

8 Conclusiones y Recomendaciones

A lo largo de este trabajo se ha venido presentando las conclusiones parciales más importantes de cada capítulo, ellas se recogen en su totalidad en esta sección.

La presente tesis ha conseguido cumplir ampliamente con los objetivos planteados. Se implementó y desarrolló un modelo estadístico para la determinación de la irradiación solar a partir de imágenes NOAA-AVHRR.

Para realizar el procesamiento de dichas imágenes, se implementó un algoritmo de detección e identificación de nubes, también se determinó el albedo superficial de las imágenes empleadas y finalmente se obtuvieron los mapas de irradiación solar, los cuales se compararon con datos de 7 estaciones de medición.

8.1 Revisión Bibliográfica

8.1.1 Atlas de irradiación solar

Se ha observado un desarrollo considerable en este sentido, partiendo de la aplicación de la ecuación de Angström-Prescott para mediciones en superficie, hasta llegar a las consideraciones astronómicas y meteorológicas del fenómeno.

Los primeros esfuerzos de elaboración de atlas de irradiación estaban limitados al procesamiento de datos de las estaciones de medición en superficie existentes (Perrin de Brichambaut, 1975; Kasten et al., 1984; Font, 1984; Generalitat Valenciana, 1987; EVE, 1992; Kasten et al., 1996) donde básicamente se utilizan datos de irradiación y la ecuación de Angström-Prescott para determinar la irradiación en las estaciones carentes de información. Esta información en general, se representa en una serie de mapas correspondientes a las estadísticas básicas de medias anuales y mensuales de irradiación solar y en los cuales se trazan las isóneas mediante interpolación.

Un avance importante en la elaboración de atlas de irradiación solar lo constituye el tratamiento estadístico de las series históricas de datos mediante el análisis de Fourier para obtener una función tipo de la irradiación solar en un lugar determinado (Coronas y Baldasano, 1984). Recientemente el análisis astronómico, geográfico y meteorológico de la irradiación solar en un lugar determinado, permite obtener la función tipo de irradiación solar (Santabárbara et al., 1996) complementando el análisis estadístico precedente.

La historia del “*Atlas de Radiación Solar Europeo*” se remonta al año de 1979 fecha en la cual aparece la primera publicación, una revisión y actualización del mismo, conduce en el año 1984 a la publicación de la segunda edición del atlas Kasten et al. (1984), y, para el año 1996 se realizan mejoras y actualizaciones a esta segunda edición del atlas, para publicar la tercera edición del atlas (Kasten et al., 1996).

Por otra parte en el proyecto “*ESRA - European Solar Radiation Atlas*” (Beyer et al., 1997), se presenta un método para la representación de mapas de irradiación solar y de otros parámetros meteorológicos de interés a través del tratamiento conjunto de datos procedentes de estaciones de medición en superficie e imágenes de satélites. Finalmente todas estas mejoras tanto en la metodología como en el procesamiento conjunto de datos de estaciones de medición en superficie y datos de satélites son introducidos en la última edición del “*Atlas de Radiación Solar Europeo*” (Aguar et al., 2000).

Con respecto a los Estados Unidos de América se tiene la base de datos de la NSRDB (Maxwell, 1998), en la que se tienen registros de 30 años de medición correspondientes al período 1961-1990 de estaciones de medición en superficie, y se presentan las tablas de datos y los mapas de irradiación media mensual y anual.

8.1.2 Procesamiento digital de imágenes de satélites

Para la determinación de la irradiación solar superficial mediante el procesamiento digital de imágenes de satélites, puede hacerse uso tanto de modelos físicos como estadísticos (Noia et al., 1993), bien sea que se trabaje en una o más bandas del espectro electromagnético o con imágenes de satélites heliosíncronos o geoestacionarios (Rafiqul Islam y Exell, 1996 y Diabaté et al., 1989).

La idea básica de los métodos consiste en relacionar los datos obtenidos en la imagen de satélite de acuerdo al sensor empleado y a la banda en consideración con la irradiación superficial, para ello pueden emplearse varios procedimientos, como puede ser el uso de una sola banda del espectro tal como el visible (Hiser y Senn, 1980; Nunez, 1987a; Cano et al., 1986; Diabaté et al., 1989) o de las bandas correspondientes al visible y al infrarrojo térmico (Rafiqul Islam y Exell, 1996).

Los modelos estadísticos se basan en una o más ecuaciones, para relacionar la irradiación solar medida por los piranómetros en las estaciones meteorológicas y el valor instantáneo del nivel digital registrado por la imagen de satélite para el píxel donde se encuentre localizada la estación de medición en cuestión, emplean para ello análisis de regresión y tratamientos estadísticos. La relación así obtenida se supone que es válida para estimar la irradiación solar en la superficie para toda la región de estudio en consideración.

La principal ventaja de los modelos estadísticos es su simplicidad y consecuentemente su operacionalidad. Ellos utilizan el valor digital proveniente directamente de las imágenes de satélite, y no necesitan convertir dichos valores en densidad de flujo ascendente de radiación solar emergente de la atmósfera.

Por otra parte, estos métodos normalmente no requieren información meteorológica complementaria (temperatura, humedad, etc.). La principal limitación de los modelos estadísticos es la necesidad de contar con datos de irradiación solar en superficie, lo que origina que sus resultados no puedan ser extrapolados a otras zonas geográficas.

Una dificultad común a los modelos estadísticos y físicos consiste en que la escala espacio-temporal de las imágenes de satélites son diferentes de las estaciones de medición en superficie. En particular, dos problemas se presentan cuando se comparan datos de satélites con datos de irradiación solar medidos en superficie.

El primer problema puede ser derivado por errores en la localización de las estaciones de medición en las imágenes de satélites. El segundo problema tiene que ver con la forma como se registran los datos, los datos de satélite corresponden a una medida instantánea sobre un pequeño ángulo sólido de visión, mientras que los datos registrados en las estaciones de medición son temporalmente integrados (usualmente una hora) y para un ángulo sólido de 2π .

Varios autores han tratado de dar respuesta a estos problemas, Tarpley (1979) considera que promediar datos de satélite sobre grandes áreas, es equivalente a promediar mediciones puntuales en superficie (e.g. piranómetros) sobre largos períodos de tiempo como consecuencia del movimiento de las nubes tanto en el tiempo como en el espacio.

Es decir las imágenes de satélites son discretas en el tiempo pero continuas en el espacio, mientras que las mediciones en superficie son discretas en el espacio pero continuas en el tiempo.

Los modelos estadísticos producen estimaciones de la irradiación solar en superficie que se encuentran como mejor aproximación alrededor del 10% de los valores medidos, por último, ellos pueden subestimar o sobreestimar los valores medidos, dependiendo de las consideraciones del modelo y particularmente de las condiciones atmosféricas.

Los modelos físicos están basados exclusivamente en consideraciones físicas, las cuales permiten expresar explícitamente los intercambios que tienen lugar entre la energía radiante y el sistema Tierra-Atmósfera.

Para ello hacen uso de modelos de transferencia radiativa (e.g. Lowtran). Las principales cantidades consideradas son: los coeficientes de esparcimiento y

absorción de los diversos componentes de la atmósfera limpia; el albedo y el coeficiente de absorción de las nubes; y el albedo superficial.

La principal ventaja que ofrecen los modelos físicos es, en comparación con los modelos estadísticos, su naturaleza general, ya que no dependen de una región en particular y pueden ser aplicados en cualquier parte. Adicionalmente, no necesitan datos de irradiación solar en la superficie terrestre.

Desafortunadamente, los modelos físicos requieren de información meteorológica adicional, para estimar varias de las variables relacionadas con la interacción de la radiación solar con la atmósfera.

Otro inconveniente que presentan los modelos físicos, es que los valores de nivel digital provenientes del satélite, necesitan ser convertidos en radiancia a partir de los coeficientes de calibrado del sensor. Como consecuencia de esto se requiere de una cuidadosa calibración y actualización de los coeficientes de los instrumentos.

Los modelos físicos suelen realizar estimaciones de la irradiación solar en superficie con errores alrededor del 5% en condiciones de cielo despejado y del orden del 15% en condiciones de cielo nublado (Gautier et al., 1980).

Otros autores refieren valores mayores, así tenemos que, por ejemplo para cielo despejado obtienen errores de 10%-15%, mientras que con cielo nublado el error en la estimación varía entre 17% y 39% (Laine et al., 1999).

8.2 Albedo

De las distintas metodologías existentes, se empleó la correspondiente a la determinación del albedo a partir de imágenes NOAA-AVHRR, específicamente se estudiaron los modelos propuestos para determinar albedo en el canal visible por Gruber et al. (1983), y por Kidder y Vonder Haar (1995), y el albedo a través de la combinación lineal de los canales 1 y 2 de las imágenes NOAA-AVHRR propuesto por Saunders (1990), Potdar y Narayana (1993), Valiente et al. (1995) y Russell et al. (1997).

La combinación lineal de los albedos visible e infrarrojo, propuesta por diversos autores, produce un albedo que es una situación intermedia entre los valores extremos reportados por el albedo visible y el albedo infrarrojo, respectivamente.

Varios autores coinciden en afirmar que el albedo planetario propuesto por Saunders (1990) produce buenos resultados para la Península Ibérica y para la zona de Cataluña (Sobrino et al., 1999 y 2000; Jorge y Pineda, 2001).

La metodología propuesta para obtener el mapa de irradiación solar en superficie permite obtener un albedo superficial de las imágenes NOAA-AVHRR, este albedo se determinó para cada uno de los años del períodos de estudio, posteriormente se determinó los valores promedios de albedo superficial obteniéndose el llamado año medio.

Es de hacer notar que los valores reportados por estos mapas de albedo planetario, son ligeramente inferiores a los reportados por otros autores, y a valores reportados en la bibliografía, sin embargo, producen valores útiles que pueden ser empleados como datos de entrada para la aplicación de modelos meteorológicos, debido a que la diferencia absoluta entre el albedo visible (Kidder y Vonder Haar, 1995) y el albedo de Saunders (1990) es del orden de $\pm 6\%$.

El procesamiento de los datos es mucho más simple y menos costoso que la aplicación de modelos más complejos para aumentar la precisión, en el mejor de los casos se obtiene un error alrededor de un 4%, que corresponde teóricamente al caso ideal de la simulación de las mejores regresiones del albedo planetario (Valiente et al., 1995).

8.3 Irradiación solar

En el presente trabajo se aplicó un modelo estadístico para la determinación de la irradiación solar a través de datos NOAA-AVHRR. Para ello se emplearon 1866 imágenes y datos de 33 estaciones de medición repartidas por toda la geografía de la Península Ibérica para el período comprendido entre los años 1998 y 2002.

Los coeficientes de calibración del modelo se determinaron a partir de los datos de 21 estaciones de medición en superficie (estaciones de calibración) obteniéndose coeficientes de determinación r^2 en promedio del orden de 0.50 para el modelo de regresión.

En cuanto a los coeficientes del modelo, se tiene que el parámetro b representa la transmisión atmosférica para cielo despejado y su valor se encuentra alrededor de 0.7 en promedio, se observa que es mucho más estable que el parámetro a que representa la pendiente de la curva, la cual esta altamente influida por las condiciones de nubosidad, presentando un valor medio del orden de -0.5 para los datos en base mensual y de -0.7 para los datos en base anual.

Los resultados del modelo previamente calibrado, se validaron mediante la comparación con datos de 7 estaciones de medición en superficie (estaciones de validación), independientes a las usadas para la determinación de los coeficientes, obteniéndose que las estimaciones del modelo se ajustan adecuadamente a las

mediciones, observándose en todos los casos un coeficiente de determinación r^2 aproximadamente de 0.7, un RMSE que varía entre 15.1% y 45.9%, con un valor promedio de 24.2% y un MBE que varía entre -11.6% y 28.5%, con un valor promedio de -3.8%.

Zelenka et al. (1999) consideran que para cualquier aplicación que requiera datos específicos para un lugar y tiempo determinado, el usuario debe confiar plenamente en los datos de satélite, más que en los datos obtenidos por los alrededores de las estaciones de medición, si estas se encuentran espaciadas más de 20-30 km una de otra.

En el caso de la Península Ibérica la separación entre estaciones es de 180 km, por lo que la aplicación de los datos obtenidos a partir de imágenes de satélite se hace imprescindible.

Los valores de irradiación solar horaria determinados por satélite, producen estimaciones espaciales que son mucho más precisas que aquellas obtenidas mediante interpolación en superficie de los datos de las estaciones de medición, especialmente en regiones donde la densidad de estaciones de medición es muy escasa y por ende se encuentran muy retiradas unas de otras.

Esto se debe principalmente, a que los datos obtenidos por satélite, al ser espacialmente continuos y obtener registros en diferentes bandas del espectro electromagnético, toman en cuenta variaciones espaciales y locales de la irradiación solar horaria, mientras que la interpolación en superficie de los datos de estaciones de medición no tiene en consideración.

Respecto a los valores de irradiación solar de la Península ibérica se obtuvo valores mínimos del orden de $3 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ para los meses de invierno ubicados normalmente en la zona norte de la Península Ibérica (cordillera cantábrica y pirineos), valores máximos del orden de $29 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ para los meses de verano ubicados normalmente en la zona suroeste de la Península Ibérica, y un valor medio de $15.1 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ para toda la zona de estudio para todos el período de estudio.

Adicionalmente se obtuvo la variación interanual de la irradiación solar, constatándose un aumento de la misma entre los años 1998 y 2000, cuando coincidentemente se registró un máximo de actividad solar, posteriormente en el año 2001 se registró una irradiación solar exageradamente baja que puede ser explicada debido a problemas en la adquisición de las imágenes por parte del satélite NOAA-14, en el año 2002 se registró un valor similar al del año 1998.

Estos resultados demuestran claramente que los datos de satélite pueden ser utilizados ampliamente para la obtención de mapas de irradiación solar superficial, para la detección e identificación de nubes y para la obtención del albedo

planetario sobre grandes superficies, con una resolución espacial alrededor de $1 \times 1 \text{ km}^2$ para el caso de que se empleen imágenes NOAA-AVHRR.

Mediante esta técnica, se pueden obtener mapas de irradiación solar detallados para varios años de registros de medición en superficie y datos de satélites, los cuales son muy apreciados por científicos, ingenieros y usuarios en el campo de la energía solar, tanto para la evaluación y dimensionamiento de edificaciones con tecnología solar como para su uso en agricultura y meteorología.

8.4 Recomendaciones

El modelo aquí descrito está completamente operativo para el uso de imágenes NOAA-AVHRR y de datos de irradiación solar en superficie. Los coeficientes de calibración fueron obtenidos y validados para todos los años de estudio. Se ha obtenido la irradiación solar horaria y diaria para todos los años desde 1998 hasta el 2002, además se generó un año medio con dichos resultados, el cual puede dársele cierto carácter climatológico.

Sería muy interesante aplicar esta metodología a otros años de manera de llegar a establecer los coeficientes climáticos del modelo en cuestión para la zona en estudio.

Para futuras investigaciones, se puede mejorar la estimación de la irradiación solar en superficie mediante la utilización de imágenes horarias de los satélites Meteosat, tanto de primera como de segunda generación, y así obtener el ciclo diario de irradiación solar y por consiguiente la irradiación solar diaria acumulada a lo largo del día.

Otro punto interesante, sería mediante la aplicación de un modelo físico a imágenes NOAA-AVHRR o Meteosat para la obtención de la irradiación solar superficial.

Respecto al tratamiento de imágenes NOAA-AVHRR se puede decir que su manejo ha estado orientado a una forma práctica y sencilla, por tanto es mejorable en varios aspectos, primeramente podría realizarse una re-georeferenciación de las imágenes dado que la técnica de puntos de control no resulta del todo precisa, generándose cierto traslape entre todas las imágenes resultantes, otros puntos importantes serían el implementar un método de corrección atmosférica y una corrección BRDF, e incluso una corrección por altura topográfica.

Otro punto interesante sería la obtención de las componentes normal y difusa de la irradiación solar global, aspectos importantes para el dimensionamiento de sistemas de aprovechamiento de la energía solar térmica y fotovoltaica.

Por último la utilización de imágenes de satélite permite obtener otros parámetros físicos importantes tales como, temperatura superficial, inercia térmica, emisividad, etc., por lo cual podría aprovecharse este sistema para determinarlas y así ampliar el espectro de este Atlas.

8.5 Publicaciones

Este trabajo sirvió para generar el *Atlas de Radiación Solar de las Islas Baleares mediante imágenes de Satélite*, Baldasano et al. (2003), http://dgener.caib.es/user/portalenergia/actuacions/atles_solar/atles_radiacio/Principa1.htm, encargado por la Consejería de Innovació y Energía de las Islas Baleares. Además de ser presentado en el *First International Symposium on Recent Advances in quantitative remote sensing*, Flores et al. (2002), realizado en Valencia, España.