

## UTILIZACIÓN DEL MODELO DIGITAL DEL TERRENO PARA LA ESTIMACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR EN ZONAS DE TOPOGRAFÍA COMPLEJA

J. TOVAR (\*), D. POZO (\*), A. J. GIL (\*\*), M. I. RAMOS (\*\*), J. BATLLES (\*\*\*), M. A. RUBIO (\*\*\*)  
y G. LÓPEZ (\*\*\*)

jtovar@ujaen.es

\* Dpto. de Física, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Jaén, 23071 Jaén, España.

\*\* Dpto. de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría Universidad de Jaén, 23071 Jaén, España.

\*\*\* Dpto. de Física Aplicada, Universidad de Almería, 23071 Almería, España.

**RESUMEN:** Se presenta un estudio inicial para obtener valores de radiación en zonas donde existe una topografía compleja mediante la utilización de imágenes de satélites y modelos digitales del terreno (MDT). Estas técnicas permiten resolver la dificultad que supone la falta de resolución espacial de los satélites meteorológicos y que no permiten reflejar la variabilidad de la radiación solar. En este trabajo se hace un análisis comparativo de los valores de radiación solar global que se obtienen a partir de imágenes de satélites utilizando distintas resoluciones, poniendo en evidencia la conveniencia de usar de manera combinada MDT y técnicas de teledetección. El estudio se ha realizado sobre una zona de 15x20 km correspondientes al parque natural de Sierra Mágina (Jaén) donde se registran alturas sobre el nivel del mar desde 520 hasta 2160 m. En una primera fase se analizan las diferencias encontradas en el uso de MDT respecto a la simple utilización imágenes de satélites meteorológicos y para proponer a continuación un método de trabajo más amplio en esta línea.

**ABSTRACT:** In this work we present a method to obtain the solar irradiance on ground level for zones with a great variability using DEM and techniques of remote sensing. The radiation obtained from meteorological satellites provide a high temporal resolution but have the difficult of a poor spatial resolution. Using a DEM combined with images of meteorological satellites is possible to obtain a better results that we use only the information of meteorological satellites. We show, for a region with a hard topography (the natural park of Sierra Mágina, Jaén), that the solar radiation obtained using a DEM shown a variability that it is not appreciated when these techniques are not using as consequence of the píxels of satellites give us a irradiance value that is the average of all the points within of the píxel.

**Palabras clave:** Satélites meteorológicos. Radiación solar. Modelos digitales de terreno. GPS. DEM

### INTRODUCCIÓN

Los métodos habituales de estimación de los valores de radiación solar en puntos donde no se encuentran estaciones de tierra se ha venido realizando habitualmente mediante técnicas de interpolación. Este método es factible cuando entre las estaciones donde se reciben datos de radiación no existen singularidades como pueden ser zonas con una topografía muy compleja, cuyas particularidades no quedarían reflejadas en los valores obtenidos. Recientemente la utilización de imágenes de satélites meteorológicos ha servido para suplir la carencia de datos en este tipo de zonas al poder contar con valores espacialmente mejor distribuidos. Sin embargo

los satélites más frecuentemente utilizados, como son el METEOSAT y NOAA (Möser and Raschke, 1984; Cano *et al.*, 1986; Stuhlmann *et al.*, 1990; Laszlo and Pinker, 1993; Beyer *et al.*, 1995; Beyer *et al.*, 1996), poseen una resolución que no permiten reflejar la variabilidad de determinadas zonas con características que influyen de manera notable en los valores de radiación que llegan a tierra. Otros satélites con una resolución espacial más elevada como el LANDSAT o el SPOT pueden aportar en algún caso una solución para conocer los valores de irradiancia solar en un momento determinado (Wang *et al.*, 2000) pero poseen una resolución temporal que no les hace idóneos para obtener series temporales de

determinados parámetros que son necesarias cuando se trata de estudiar gran parte de fenómenos meteorológicos, por lo general muy dinámicos. Recientemente se han realizado estudios para incorporar MDT a la información que se puede obtener de las imágenes de satélites. Esta información se ve especialmente adecuada para obtener valores de radiación solar ya que uno de los parámetros fundamentales que intervienen en los valores de radiación solar que se recibe en superficie es la masa óptica atmosférica que debe atravesar la radiación. La masa óptica depende de la altura sobre el nivel del mar del lugar considerado.

En el presente trabajo se ha analizado las diferencias que se obtienen cuando se estima la radiación solar simplemente a partir de imágenes de satélites y cuando se incorporan los MDT. Este análisis se ha realizado en términos de variabilidad.

Para obtener valores de radiación solar sobre amplias zonas espaciales, de forma continuada en el tiempo teniendo en cuenta la variabilidad espacial propia de la radiación se propone el uso de imágenes de satélites meteorológicos, de diferente resolución espacial, datos topográficos, como pueden ser el modelo digital del terreno (MDT) así como el sistema de posicionamiento global GPS. El sistema GPS permite localizar valores de radiación medidos en campo (mediante los sensores radiométricos) respecto a un sistema de referencia predeterminado, el mismo que se emplee para la georreferenciación de las imágenes de satélite, de modo que cada punto con valor de radiación medida sea perfectamente identificable en la imagen y así poder contrastar los valores obtenidos in situ con los de dicha imagen.

## DATOS EXPERIMENTALES Y MÉTODO

Para el trabajo hemos utilizado un MDT perteneciente a la provincia de Jaén que presenta una resolución de 30 x 30 m interpolado a 20 x 20 m. La zona de trabajo corresponde a un marco de 15 x 20 km ocupando gran parte del Parque Natural de Sierra Mágina (Jaén), en concreto, la zona donde existen mayores desniveles y la discontinuidad física es más notoria. Para completar el análisis de variabilidad de radiación se han incluidos datos tomados in situ a partir tanto de sensores radiométricos y como de GPS. Se pretende localizar, de esta forma, valores de radiación medidos en campo respecto a un sistema de referencia predeterminado (idéntico el empleado para la georreferenciación de las imágenes de satélite) de modo que cada punto con valor de radiación medida sea perfectamente identificable en la imagen y así poder contrastar los valores reales con los valores estimados.

Para la realización del trabajo se han obtenidos los valores de radiación global horizontal estimados a partir de los modelos de transferencia radiativa donde se ha tenido en cuenta la masa óptica corregida en altura para cada uno de los puntos X, Y del MDT. Estos valores se han comparado con los mapas que se obtienen a partir de los satélites meteorológicos METEOSAT y NOAA de resolución 5.5 km x 5.5 km y 1.1 km x 1.1 km respectivamente.

El valor de la irradiancia normal obtenida en superficie tras sufrir la atenuación correspondiente debida a los procesos de absorción y dispersión, suponiendo homogéneo el medio de propagación, viene dada por la expresión

$$I_{n\lambda} = I_{0n\lambda} e^{-k_{\lambda} \int_0^m \rho(\epsilon) dx} = I_{0n\lambda} e^{-k_{\lambda} m}$$

que constituye la Ley de Beer-Bourger-Lambert. Dicha ley permite estimar la radiancia en un punto en función de la radiancia incidente, la masa óptica y el coeficiente de extinción del medio. La atenuación total para una determinada longitud de onda debida a los componentes de la atmósfera

$$I_{n\lambda} = I_{0n\lambda} e^{-k_{\lambda_1} m_1} e^{-k_{\lambda_2} m_2} \dots e^{-k_{\lambda_n} m_n} = I_{0n\lambda} \prod_{i=1}^n e^{-k_{\lambda_i} m_i} \\ = I_{0n\lambda} e^{-\sum_{i=1}^n k_{\lambda_i} m_i} = I_{0n\lambda} e^{-k_{\lambda} m}$$

Definiendo la transmitancia para una determinada longitud de onda de los componentes atmosféricos

$$\tau_i = \frac{I_{n\lambda}}{I_{0n\lambda}} = \prod_{i=1}^{i=n} \tau_i$$

la expresión anterior queda como

$$I_{n\lambda} = I_{0n\lambda} \prod_{i=1}^{i=n} \tau_{i\lambda} = I_{0n\lambda} \tau_{\lambda}$$

El valor de la irradiancia directa en una parte o en todo el espectro de la radiación solar se obtiene integrando la irradiancia espectral directa para el correspondiente intervalo de longitudes de onda.

$$I_n = \sum_0^{\infty} I_{n\lambda} \Delta\lambda$$

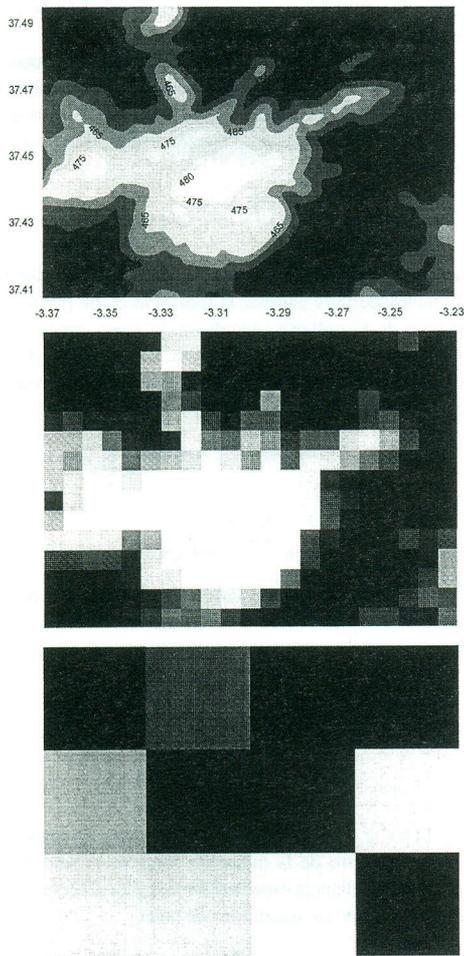
Expresando  $I_n$  en función del valor extraterrestre y de las transmitancias de cada uno de los componentes de la atmósfera:

$$I_n = \sum_0^{\infty} \left( I_{0n\lambda} \prod_{i=1}^{i=n} \tau_{i\lambda} \right) \Delta\lambda$$

y en función de las transmitancias

$$I_n = \sum_0^{\infty} (I_{0n} \tau_{\lambda}) \Delta \lambda$$

Si se desea obtener el valor de la irradiancia directa sobre una superficie horizontal ( $I_h$ ), se debe proyectar sobre dicha superficie



**Figura 1.** Comparación de las resoluciones que proporcionan: a) Modelo digital del terreno; b) Imagen NOAA (1.1x1.1 km) y c) Imagen METEOSAT (5.5x5.5 km)

Para estimar en cada punto de las componentes de la radiación se han utilizado los valores de la componente directa y global obtenidos por métodos radiométricos de un punto situado a 660 m sobre el ni-

vel del mar, a partir del cual se ha estimado el coeficiente de extinción global para todos los componentes atmosféricos en esa zona. Con el valor de  $k$  obtenido y calculando la masa óptica corregida en altura para cada punto se ha evaluado la componente global de la radiación tras proyectar la directa horizontalmente y estimar la difusa siguiendo el procedimiento de Wang *et al.* (2000). Finalmente se han comparado los resultados que se obtienen con el MDT y los que se obtendrían en imágenes a resoluciones METEOSAT y NOAA.

## ANÁLISIS Y CONCLUSIONES

El mapa de radiación global obtenido a partir del MDT presenta una variabilidad que oscila entre 435 W/m<sup>2</sup> y 485 W/m<sup>2</sup> lo cual era previsible teniendo en cuenta el fuerte desnivel de la zona. Desde el punto de vista teórico, los valores de radiación obtenidos a partir de las imágenes NOAA y METEOSAT deberían tener un rango de variación muy similar al obtenido anteriormente sin embargo se observa que la pérdida de resolución conlleva una disminución en la variabilidad dando lugar a un suavizado de los valores máximos y mínimos.

En la imagen NOAA los valores de radiación varían entre 444 W/m<sup>2</sup> y 470 W/m<sup>2</sup> así como el rango de la imagen METEOSAT se encuentra 445 W/m<sup>2</sup> de mínima y 455 W/m<sup>2</sup> de máxima. Este suavizado se corresponde con el que sufre la imagen a medida que aumentamos el tamaño del píxel lo cual nos permite prever que un adecuado análisis de la correlación entre resolución espacial y variabilidad de radiación permitirá estimar un mapa de radiación solar global con resultados satisfactorios.

Como se ha expuesto en apartados anteriores hemos trabajado con gran cantidad de datos de diferente procedencia lo cual exige, tanto para este estudio como para futuros trabajos complementarios, un buen sistema de gestión de toda la información de manera que el acceso a ella sea fácil y rápido y no suponga un impedimento para el correcto transcurso del trabajo. Por ello, los datos recopilados durante todo el proceso: datos de campo, de satélite, así como los resultados del estudio realizado serán integrados en una base de datos espacial, herramienta que facilitará no sólo su gestión sino también su cartografiado con garantías de calidad espacial y temática.

## BIBLIOGRAFÍA

- BEYER, H. G., CONSTANZO C. and D. HEINEMANN (1995). Modifications of the Heliosat procedure for irradiance estimates from satellite images. *Solar Energy* 56, 207-213.
- BEYER, H. G., CONSTANZO C. and REISE Ch. (1995). Multiresolution analysis of satellite-derived

- irradiance maps an evaluation of a new tool for the spatial characterization of hourly irradiance fields. *Solar Energy* 55, 9-20.
- CANO, D., MONGLET, J. M., ALBUISSON, M., GUILLARD, H. (1986). A method for determination of the global solar radiation from meteorological satellite data. *Solar Energy*, **37**, 31-39.
- LASZLO I. and PINKER R. T. (1993). Global distribution of surface solar irradiance as observed from satellites. *Proc. ISES Solar World Cong.*, Budapest 2, 179-184.
- MÖSER, W. and RASCHKE, E. (1984). Incident solar radiation over Europe estimated from METEOSAT data. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, **23**, 166-170.
- STUHLMANN, R., RIELAND, M., and RASCHKE, E. (1990) An improvement of the IGMK model to derive total and diffuse solar radiation at the surface from satellite data. *Journal of Applied Meteorology*, **29**, 586-603.
- WANG, J., WHITE, K., ROBINSON, G. J. (2000) Estimating surface net solar radiation by use Landsat-5 TM and digital elevation models. *Int. J. Remote Sensing*, **21**, 1, 31-34.