

## OBTENCIÓN DE LA IRRADIANCIA GLOBAL Y DE LA IRRADIANCIA FOTOSINTÉTICAMENTE ACTIVA A PARTIR DE IMÁGENES METEOSAT

F. J. Olmo, I. Foyo, J. Vida, R. Pareja y L. Alados-Arboledas

CRYTIS.

Departamento de Física Aplicada. Facultad de Ciencias.  
Universidad de Granada. 18071 Granada.

Tfno. 34 58 244024. Fax. 34 58 243214. E-mail: alados@ugres

**RESUMEN:** En este trabajo presentamos sendos modelos de estimación de la irradiancia solar global horaria y de la densidad de flujo fotónico fotosintético horario, en una superficie horizontal, a partir de observaciones de satélite. Los modelos presentan una estructura similar basada en un modelo en el que se parametriza la transferencia radiativa solar en cielo despejado y se incluye el efecto de la nubosidad a partir de una pseudotransmitancia de nubes calculada mediante las radiancias del canal visible del satélite METEOSAT. Los modelos se han contrastado con medidas radiométricas obtenidas en superficie.

### INTRODUCCIÓN

La radiación fotosintéticamente activa, PAR, se define como la radiación incluida en la banda espectral de 400 a 700 nm. Con el término PAR se designa generalmente tanto el flujo fotónico como el energético. Con la magnitud densidad de flujo fotónico fotosintético,  $Q_p$ , nos referimos a este flujo en términos del número de fotones que inciden por unidad de área en la unidad de tiempo ( $1 \mu\text{mol photons/m}^2\text{s} = 6.022 \cdot 10^{17} \text{ photons/m}^2\text{s} = 1 \mu\text{E/m}^2\text{s}$ ). La radiación PAR regula la productividad primaria, es decir, el ritmo al que se fija el carbono tanto por las plantas acuáticas como las terrestres. Este flujo es necesario para la modelización de la fotosíntesis de plantas individuales y comunidades complejas. Por esta razón es conveniente conocer la distribución global de este flujo radiativo. Desgraciadamente no existe una red mundial para su medida.

Los satélites geostacionarios como METEOSAT permiten la estimación de la irradiancia solar global y de la irradiancia PAR incidente en la superficie. Dada la ausencia de medidas sistemáticas de estos flujos, en los últimos años se han propuesto diferentes algoritmos de estimación partiendo de parametrizaciones y/o de imágenes proporcionadas por los satélites (i.e., Iqbal, 1983; Diak y Gautier, 1983; Gueymard, 1989a, 1989b; Stuhlmann et al., 1990; Eck y Dye, 1991; Pinker y Laszo, 1992a, 1992b; Frouin y Pinker, 1995). Asimismo también se han propuesto modelos empíricos (i.e., Rao, 1984; Olseth y Skatveit, 1993; Alados et al., 1996).

En este trabajo presentamos sendos algoritmos para estimar tanto la irradiancia solar global como la radiación fotosintéticamente activa, en una superficie horizontal, a partir de imágenes METEOSAT. Los modelos presentan una estructura similar basada en un modelo en el que se parametriza la transferencia radiativa solar en cielo despejado, y se incluye el efecto de la nubosidad mediante una pseudotransmitancia de nubes estimada a

partir de las imágenes de satélite y del código de transferencia radiativa LOWTRAN-7 (Kneyzis, 1988). Las estimaciones de los algoritmos se han comparado con datos de verdad de tierra adquiridos en dos estaciones radiométricas: una localizada en Almería y la otra en Granada.

### MEDIDAS EXPERIMENTALES

Las imágenes PDUS METEOSAT utilizadas en este trabajo han sido adquiridas por el sistema de recepción PDUS del Centro de Recepción y Tratamiento de Imágenes de Satélite (CRYTIS) de la Universidad de Granada. La eficacia del modelo se ha comprobado utilizando imágenes correspondientes a la primavera, verano e invierno de 1995.

Las medidas de flujos radiativos usados como verdad de tierra se han obtenido en dos estaciones radiométricas. La estación localizada en la Universidad de Almería (36.83° N, 2.41° O, 0 m) proporciona medidas de diferentes flujos radiométricos y meteorológicos cada cinco minutos. Las medidas de irradiancia solar, tanto en su componente global como en la difusa se han obtenido con piranómetros Kipp & Zonen, modelo CM-11. La densidad de flujo fotónico fotosintético incidente en una superficie horizontal,  $Q_{ph}$ , se ha medido con sensores LICOR modelo 190 SA quantum (Lincoln, Nebraska, USA). Un segundo sensor equipado con una banda de sombra proporciona la densidad de flujo fotónico fotosintético difuso,  $Q_{pd}$ . Las medidas realizadas con banda de sombra se han corregido mediante el método propuesto por Battles et al. (1995). A partir de estas medidas corregidas y de los flujos globales, tanto fotosintético como solar, obtenemos las correspondientes componentes directas. La segunda estación localizada en las proximidades de Granada (37.18° N, 3.58° O, 660 m) usa un conjunto equivalente de sensores cuyos valores se registran cada minuto. Para el presente estudio hemos utilizado como verdad de tierra tanto estos valores como los correspondientes promedios horarios generados con ellos.

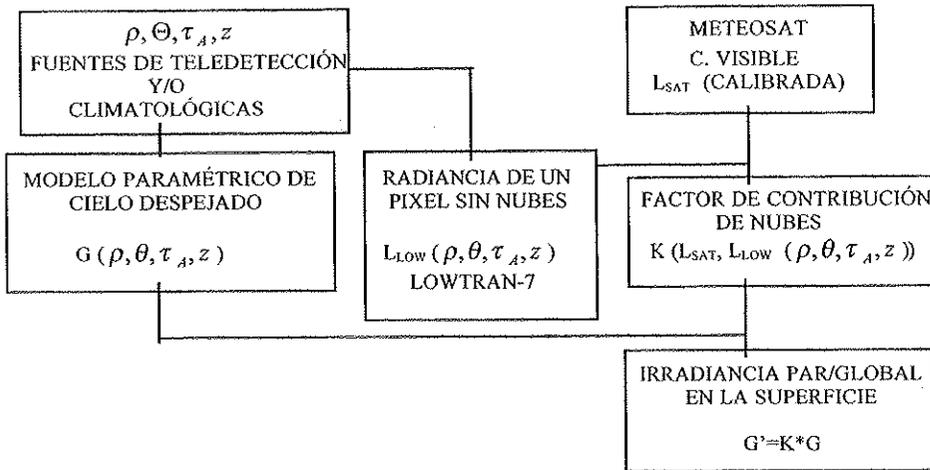


Figura 1. Diagrama de flujo que muestra el método utilizado.

Con el fin de evitar problemas asociados a la falta de respuesta coseno hemos limitado los casos usados a los correspondientes a ángulos cenitales inferiores a  $85^\circ$ . La degradación de las constantes de calibración se comprueba anualmente. Las medidas de irradiancia solar global y difusa tienen un error experimental alrededor del 2-3% mientras que los sensores quantum tienen un error inferior al 5%.

## DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO

El método propuesto utiliza las imágenes del canal visible de METEOSAT para obtener un factor de contribución de las nubes. Este factor se calcula a partir de las imágenes de satélite y del código de transferencia radiativa LOWTRAN-7. Seguidamente se combina un modelo paramétrico de cielo despejado con el factor de contribución de las nubes. Para obtener la irradiancia solar global de cielo despejado en una superficie horizontal hemos utilizado un modelo paramétrico propuesto por Gueymard (1989b), sin embargo, para el cálculo de la irradiancia PAR nos hemos basado en el modelo propuesto por Gueymard (1989a) y en el código de transferencia radiativa SPECTRAL-2 (Bird y Riordan, 1986):

$$I_b = I_0 \tau_0 \tau_R \tau_A$$

$$D_R = I_0 \cos \theta \cdot 0.5(1 - \tau_m^{0.93} \tau_0 \tau_A)$$

$$D_A = I_0 \cos \theta \cdot B_m(1 - \tau_A) \tau_A^{1.5} \tau_0 \tau_A$$

$$D_M = (I_b \cos \theta + D_R + D_A) \rho_A \rho_G / (1 - \rho_A \rho_G)$$

$$G = I_b \cos \theta + D_R + D_A + D_M$$

donde  $I_b$  es la irradiancia PAR directa,  $D_i$  las distintas componentes de la irradiancia PAR difusa y  $G$  es la irradiancia PAR global. Estos modelos requieren información del albedo de la superficie, del espesor óptico de aerosoles y de la elevación solar. En el caso del modelo paramétrico para el cálculo de la irradiancia global necesitamos también valores de la temperatura y humedad. Para la obtención de estos parámetros hemos considerado dos fuentes de información: estimaciones de satélite y datos climatológicos (i.e., Kaufman et al., 1994). Utilizando la información de albedo, el espesor óptico de aerosoles, la elevación solar, el ángulo de barrido del satélite y la geometría solar, hemos generado radiancias a nivel del satélite para píxeles libres de nubes. Esta información, combinada con la radiancia experimental obtenida mediante la imagen visible de METEOSAT, nos permite determinar el factor de contribución de las nubes. De este modo obtenemos el factor como una función del espesor óptico de aerosoles, del albedo de la superficie, de la elevación de la superficie, del ángulo cenital solar y de la contribución de las nubes.

La Figura 1 muestra esquemáticamente el diagrama de flujo que describe el método utilizado.

## ANÁLISIS Y RESULTADOS

Hemos analizado el método utilizando datos de verdad de tierra adquiridos en las estaciones radiométricas de

Granada y Almería. Para un análisis preliminar se han usado más de 500 valores horarios correspondientes a todo tipo de condiciones de cielo. Las Tablas I y II muestran los resultados estadísticos del análisis del modelo en términos de la desviación media (MBD) y el error cuadrático medio (RMSD).

Tabla I. Resultados estadísticos para el modelo de cálculo de la irradiancia PAR.

MBD	RMSD	ORDENADA $\mu E/m^2 s$	PENDIENTE	R
0.8%	10.1%	$1 \pm 18$	$1.01 \pm 0.01$	0.97

Tabla II. Resultados estadísticos para el modelo de cálculo de la irradiancia global.

MBD	RMSD	ORDENADA $W/m^2$	PENDIENTE	R
8.2%	15.5%	$48 \pm 10$	$1.01 \pm 0.01$	0.95

También hemos incluido la pendiente, la ordenada en el origen y el coeficiente de correlación de los valores calculados frente a los medidos. Las Figuras 2 y 3 muestran las gráficas donde se representan los valores calculados frente a los medidos.

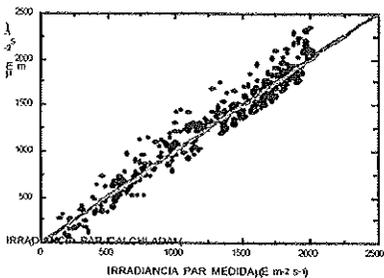


Figura 2. Irradiancia PAR calculada frente a la medida para una superficie horizontal.

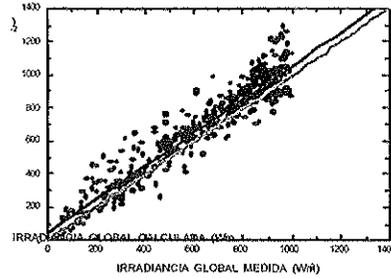


Figura 3. Irradiancia global calculada frente a la medida para una superficie horizontal.

Como muestra la desviación media, hay una tendencia sistemática a la sobreestimación, siendo del 0.8% en el caso de la irradiancia PAR, y del 8.2% en el caso de la irradiancia global. Un análisis preliminar muestra que estas tendencias están asociadas principalmente con el modelo paramétrico de cielo despejado, aunque en el caso de la irradiancia PAR la sobreestimación es prácticamente nula. Por otro lado, el error cuadrático medio y el coeficiente de correlación ponen de manifiesto las buenas perspectivas del modelo, ya que sus valores se encuentran en unos márgenes muy aceptables desde el punto de vista de los modelos que estiman la irradiancia global y la PAR en todo tipo de condiciones de cielo. En cualquier caso hemos de considerar una fuente de error adicional debida a las diferencias temporales entre las estimaciones instantáneas de satélite y los valores horarios integrados registrados en las estaciones radiométricas.

## CONCLUSIONES

En este trabajo hemos utilizado valores de irradiancia global e irradiancia PAR horarias, ambas medidas sobre una superficie horizontal, para analizar los resultados de un modelo de estimación propuesto para el cálculo de ambos flujos radiativos a partir de imágenes del canal visible de METEOSAT y otros parámetros que describen el estado de la superficie y las condiciones atmosféricas. Estos parámetros pueden obtenerse partiendo de información climatológica y/o fuentes de teledetección. El método utiliza un modelo paramétrico de cielo despejado y un factor de contribución de nubes obtenido a partir de las imágenes METEOSAT y haciendo uso del código de transferencia radiativa LOWTRAN-7. Cuando comparamos los resultados obtenidos con los valores de verdad de tierra procedentes de dos estaciones radiométricas localizadas en el Sur de España, obtenemos unos valores del error cuadrático medio y de la desviación media acordes con otros modelos que no utilizan imágenes de satélite. Los lugares donde se sitúan las dos estaciones radiométricas presentan algunas diferencias desde el punto de vista climatológico, lo que nos sugiere la posible aplicabilidad general del modelo. Por otro lado, las mejoras en un futuro próximo de los modelos paramétricos de cielo despejado y la mayor extensión temporal de la base de datos utilizada, nos pondrá de manifiesto posibles correcciones futuras.

**AGRADECIMIENTOS:** Este trabajo ha sido posible gracias a la financiación de La Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología mediante el CLI95-1840. Los autores muestran su agradecimiento al personal encargado de las estaciones radiométricas de Almería y Armilla.

## BIBLIOGRAFÍA

- I. ALADOS, I. FOYO-MORENO, L. ALADOS-ARBOLEDAS "Photosynthetically active radiation: measurements and modelling" *Agric. For. Meteorol.*, 1996, 78, 121-131.
- F.J. BATLLES, F.J. OLMO, L. ALADOS-ARBOLEDAS "On shadowband correction methods for diffuse irradiance measurements" *Solar Energy*, 1995, 54, 115-114.
- E.R. BIRD, C. RIORDAN "Simple solar spectral model for direct and diffuse irradiance on horizontal and tilted planes at the Earth's surface for cloudless atmospheres" *J. Clim. Appl. Meteorol.*, 1986, 25, 87-97.
- R.G. DIAK, C. GAUTIER "Improvements to a simple physical model for estimating insolation from GOES data" *J. Clim. Appl. Meteorol.*, 1983, 22, 505-508.
- T.F. ECK, D.G. DYE "Satellite estimation of incident photosynthetically active radiation using ultraviolet reflectance" *Remote Sens. Environ.*, 1991, 38, 135-146.
- R. FROUIN, R.T. PINKER "Estimating photosynthetically active radiation (PAR) at the Earth's surface from satellite observations" *Remote Sens. Environ.*, 1995, 51, 98-107.
- C. GUEYMARD "An atmospheric transmittance model for the clear sky beam, diffuse and global photosynthetically active radiation" *Agric. Forest. Meteorol.*, 1989a, 45, 215-229.
- C. GUEYMARD "A two band model for the calculation of clear sky solar irradiance, illuminance, and photosynthetically active radiation at the earth's surface" *Solar Energy*, 1989b, 43, 253-265.
- M. IQBAL "An introduction to solar radiation" Academic Press, Canada, 1983.
- Y.J. KAUFMAN, C. SENDRA "Algorithm for automatic atmospheric corrections to visible and near-IR satellite imagery" *Int. J. Rem. Sens.*, 1988, 9, 1357-1387.
- F.X. KNEIZYS, et al., "Users guide to LOWTRAN 7" Air Force Geophys. Lab., Hanscom, MA, Report. AFGL-TR-88-0177, 1988.
- J.A. OLSETH, A. SKARTVEIT "Luminous efficacy models and their application for calculation of photosynthetically active radiation" *Solar Energy*, 1993, 52, 391-399.
- R.T. PINKER, I. LASZLO "Global distribution of photosynthetically active radiation as observed from satellites" *J. Climate*, 1992, 5, 56-65.
- R.T. PINKER, I. LASZLO "Modeling surface solar irradiance for satellite Applications on a Global Scale" *J. Appl. Meteorol.*, 1992, 31, 194-211.
- R.T. PINKER, R. FROUIN "A review of satellite methods to derive surface shortwave irradiance" *Remote Sens. Environ.*, 1995, 51, 108-124.
- C.R. RAO "Photosynthetically active components of global solar radiation: Measurements and model computations" *Arch. Met. Geoph. Biod.*, 1984, Ser. B, 33, 89-98.
- R. STUHLMANN, M. RIELAND, E. RASCHKE "An improvement of the IGMK model to derive total and diffuse solar radiation at the surface from satellite data" *J. Appl. Meteor.*, 1990, 29, 586-603.