares por debajo de 20° la situación es completamente distinta. Se observa una desviación positiva bastante importante con un valor medio cercano al 25%. La desviación típica de los residuales también es mayor que en los casos anteriores superando el 30%. La causa de este crecimiento del error se haya en que para bajas elevaciones solares las nubes que afectan a la irradiancia directa en un punto dado, son las que se sitúan en el horizonte.



**Figura 3.** Distribución de los residuales del modelo en función de la elevación solar.

Estos cúmulos nubosos se pueden hallar a varias decenas de kilómetros de la localidad en estudio y por lo tanto no son tomados en cuenta por el modelo. Así es posible que la bóveda celeste el cielo esté despejado pero que un frente nuboso se halle situado en el horizonte. En estas condiciones cuando el sol se halle cerca del horizonte los cúmulos de nubes interceptarán la radiación directa pero nuestro modelo no podrá tenerlo en cuenta porque en el píxel asociado a la localidad no se registra la presencia de nubes.

## BIBLIOGRAFIA

Batlles F.J., Olmo, F.J., Alados Arboledas, L., 1995. On shadowband correction methods for diffuse irradiance measurements". *Solar Energy*, vol. 54: 115-124

Cano D., Monget J.M., Albuissou M., Guillard H., Regas N., and Wald L., A method for the determination of the global solar radiation from meteorological satellite data, *Solar Energy*, 37, 1986, 31-39.

Costanzo C. Bestimmung der solaren Einstrahlung am Boden aus Meteosat-Daten-Untersuchung und Erweiterung einer empirischen Methode. *Diploma thesis*. 1994.

Diabaté L., Moussu G., Wald L., Description of an operational tool for determining global solar radiation at ground using geostationary satellite images, *Solar Energy*, 42, 1989, 201-207.

Gautier, C. Mesoscale insolation variability derived from satellite data. *Journal of Applied Meteorology*. 21, 1982, 51-8.

Ineichen P., y Perez R., Derivation of cloud index from geostationary satellites and application to the production of solar irradiance and daylight illuminance data, *Theoretical and Applied Climatology*, 64, 2000, 119-130.

López G., Rubio M. and Batlles F.J. Estimation Of Hourly Direct Normal From Measured Global Solar Irradiance In Spain. *Renewable Energy*, 2000: 21 175-186

Moussu G., Diabaté L., Obrecht D., Wald L., A method for the mapping of the apparent ground brightness using visible images from geostationary satellites, *International Journal of Remote Sensing*, 10, 1989, 1207-1225.

Rubio, M, A. Caracterización y Modelización de la Irradiancia Directa. Tesis Doctoral, España, 2002.

## AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha sido realizado con la financiación del Ministerio de Ciencia y Tecnología a través del proyecto (REN/2001)-3890-C02-01/CLI. Deseamos agradecer a EUMETSAT las imágenes que nos ha proporcionado.