

ESTIMACION DE LA RADIACION SOLAR A PARTIR DE IMAGENES DE SATELITE: NUEVOS MAPAS DE EVALUACION DE LA IRRADIANCIA SOLAR PARA LA PENINSULA IBÉRICA

Luis F. Zarzalejo, Lourdes Ramírez, Jesús Polo, Luis Martín y Bella Espinar
Departamento de Energía - División Plataforma Solar de Almería (PSA)
Centro Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas – CIEMAT
Avda. Complutense, 22. 28040 Madrid - ESPAÑA.
Tel. +34 913 466 496 – Fax +34 913 466 037 e-mail: lf.zarzalejo@ciemat.es

RESUMEN: La creciente demanda de información relacionada con el recurso solar plantea un problema inabordable (desde el punto de vista espacio-temporal) a partir de mediciones radiométricas. La estimación de la radiación solar a partir de imágenes de satélites geoestacionarios constituye una herramienta idónea para afrontarlo, fundamentalmente en cuanto a distribución espacial y disponibilidad de series representativas. En este trabajo se presenta una nueva colección de mapas de radiación solar a partir de imágenes de satélite. La metodología para la estimación de la irradiancia solar aplicada está basada en el método Heliosat, al que se han aplicado una serie de reajustes para incrementar su precisión. Para el desarrollo y validación de esta nueva propuesta se han utilizado datos de una treintena de estaciones radiométricas en la península Ibérica registrados durante el periodo 1994-2004, junto con imágenes simultáneas procedentes del satélite Meteosat (canal visible).

Palabras clave: Energía solar, Estimación, Heliosat, Imágenes de satélite, Meteosat, Modelos.

INTRODUCCION

En paralelo al proceso de desarrollo tecnológico que experimenta la sociedad actual el adecuado conocimiento del potencial radiativo solar resulta cada vez más necesario. El reto energético que la sociedad actual tiene delante hace que las energías renovables deban ser consideradas una alternativa necesaria y no solo una fuente meramente alternativa. Según el Libro Blanco de ISES (Aitken, 2005) “el mundo debe salir de este breve instante de combustibles fósiles en la historia humana, y encaminarse hacia una renovada dependencia del Sol actual”.

La radiación solar es una variable climática registrada en muy pocas estaciones meteorológicas y durante cortos y, en la mayoría de las ocasiones, discontinuos períodos de tiempo. Esto, junto a la variabilidad espacial que presenta, hace patente una clara insuficiencia en la disponibilidad de información acerca del potencial solar en emplazamientos concretos, lo que provoca a su vez graves dificultades a la hora de proyectar/dimensionar sistemas de aprovechamiento de la energía solar.

Tradicionalmente, la inexistencia de datos radiométricos en una localización geográfica determinada se suplía mediante:

- Datos de estaciones próximas. Esta opción, únicamente es válida si se trata de un terreno llano y la distancia entre estaciones es menor a 10 km. En caso de terrenos complejos o distancias superiores, la utilización de los datos de radiación de otro emplazamiento para estudiar el comportamiento de la radiación o simular el funcionamiento de un sistema de aprovechamiento energético es completamente inadecuada.
- Interpolación de medidas radiométricas de estaciones cercanas. Esta solución, es aplicable cuando la red de estaciones de radiación solar tiene una densidad considerable (puede precisarse una densidad de 20~50 km. de distancia entre estaciones) y en función del tipo de terreno. La interpolación de estos datos teniendo en cuenta la topografía como variable de entrada permite utilizar datos de redes radiométricas de menor densidad (~100 km).

Para suplir estas carencias, la estimación de la radiación solar a partir de imágenes procedentes de satélites geoestacionarios constituye una herramienta idónea, fundamentalmente en cuanto a distribución espacial y disponibilidad de series representativas. Esta metodología está indiscutiblemente aceptada por la comunidad científica como la más útil para la estimación de la distribución espacial de la radiación solar (McArthur, 1998). El grado de madurez de esta metodología viene avalado por iniciativas tales como:

- El establecimiento de una red mundial de observación de la radiación solar BSRN (Baseline Surface Radiation Network) promovida por la WMO (World Meteorological Organization) que contempla entre sus principales objetivos la mejora de los modelos de estimación de la radiación solar a partir de imágenes de satélite.
- La reciente creación de una nueva tarea (Solar radiation knowledge from satellite images) promovida en 2004 por la IEA (International Energy Agency).

El presente trabajo enlaza directamente con estas iniciativas, centrándose en el desarrollo y aplicación de nuevos modelos de estimación de la irradiancia global horaria a partir de imágenes de satélite para el área geográfica de la España peninsular.

El uso de imágenes de satélite para la estimación de la radiación solar presenta grandes ventajas, entre las que pueden destacarse:

- Los satélites registran de forma simultánea grandes áreas de terreno, lo que permite conocer la distribución espacial cuasi-instantánea de la información, así como determinar diferencias relativas de unas zonas a otras.
- Las imágenes de satélites geoestacionarios son superponibles, por lo que es posible estudiar la evolución temporal en cada píxel de la imagen.
- En caso de disponer de una base de imágenes histórica es posible analizar situaciones anteriores.

Los satélites que mejor se adaptan a estos requisitos (amplia cobertura espacial simultánea, superponibilidad de las imágenes y disponibilidad de bases de datos históricas) son los satélites geoestacionarios. Estos satélites proporcionan imágenes y otros datos de una manera casi continua.

Numerosos autores han estudiado la posibilidad de determinar la radiación solar sobre la superficie terrestre a partir de las imágenes obtenidas vía satélite. Los dos pioneros, Tarpley y Gautier presentaron, respectivamente, un modelo estadístico (Tarpley, 1979) y otro físico (Gautier et al., 1980) utilizando el primer satélite geoestacionario meteorológico (GOES). Las principales características de estos modelos pueden resumirse en:

- **Modelos estadísticos.** Se basan en el ajuste empírico de expresiones que relacionan el flujo radiativo detectado por el satélite y la radiación solar registrada simultáneamente en la superficie terrestre. Precisan, por tanto, de un elevado número de datos piranométricos (Noia et al., 1993; Hay, 1993). La distribución espacio-temporal de estos datos determinará, en gran medida, su nivel de aplicabilidad espacial.
- **Modelos físicos.** Están basados en el análisis de los procesos radiativos que se producen en la atmósfera cuando es atravesada por la radiación solar. Presentan como principal ventaja su universalidad y como principal inconveniente la necesidad del conocimiento local de los parámetros atmosféricos en los que se apoyan (Hay, 1993; Noia et al., 1993b). Además del mencionado modelo de Gautier pueden encontrarse otras aproximaciones físicas en (Moser y Raschke, 1984; Dedieu et al., 1987; Illera, 1995).

Hoy en día ambas líneas metodológicas coexisten no habiendo una decantación clara por una u otra. Para la realización de este trabajo se ha optado por la modelización estadística debido, fundamentalmente, a la experiencia previa en la medida y análisis de la radiación solar integrada así como por la disponibilidad de una extensa base de datos piranométricos.

De entre todos los modelos existentes, el de aplicación más extendida en Europa es el denominado modelo Heliosat-2 (Rigollier et al., 2004). Se trata de un modelo de aplicación general desarrollado empíricamente a partir de datos procedentes de treinta y cinco estaciones radiométricas de toda Europa, de las cuales solo una (Valladolid) está contenida en la península Ibérica.

La escasa representatividad de datos correspondientes a la península Ibérica en el ajuste experimental del modelo Heliosat-2 invita a su mejora en esa zona geográfica. La hipótesis de partida que se plantea en este trabajo es la posibilidad de mejorar los resultados que esta metodología proporciona mediante el ajuste de nuevos modelos con datos de treinta estaciones piranométricas españolas. Estas mejoras están basadas, fundamentalmente, en la introducción de nuevas variables explicativas y proporcionan mejores resultados en términos cuantitativos (MBE y RMSE).

RADIACIÓN SOLAR A PARTIR DE IMÁGENES DE SATÉLITE. HIPÓTESIS BÁSICAS

La signatura espectral o albedo de una porción de la superficie terrestre es debida a un conjunto de factores físicos como pueden ser: tipo de suelo, humedad del mismo, densidad y estado de la vegetación, etc. El fundamento básico de la teledetección radica en admitir la posibilidad de estimar estos factores a partir del análisis de la reflectancia de cada píxel. Pueden plantearse dos hipótesis básicas no excluyentes (Chuvienco, 2002):

- Las signaturas espectrales se deben a factores cualitativos (tipo de cubierta, tipo de roca, etc.). En este caso se emplean técnicas de clasificación de imágenes.
- Las signaturas espectrales se deben a factores cuantitativos de tipo físico o biofísico (radiación solar, temperatura, biomasa, etc.). En este caso se admite la existencia de continuidad y transición suave (espacio-temporal) entre los distintos valores de reflectancia.

El albedo terrestre (ρ) es la variable fundamental cuyo cálculo va a permitir aplicar los diferentes modelos de estimación de la radiación solar. El modelo más sencillo que se puede plantear propone su evaluación como la razón entre la irradiancia procedente de un píxel y la irradiancia procedente del Sol que llega a ese píxel:

$$\rho_{\Delta} = \frac{\pi L_{\Delta}}{E_{p\Delta}} \quad (1)$$

donde el subíndice Δ representa la anchura espectral del canal de trabajo, L es la radiancia detectada por el satélite (procedente del píxel en cuestión) y E_p la irradiancia solar registrada en el píxel.

No es difícil deducir que la radiación extraterrestre que llega a la superficie de la atmósfera (I_0), ha de ser igual a la suma de las irradiancias absorbidas por la atmósfera (I_{atm}), la Tierra (I_{tie}) y la reemitida por el sistema Tierra-Atmósfera (I_{ree}). De esta forma, la ecuación de balance energético del sistema puede expresarse mediante la siguiente relación (Goswami et al., 1999):

$$I_0 = I_{atm} + I_{tie} + I_{ree} \quad (2)$$

La irradiancia absorbida por la Tierra puede expresarse en función de la irradiancia global incidente (G) y el albedo terrestre (ρ):

$$I_{tie} = G(1-\rho) \quad (3)$$

de manera que sustituyendo en la ecuación (2) y despejando la irradiancia global, se obtiene:

$$G = (I_0 - I_{atm} - I_{ree}) (1-\rho)^{-1} \quad (4)$$

Esta expresión es la base de todos los modelos de estimación de la radiación global a partir de imágenes de satélite. Conocida la energía absorbida por la atmósfera, el albedo terrestre y asumiendo que la radiancia detectada por el sensor del satélite es debida a la energía reemitida por el sistema Tierra-Atmósfera, es posible estimar la radiación solar global incidente en un lugar determinado. Los diferentes modelos propuestos difieren, fundamentalmente, en las aproximaciones que utilizan para parametrizar los elementos que intervienen en esta ecuación de balance.

EL MODELO HELIOSAT

A principios de la década de los 80 (Cano, 1982) aparecen las primeras aproximaciones de la metodología denominada Heliosat. Este modelo pasó a denominarse posteriormente Heliosat-1 tras la propuesta de un modelo posterior, Heliosat-2, desarrollado durante los primeros años del presente siglo (Rigollier, 2000; Lefèvre et al., 2002). El fundamento de los modelos Heliosat es la identificación de nubes mediante el análisis de una serie temporal de imágenes. A partir de la información registrada por el satélite (nivel digital en cada píxel en un rango 0-255) ambos modelos establecen la relación existente entre los valores de referencia (ρ_g) e instantáneo (ρ) para el albedo del suelo y el albedo de las nubes (ρ_n). Esta relación define el denominado coeficiente de cobertura nubosa (n) que se describe mediante:

$$n = (\rho - \rho_g) (\rho_n - \rho_g)^{-1} \quad (5)$$

La mayoría de las mejoras recogidas en el modelo Heliosat-2 corresponden a modificaciones sobre el modelo de cielo claro utilizado en el modelo Heliosat-1 (Beyer et al., 1996; Beyer et al., 1997; Rigollier y Wald, 1998; Dribssa et al., 1999) mediante la introducción de algún parámetro descriptivo de la calidad atmosférica (p.e. índice de turbidez de Linke) y/o nuevos procedimientos para el cálculo albedos.

Para la determinación de la radiación global a partir del coeficiente de cobertura nubosa en cada píxel, los modelos Heliosat se basan en el ajuste de una relación empírica entre estos valores con datos piranométricos en los píxeles o localizaciones de estaciones radiométricas con datos disponibles. En este punto los ajustes propuestos son diferentes; Heliosat-1 propone una relación lineal (Diabaté et al., 1989; Raschke et al., 1991) entre el coeficiente de transparencia atmosférica (K_T) y el coeficiente de cobertura nubosa:

$$K_T = a n + b \quad (6)$$

Según Diabaté el valor de los coeficientes de ajuste a y b no depende de la localización geográfica pero sí de la hora del día en que se estima la radiación solar; sin embargo, el mismo autor reconoce que no existe explicación válida a la variación de estos coeficientes durante el día cuando su dependencia a lo largo del año y con la latitud son despreciables; en general se acepta que el modelo precisa ser ajustado localmente (Ramírez, 2001). Otros trabajos más recientes proponen distintos tipos de ajustes para esta relación: una única expresión independiente de la hora del día (Rubio, 2002), ajustes basados en técnicas de lógica difusa (Ramírez et al., 2000) y/o redes neuronales (Zarzalejo et al., 2005).

El método Heliosat-2 (Rigollier et al., 2004) surge como la evolución natural del modelo Heliosat-1. Siguiendo la misma filosofía que su predecesor, el nuevo modelo introduce una serie de mejoras que pueden agruparse en las siguientes categorías:

- Adopción de un nuevo modelo de cielo claro. Tras el estudio detallado de distintos modelos de cielo claro (Rigollier y Wald, 1999) el modelo utilizado por el método Heliosat-2 es el propuesto en 4th European Solar Radiation Atlas (ESRA, 2000). Este modelo introduce parámetros descriptivos de la calidad atmosférica en cada píxel a través del índice de turbidez de Linke.
- Utilización de coeficientes de calibración para el sensor. El nuevo modelo utiliza una serie de coeficientes de calibración diarios del sensor (canal visible) calculados según una nueva metodología desarrollada y validada durante el periodo

1985-97 (Rigollier, 2000). A partir de estos coeficientes y los valores del nivel digital registrado se estima un nuevo valor para la radiancia detectada por el sensor.

- Propuesta de una nueva formulación para el cálculo de los albedos. Las mejoras introducidas en el modelo Heliosat-2 están basadas, fundamentalmente, en la formulación explícita de radiancia y transmitancia atmosféricas según el modelo de cielo claro seleccionado.

Por otro lado, para calcular la irradiancia global horizontal este método propone una relación entre el índice de cielo claro (K_C), definido como el cociente entre la irradiancia global y la irradiancia de cielo claro, y el coeficiente de cobertura nubosa. Esta relación permite distinguir entre días despejados y cubiertos (Fontoynt et al., 1998) mediante la siguiente formulación:

$$\begin{aligned} n < -0.2 & , K_C = 1.2 \\ -0.2 \leq n < 0.8 & , K_C = 1-n \\ 0.8 \leq n < 1.1 & , K_C = 2.0667 - 3.6667n + 1.6667n^2 \\ 1.1 \leq n & , K_C = 0.05 \end{aligned} \quad (7)$$

Se puede apreciar que los valores de n y K_C no están normalizados; el primero es un parámetro estadístico que contiene información acerca de la cantidad y calidad de la cubierta nubosa, mientras que el segundo (puesto que la radiación de cielo claro puede ser inferior a la radiación extraterrestre en función de las características atmosféricas) contempla posibles efectos de reflexión/concentración de la radiación incidente.

METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO DE NUEVOS MODELOS

La propuesta de nuevos modelos de estimación de la irradiancia global horaria presentada en este trabajo está basada en:

- Introducción de modificaciones en el cálculo de la radiancia registrada por el satélite. Se utilizan los coeficientes de calibración del radiómetro facilitados por EUMETSAT (EUMETSAT, 2005) en lugar de los propuestos originalmente (Rigollier, 2000). Los coeficientes de calibración propuestos por Rigollier están disponibles tan solo durante el periodo 1985-1997.
- Aplicación de un filtrado iterativo de datos para el ajuste de modelos. Los modelos estadísticos para la estimación de la irradiancia solar a partir de imágenes de satélite son sencillos de implementar, sin embargo, precisan de datos de buena calidad para su ajuste. Las incertidumbres asociadas a la respuesta de este tipo de modelos provienen tanto de los datos del satélite como de la fiabilidad de las medidas terrestres. Una forma de mejorar los resultados de un modelo particular consiste en la elección apropiada de la muestra de entrenamiento (conjunto de datos con los que se ajusta el modelo). La técnica de selección de datos de entrenamiento utilizada está inspirada en los algoritmos de aprendizaje adaptativo comúnmente usados en las redes neuronales (Plutowski y White, 1993; Cohn et al., 1996). A partir de estas técnicas de aprendizaje se aplica un algoritmo iterativo para la selección de datos de entrenamiento de los modelos (Polo et al., 2006).
- Ajuste de modelos multirregresivos con inclusión de nuevas variables. Los nuevos modelos ensayados incluyen, además del coeficiente de cobertura nubosa otras variables explicativas.

Siguiendo estas premisas y a partir de los datos experimentales recopilados (serán descritos en el próximo apartado) se procede al ajuste y validación de dos nuevos modelos: el primero de ellos correspondientes a un ajuste K_T .vs. n y el otro con ajuste tipo K_C .vs. n . El ajuste de los nuevos modelos se realizará con una muestra aleatoria que contenga el 80% de los datos disponibles, reservando el 20% restante para la validación. El cálculo de los coeficientes de cobertura nubosa se ha realizado siguiendo la metodología Heliosat-1 (modelos K_T .vs. n) y metodología Heliosat-2 en los modelos K_C .vs. n (salvo los coeficientes de calibración del sensor) tomando este modelo como referencia de comparación.

DATOS EXPERIMENTALES

Para el ajuste y validación de los modelos estadísticos que permitan estimar la irradiancia solar a partir de imágenes de satélite se precisa tanto del conocimiento de datos piranométricos locales, como de las imágenes de satélite simultáneas correspondientes al área geográfica que se pretende estudiar.

Los datos de irradiancia solar global horaria utilizados en este trabajo corresponden a una treintena de estaciones de medida en la España peninsular. La localización geográfica de estas estaciones abarca un amplio rango de longitudes geográficas (2.20 °E a 8.42 °W), de latitudes (36.50 °N a 43.37 °N) y de altitudes sobre el nivel del mar (15 a 1090 m). La Tabla 1 muestra la ubicación detallada de estas estaciones.

Las imágenes utilizadas en este trabajo son imágenes de alta resolución correspondientes al canal visible del satélite Meteosat (HRI-VIS). Cubren el periodo comprendido entre el 1 de enero de 1994 y el 31 de diciembre de 2004. Originalmente son imágenes que contienen todo el campo de visión del satélite, esto es, el disco terrestre completo desde la localización orbital del satélite (0° Latitud, 0° Longitud). Tienen una resolución espacial de 2.5 x 2.5 km en el nadir y 30 minutos de resolución temporal en el canal visible (EUMETSAT, 2001). La Figura 1 muestra el área de trabajo elegida en para este trabajo; constituye un recorte de la imagen completa que difunde EUMETSAT (organismo europeo encargado de la gestión del satélite Meteosat).

Estación	Latitud	Longitud	Altitud (m)	Estación	Latitud	Longitud	Altitud (m)
Cádiz	36.50 °N	6.27 °W	15	Salamanca	40.95 °N	5.92 °W	803
Málaga	36.72 °N	4.48 °W	61	Barcelona	41.38 °N	2.20 °E	25
Almería (CMT)	36.85 °N	2.38 °W	29	Soria	41.60 °N	2.50 °W	1090
Almería (PSA)	37.09 °N	2.35 °W	497	Zaragoza	41.63 °N	0.92 °W	250
Granada	37.13 °N	3.28 °W	692	Lérida	41.63 °N	0.60 °E	202
Huelva	37.28 °N	6.92 °W	19	Valladolid	41.65 °N	4.77 °W	740
Murcia	38.00 °N	1.17 °W	69	La Rioja	42.43 °N	2.38 °W	365
Badajoz	38.88 °N	7.02 °W	190	Pontevedra	42.58 °N	8.80 °W	15
Ciudad Real	38.98 °N	3.92 °W	628	León	42.58 °N	5.65 °W	914
Albacete	39.00 °N	1.87 °W	674	Álava	42.85 °N	2.65 °W	508
Cáceres	39.47 °N	6.33 °W	405	Vizcaya	43.30 °N	2.93 °W	41
Valencia	39.48 °N	0.38 °W	23	Guipúzcoa	43.30 °N	2.03 °W	259
Toledo	39.88 °N	4.05 °W	516	Asturias	43.35 °N	5.87 °W	348
Madrid	40.45 °N	3.72 °W	680	La Coruña	43.37 °N	8.42 °W	67
Tarragona	40.82 °N	0.48 °E	44	Cantabria	43.48 °N	3.80 °W	79

Tabla 1. Localización geográfica de las estaciones radiométricas utilizadas.

Tras un exhaustivo análisis de calidad de los datos simultáneos (piranométrico / satelitario) recopilados se dispone de un total de 37000 registros horarios para el ajuste y validación de los nuevos modelos (Zarzalejo, 2006). A partir de estos datos se calculan los coeficientes de cobertura nubosa y, posteriormente, se separan las muestras de entrenamiento (80%) y validación (20%) de modelos.

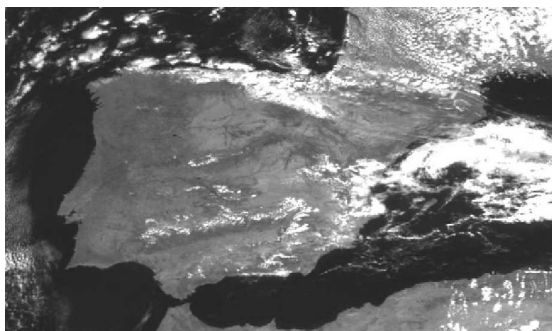


Figura 1. Ejemplo de imagen captada por el satélite Meteosat (© 2002 EUMETSAT).

NUEVOS MODELOS PROPUESTOS

La Figura 2 muestra para cada una de las estaciones disponibles la distribución de los coeficientes de cobertura nubosa mediante un diagrama de Box-Whiskers: para cada estación (de 1 a 30 en orden creciente de latitudes) se representa una caja que contiene el 50% de los valores centrales extendiéndose entre el primer y tercer cuartil (percentiles 25 y 75 respectivamente). Dentro de la caja se dibuja una línea que marca el percentil 50 (mediana), exteriormente se extienden unos brazos que abarcan todos los datos considerados estadísticamente aceptables. Fuera de estos brazos se marcan los outliers, valores que difieren del cuartil más próximo en más de 1.5 veces el intervalo intercuartílico (distancia entre el primer y tercer cuartil) y que pueden ser considerados estadísticamente no representativos.

El análisis de estas gráficas muestra una dependencia de la distribución del coeficiente de cobertura nubosa con respecto a la latitud (incremento del rango intercuartílico y del número de outliers) que nos sugiere:

- Utilización de una técnica de ajuste selectivo de los modelos que desprecie parte de los valores estadísticamente no representativos (Polo et al., 2006).
- Introducción en los modelos de alguna variable explicativa que recoja esta información; se elige la mediana local del coeficiente de cobertura nubosa como nueva variable explicativa.

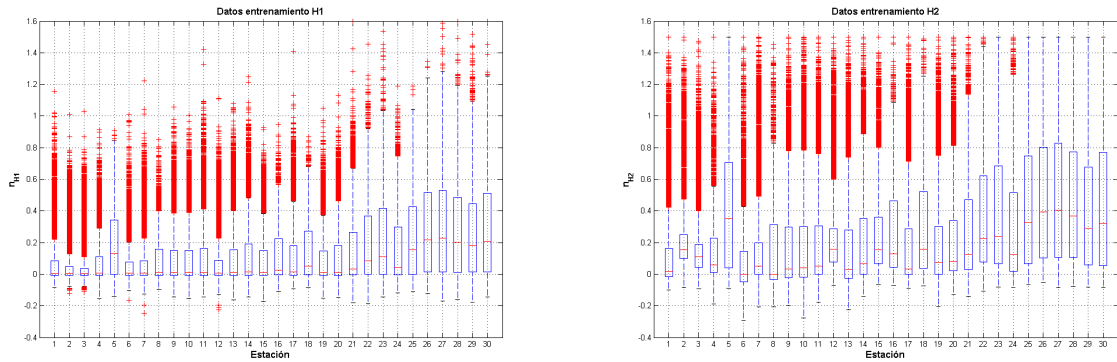


Figura 2. Diagramas Box-Whiskers para coeficiente de cobertura nubosa. Método Heliosat-1 (izda.) y Heliosat-2 (dcha.).

Los nuevos modelos propuestos responden a la expresión genérica:

$$K_* = a_1 n_{H_x} + a_2 \hat{h}_{H_x} + b \quad (8)$$

donde \hat{h} representa la mediana local del coeficiente de cobertura nubosa, K_* el índice de transparencia atmosférica o de cielo claro y los subíndices H_x la correspondencia con la metodología Heliosat-1 o Heliosat-2. El resultado obtenido mediante estos modelos se trunca teniendo en cuenta la siguiente restricción:

$$K_T \in [0.05, 0.95] \quad / \quad K_C \in [0.05, 1.20] \quad (9)$$

RESULTADOS

La Tabla 2 muestra los coeficientes de ajuste de los modelos propuestos tras la aplicación del entrenamiento selectivo. Se incluye también el coeficiente de determinación (R^2) de cada ajuste.

	a_1	a_2	b	R^2
MOD_1: $K_T = a_1 n_{H1} + a_2 \hat{h}_{H2} + b$	-0.936	0.064	0.707	0.897
MOD_2: $K_C = a_1 n_{H2} + a_2 \hat{h}_{H2} + b$	-0.764	0.216	0.933	0.872

Tabla 2. Coeficientes de ajuste y determinación de los modelos propuestos.

La validación de estos modelos sobre la muestra del 20% separada al efecto arroja los resultados (en términos de MBE y RMSE) que aparecen en la Tabla 3. Esta tabla incluye los resultados que, sobre la misma muestra de validación, proporciona el modelo de referencia Heliosat-2. Puede apreciarse como ambos modelos mejoran claramente los resultados que el modelo de referencia Heliosat-2 proporciona.

	MBE (%)	RMSE (%)
Heliosat-2 (ecc. 7)	-1.34	21.08
MOD_1	0.43	17.50
MOD_2	0.25	17.35

Tabla 3. Precisión de los modelos evaluados.

La aplicación de estos modelos sobre los coeficientes de cobertura nubosa de cada una de las imágenes tratadas permite la obtención de mapas de irradiancia global sobre superficie horizontal. La Figura 3 muestra el mapa promedio anual resultado de la aplicación del modelo **MOD_1** sobre los once años de imágenes tratados. Por otro lado, para cada uno de los píxeles de la imagen tratada puede extraerse la serie de valores horarios correspondientes, desde 1994 hasta junio de 2006, fecha en que el satélite Meteosat fue sustituido por el denominado MSG (Meteosat Second Generation).

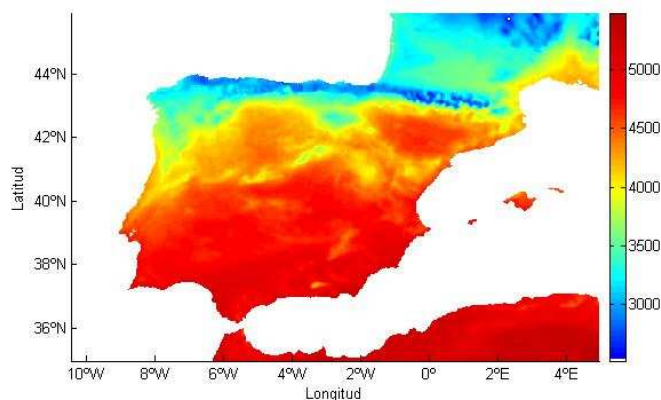


Figura 3. Irradiancia global media 1994-2004 (Whm^{-2} día).

CONCLUSIONES

La introducción de la mediana local del coeficiente de cobertura nubosa como variable explicativa en los nuevos modelos regionales propuestos constituye una de las aportaciones más novedosas de este trabajo. Respecto al modelo Heliosat-1, considerado como un modelo que necesita ser ajustado localmente, la inclusión de esta variable establece un sistema de autoajuste que le habilita como modelo de aplicación regional. Tanto para los modelos basados en la metodología Heliosat-1 como para los modelos de tipo Heliosat-2, el nuevo ajuste propuesto incrementa la precisión en la estimación de la irradiación solar sin aumento de la complejidad en el proceso de cálculo.

El análisis de los resultados obtenidos tras la validación de los modelos propuestos permite concluir:

- La inclusión de la mediana local como variable explicativa mejora la precisión de los resultados obtenidos con los nuevos modelos respecto al modelo de referencia Heliosat-2; cuantitativamente los nuevos modelos mejoran en cuanto a MBE (0.25~0.43% frente a -1.34%) y RMSE (17% frente a 21%).
- Los resultados obtenidos mediante la aplicación de los dos nuevos modelos son comparables entre sí en cuanto a precisión. Esto posibilita su aplicación por otros investigadores y/o en otros trabajos en función de la disponibilidad de datos (utilización de modelos tipo Heliosat-1 en caso de no disponer de valores del índice de turbidez de Linke, tiempo de computación,...).
- De los modelos propuestos, los modelos de tipo Heliosat-1 son los que menos mejoran, en cuanto a precisión, los resultados de los modelos de referencia. En cualquier caso, siendo el modelo más sencillo de implementar en cuanto al cálculo de las variables independientes que precisa, la diferencia es mínima. La inclusión de la mediana local del coeficiente de cobertura nubosa como variable explicativa posibilita la aplicación regional de este modelo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible gracias a la colaboración de José Montero y Santiago Enríquez del Centro Radiométrico Nacional - Instituto Nacional de Meteorología (CRN-INM).

REFERENCIAS

- Aitken, D. W. (2005). ISES whitepaper. Transitioning to a renewable energy future. ISES, Freiburg (Germany).
- Beyer, H. G., Costanzo, C. y Heinemann, D. (1996). Modifications of the Heliosat procedure for irradiance estimates from satellite images. *Solar Energy* 56, 207-212.
- Beyer, H. G., Hammer, A. y Heinemann, D. (1997). Satellite-derived irradiance statistics for Africa. *Solar Energy* 59, 233-240.
- Cano, D. (1982). Etude de l'enneuagement par analyse de séquences d'images de satellite. Application à l'évaluation du rayonnement solaire global au sol. Thèse 3ème Cycle, École Nationale Supérieure des Télécommunications, Paris (France).
- Chuvieco, E. (2002). Teledetección ambiental. Editorial Ariel, Barcelona (España).
- Cohn, D. A., Ghahramani, Z. y Jordan, M. I. (1996). Active learning with statistical models. *Journal of Artificial Intelligence Research* 4, 129-145.
- Dedieu, G., Deschamps, P. Y. y Kerr, Y. H. (1987). Satellite estimation of solar irradiance at the surface of the Earth and of surface albedo using physical model applied to Meteosat data. *Journal of Climate and Applied Meteorology* 26, 79-87.
- Diabaté, L., Moussu, G. y Wald, L. (1989). Description of an operational tool for determining global solar radiation at ground using geostationary satellite images. *Solar Energy* 42, 201-207.
- Dribssa, E., Cogliani, E., Lavagno, E. y Petrarca, S. (1999). A modification of the Heliosat method to improve its performance. *Solar Energy* 65, 369-377.
- ESRA (2000). The European solar radiation atlas. Vol. 2: Database and exploitation software. Editado por: Scharmer, K. y Reif, J. Les Presses de l'École des Mines, Paris (France).

- EUMETSAT (2001). The Meteosat Archive user handbook. V2.6. Meteorological archives and retrieval facility. EUMETSAT, Darmstadt (Germany).
- EUMETSAT. Meteosat VIS channel calibration information (v 23.11.05). www page EUMETSAT. <http://www.eumetsat.de> (23-11-2005).
- Fontoynt, M., Dumortier, D., Heinemann, D., Hammer, A., Olseth, J., Skartveit, A., Ineichen, P., Reise, C., Page, J., Roche, L., Beyer, H. G. y Wald, L. (1998). Satellite: a WWW server which provides high quality daylight and solar radiation data for Western and Central Europe. Ponencias de: 9th Conference on Satellite Meteorology and Oceanography, Paris (France). pp. 434-437.
- Gautier, C., Diak, G. y Masse, S. (1980). A simple physical model to estimate incident solar radiation at the surface from GOES satellite data. *Journal of Applied Meteorology* 19, 1005-1012.
- Goswami, Y., Kreith, F. y Keider, J. F. (1999). Principles of solar engineering. Taylor & Francis, Philadelphia (USA).
- Hay, J. E. (1993). Satellite based estimates of solar irradiance at the earth's surface--I. Modelling approaches. *Renewable Energy* 3, 381-393.
- Illera, P. (1995). A simple model for the calculation of global solar radiation using geostationary satellite data. *Atmospheric Research* 39, 79-90.
- Lefèvre, M., Albuissou, M y Wald, L. (2002). Description of the software Heliosat-II for the conversion of images acquired by Meteosat satellites in the visible band into maps of solar radiation available at ground level. Integration and exploitation of networked Solar radiation Databases for environment monitoring (SoDa Project). Contract Number: ST-1999-12245. pp. 1-434.
- McArthur, L. J. B. (1998). Baseline Surface Radiation Network (BSRN). Operations manual V1.0. Serie: World Climate Research Programme. Secretariat of the World Meteorological Organization, Geneva (Switzerland).
- Moser, W. y Raschke, E. (1984). Incident solar radiation over Europe estimated from METEOSAT data. *Journal of Climate and Applied Meteorology* 23, 166-170.
- Noia, M., Ratto, C. F. y Festa, R. (1993a). Solar irradiance estimation from geostationary satellite data: I. Statistical models. *Solar Energy* 51, 449-456.
- Noia, M., Ratto, C. F. y Festa, R. (1993b). Solar irradiance estimation from geostationary satellite data: II. Physical models. *Solar Energy* 51, 457-465.
- Plutowski, M. y White, H. (1993). Selecting concise training sets from clean data. *IEEE Transactions on Neural Networks* 4, 306-318.
- Polo, J., Zarzalejo, L. F., Ramirez, L. y Espinar, B. (2006). Iterative filtering of ground data for qualifying statistical models for solar irradiance estimation from satellite data. *Solar Energy* 80, 240-247.
- Ramírez, L. (2001). Estudio y desarrollo de métodos de cálculo de la radiación global diaria a partir de tres intervalos horarios. Aplicación al dimensionado de instalaciones solares fotovoltaicas. Serie: Colección Documentos CIEMAT. Editorial CIEMAT, Madrid (España).
- Ramírez, L., Mora, Ll. y Sidrach de Cardona, M. (2000). Utilización de la lógica difusa para el cálculo de la radiación global a partir de imágenes de satélite. Ponencias de: IX Congreso Ibérico de Energía Solar, Córdoba (España).
- Raschke, E., Stuhlmann, R., Palz, W. y Steemers, T. C. (1991). Solar radiation atlas of Africa. Editado por: Balkema, A. Rotterdam (The Netherlands).
- Rigollier, C. (2000). Vers un accès à une climatologie du rayonnement solaire: estimation de l'irradiation globale à partir d'images satellitales. Thèse de Doctorat en Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication, Université de Nice-Sophia Antipolis (France).
- Rigollier, C., Lefèvre, M. y Wald, L. (2004). The method Heliosat-2 for deriving shortwave solar radiation from satellite images. *Solar Energy* 77, 159-169.
- Rigollier, C. y Wald, L. (1998). Using METEOSAT images to map the solar radiation: improvement of the Heliosat method. Ponencias de: 9th Conference on Satellite Meteorology and Oceanography, Paris (France). pp. 432-433.
- Rigollier, C. y Wald, L. (1999). Selecting a clear-sky model to accurately map solar radiation from satellite images. Ponencias de: Remote Sensing in the 21th Century: Economic and Environmental Applications, Valladolid (Spain). pp. 131-137.
- Rubio, M. (2002). Caracterización y modelización de la irradiancia directa. Tesis Doctoral en Ciencias, Universidad de Almería (España).
- Tarpley, J. D. (1979). Estimating incident solar radiation at the surface from geostationary satellite data. *Journal of Applied Meteorology* 18, 1172-1183.
- Zarzalejo, L. F. (2006). Irradiancia solar global horaria a partir de imágenes de satélite. Serie: Colección Documentos CIEMAT. Editorial CIEMAT, Madrid (España).
- Zarzalejo, L. F., Ramírez, L. y Polo, J. (2005). Artificial intelligence techniques applied to hourly global irradiance estimation from satellite-derived cloud index. *Energy* 30, 1685-1697.

ABSTRACT: The increasing demand of information about solar energy resources represents a problem intractable (from the time and spatial point of view) considering just only radiometric measurements. Solar radiation estimation from geostationary satellite images makes up a suitable tool to solve this task, basically relative to spatial distribution and the availability of representative series. In this work a new collection of solar radiation maps from satellite images are presented. The methodology to estimate the solar irradiance applied is based on Heliosat method, which is modified with several new adjustments which increase its accuracy. To develop and validate this new approach data from thirty radiometric stations in the Iberian Peninsula, registered in the period 1994-2004, has been used together with simultaneous images from Meteosat satellite (visible channel).

Keywords: Estimation, Heliosat, Meteosat, Models, Satellite images, Solar energy.