

2 Revisión bibliográfica

El aprovechamiento de la energía solar depende del conocimiento de la cantidad y la distribución de la irradiación solar que incide en un lugar determinado y también de su variación temporal a lo largo del ciclo anual.

La irradiación solar que incide sobre una región determinada se suele representar en mapas mensuales y anuales de irradiación solar. El procedimiento más comúnmente usado para la confección de estos mapas es mediante la interpolación-extrapolación de series temporales de medidas de irradiación solar en superficie, realizadas mediante piranómetros en puntos geográficos específicos. Con posterioridad se ha venido desarrollando metodologías para utilizar los datos obtenidos mediante satélites en la determinación de la irradiación solar en superficie.

A continuación se expone el desarrollo cronológico de los Atlas de irradiación solar y de los trabajos de determinación de la irradiación solar mediante satélites.

2.1 Atlas de irradiación solar

En cuanto a la realización de atlas de irradiación solar, existen numerosas referencias al respecto, en donde se describe entre otras cosas, la base teórica y formulaciones pertinentes, así como el cálculo y procedimiento de elaboración de los mismos, en función de la técnica de tratamiento de datos y de representación de los resultados empleado por cada uno de los autores en cuestión. Una buena descripción de éstos atlas se puede encontrar en el trabajo realizado por Flores (2002).

A continuación se presenta un resumen de algunos de los trabajos realizados en el área en el ámbito de Europa, de España (y Comunidades Autónomas) y Portugal, y de Norteamérica. Es de hacer notar que en la práctica totalidad de ellos se ha empleado datos obtenidos de estaciones de medición en superficie, y que en los últimos años se han complementado con resultados obtenidos a partir de imágenes de satélites.

2.1.1 Europa

La historia del “Atlas de Radiación Solar Europeo” se remonta al año de 1979 fecha en la cual aparece la primera publicación (CCE, 1979), donde se utilizan datos de los

años 1966 a 1975, 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), los que principalmente estaban limitados al procesamiento de datos de las estaciones de medición en superficie existentes, donde básicamente se utilizaban datos de irradiación e insolación y la ecuación de Angström-Prescott (Angström, 1924) para determinar la irradiación en las estaciones carentes de información. Esta información se representa en una serie de mapas correspondientes a las estadísticas básicas de medias anuales y mensuales de irradiación solar global y en los cuales se trazan las isolíneas mediante interpolación.

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).

Además existen dos iniciativas para distribuir datos de irradiación solar a través de Internet:

El servidor HelioClim (www.helioclim.org), soportado y desarrollado por el Groupe Télédétection & Modélisation del Centre d'Energétique de la Ecole des Mines de Paris. La irradiación solar es determinada para todo el continente Europeo utilizando el método Heliosat-II, basado en el método heliosat station (Diabaté et al., 1989), actualmente mediante el uso de imágenes de satélite Meteosat de primera generación y en el futuro con el Meteosat de segunda generación (MSG). Sus estudios vienen realizándose desde 1985 pero su base de datos posee registros desde 1997 a la fecha. Dentro de los parámetros relevantes de irradiación solar se pueden obtener de forma directa la irradiancia global diaria y su media mensual, y a petición las fracciones horarias (3 valores o imágenes por día).

El servidor “Satel-Light project” (<http://www.satel-light.com>) financiado por la Unión Europea (Directorate General XII) desde 1996 a 1998. En este caso la imagen producida cada media hora por el satélite Meteosat de primera generación fue tomada como única fuente de información. El objetivo principal estuvo dirigido a mejorar, desarrollar y validar modelos para obtener datos precisos de irradiación solar a nivel de superficie. La irradiancia global horizontal es estimada utilizando la idea del método Heliosat, propuesto por Cano et al. (1986). Este método fue

modificado por Beyer et al. (1997) y posteriormente mejorado dentro del marco del proyecto Satel-Light. Cuenta con una base de datos correspondientes a dos años de imágenes de satélite: 1996 y 1997.

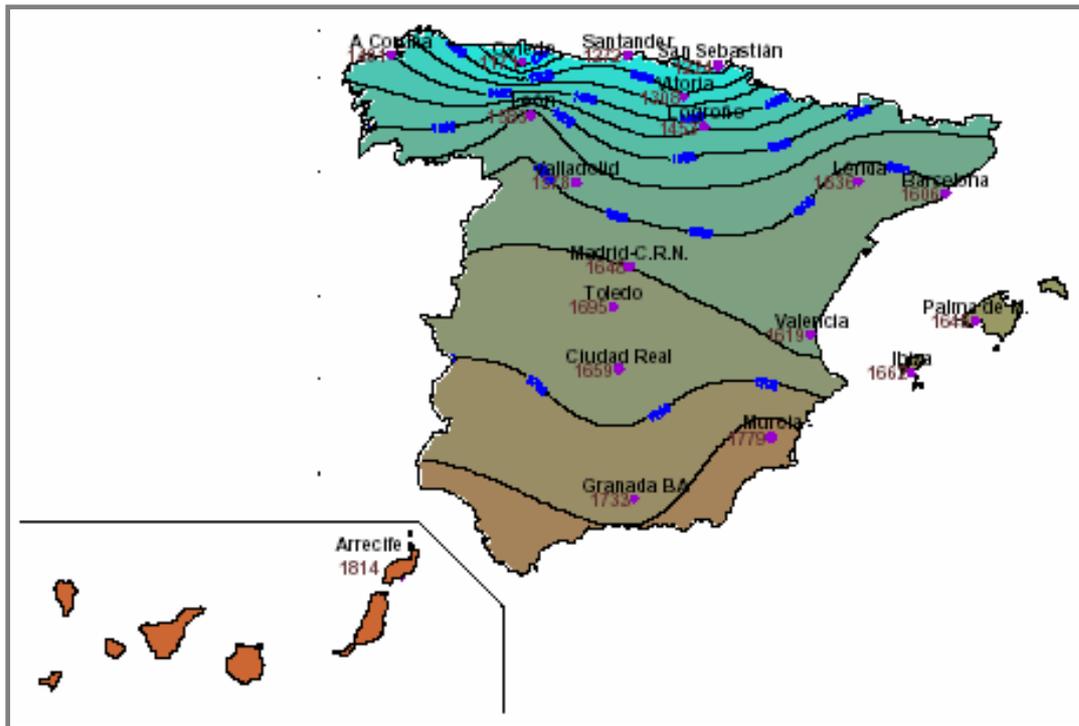
2.1.2 España y Comunidades Autónomas

A nivel Español la única referencia formal es el “Atlas de Radiación Solar de España” (Font, 1984) realizado por el Instituto Nacional de Meteorología de España y que hasta la fecha no ha sido actualizado. Este trabajo presenta mapas de isolíneas de valores medios, anuales y mensuales, de la irradiación solar global y de duración de la insolación directa (horas de sol). No se consideran los datos de insolación para deducir los de irradiación global, como propone Angström-PreScott (Angström, 1924), dada la complejidad climática de la Península Ibérica. Los datos considerados corresponden al período 1955-1980.

Además es posible encontrar mapas actualizados de irradiación solar en los “Informes de coyuntura” del Ministerio de Medio Ambiente, quién los elabora y publica mensualmente con el propósito de dar difusión a los datos estadísticos que están bajo su tutela, en este caso el Instituto Nacional de Meteorología. El análisis se realiza desde el punto de vista coyuntural, comparando los datos actuales con los datos correspondientes del periodo anterior. Como complemento y compendio de los informes mensuales se elabora además un documento de síntesis anual, que presenta la evolución de los valores medioambientales a lo largo del año. De esta forma se encuentran en su página web (http://www.mma.es/info_amb/estado_ma/coyunt/index.htm) los informes de síntesis de los años 1998 al 2001 y los informes mensuales de los años 2000 al 2003. En ellos en el apartado dedicado a la Vigilancia Atmosférica se recoge, entre otros, los datos de irradiación solar, mostrándose el mapa de “Distribución de la irradiación global media en España”, mensual o anual según corresponda. En la Figura 2.1 se muestra el mapa correspondiente al año 2001.

Como fuente de los datos se cita al Instituto Nacional de Meteorología pero no se dan mayores antecedentes a cerca de la obtención de dicho mapa. Además como se observa su resolución es limitada, lo que impide determinar los valores locales de la irradiación solar.

Por último Sidrach et al. (2002) presenta una metodología para la generación de años tipo de irradiación solar para la Península Ibérica a partir de imágenes del satélite Meteosat de primera generación. Utiliza el método Heliosat, imágenes correspondientes a los slots 21, 25 y 27 y datos de irradiación solar global horaria de quince estaciones de medición en superficie correspondientes a los años 1994, 1995 y 1996.



Fuente: Instituto Nacional de Meteorología

Figura 2.1: Irradiación Solar Global Media en España en el año 2001 ($10 \text{ kJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)

A nivel de Comunidades Autónomas Españolas se tiene:

Atlas de Radiación solar a la Comunitat Valenciana (Generalitat Valenciana, 1987). Este trabajo presenta los datos en base a tablas de medias mensuales y mapas mensuales, de la irradiación solar global y de duración de la insolación. Utiliza la formulación de Angström-Prescott (Angström, 1924) para obtener la irradiación en los puntos sin registros, y sigue la metodología de Martínez-Lozano (1984).

Atlas de radiación solar del País Vasco (EVE, 1992). Este trabajo presenta datos horarios y medios diarios de irradiación solar global y difusa, para cada mes del año. Se hace uso de la formulación de Angström-Prescott (1924) para obtener los valores de irradiación en aquellas estaciones carentes de registros. Los datos considerados corresponden al período 1930-1989, con un máximo de 7 años de medición de insolación.

Atlas de radiació solar a Catalunya (Baldasano et al., 1992, 1996 y 2001). En este trabajo se utilizan las series históricas de datos diarios de irradiación global incidente sobre superficie horizontal procedentes de estaciones de medición. Para el tratamiento de los datos se emplea el análisis de Fourier, lo que permite disponer de

una ecuación representativa de un año tipo, que da como resultado la irradiación solar global más probable para cualquier día del año. La validez del método fue comprobada al realizar el análisis de Fourier a los datos de irradiación solar de Barcelona (Coronas y Baldasano, 1984). La bondad de los resultados expuestos por estos métodos, permite la aplicación del método a datos de irradiación solar de toda España (Baldasano et al., 1988), y a datos de irradiación solar del territorio interior y periférico de Cataluña (Cremades y Baldasano, 1990).

Atlas de Radiación Solar de las Islas Baleares - Mediante imágenes de Satélite (Baldasano et al., 2003). En este trabajo se han obtenido los mapas de irradiación solar superficial diaria a partir de imágenes de satélite, mediante un modelo estadístico, usando imágenes NOAA-AVHRR y datos de irradiación solar de estaciones de medición en superficie. El modelo fue calibrado con datos e imágenes del año 1998 (Flores et al., 2001a y 2002), mientras que los mapas de irradiación solar diaria fueron obtenidos con imágenes de los años 1998 y 1999. Además se realiza una validación de los resultados comparando con valores de las estaciones de Palma de Mallorca, Mahón (Menorca) e Ibiza que aparecen en el European Solar Radiation Atlas (Kasten et al., 1996), en el Atlas de Radiación Solar Europeo (Aguiar et al., 2000), en el Atlas de Radiación Solar en España (Font, 1984), en el trabajo de Clar et al. (1987) y en el Atlas de Radiación Solar de Cataluña (Baldasano et al., 2001).

2.1.3 Portugal

En relación a Portugal se tiene el “Atlas do Ambiente” realizado por el Instituto Geográfico e Cadastral en el año 1975, <http://195.22.0.189/atlas/index.html>, en el cual se muestran un mapa de insolación media anual y uno de irradiación solar global media anual. Los datos utilizados corresponden al período entre 1931 y 1960 para los de insolación y entre 1938 y 1970 para los de irradiación.

2.1.4 Estados Unidos de América

Se tiene la base de datos de la National Solar Radiation Data Base (Maxwell, 1998), <http://www.nrel.gov>, 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.

Otros programas como el Atmospheric Radiation Measurement Program (Stokes y Schwartz, 1994), <http://www.arm.gov>, proveen información acerca de la adecuada parametrización de la nubosidad y la radiación solar para su aplicación en modelos climáticos y en modelos de circulación general atmosférica.

2.2 Procesamiento digital de imágenes de satélites para la estimación de la irradiación solar

Para la determinación de la irradiación solar por medio de imágenes de satélites pueden emplearse muchos procedimientos, que van desde la selección misma del tipo de imagen a procesar (sensor y satélite) como en lo que refiere al modelo a utilizar (empíricos o teóricos).

2.2.1 Tipo de satélite

Desde el punto de vista del tipo de satélite a utilizar existen en general dos tipos: los que hacen uso de satélites geoestacionarios y los que utilizan satélites heliosíncronos. Los satélites geoestacionarios proporcionan normalmente, de acuerdo al tipo de sensor utilizado, información en tres bandas, una en el visible, una en el infrarrojo medio y una en el infrarrojo térmico, tienen en general una baja resolución espacial (5 km) y una alta resolución temporal (una imagen cada 30 minutos), además debido a su gran distancia de la tierra, un satélite geoestacionario puede proporcionar imágenes de todo el disco de la tierra (ambos hemisferios) y, por esta razón, están dirigidos para la observación de fenómenos de gran radio de acción y/o de fenómenos que tienen una frecuencia o variabilidad muy alta, tal como los fenómenos meteorológicos. Los satélites heliosíncronos proporcionan información en un mayor número de bandas, tienen normalmente a lo menos una banda en el visible y otras en los infrarrojos próximo, medio, térmico y lejano, tienen una alta resolución espacial, entre 1 m (IKONOS-2) hasta 1.1 km (NOAA-AVHRR), y una baja resolución temporal, entre 6 horas (serie de satélites NOAA) hasta 16 días (Landsat), además debido a su relativamente corta distancia de la tierra, de alrededor de 800 kilómetros, proporcionan imágenes de una porción reducida de la superficie de la tierra, entre 185 km (Landsat) hasta 2.400 km (NOAA-AVHRR).

De ésta manera se han realizado numerosos estudios utilizando indistintamente satélites geoestacionarios o heliosíncronos. En el caso de los satélites geoestacionarios tenemos: el Meteosat de primera generación (Cano et al., 1986; Diabaté et al., 1989; Ben Djemaa y Delorme, 1992; Ceballos y Moura, 1997; Dubayah y Loechel, 1997; Olseth, J. A. y Skartveit, A., 1998; Hammer et al., 1999; Ineichen P. y Perez R., 1999; Dribssa et al., 1999 y Sidrach et al., 2002), el GMS (Nunez, 1987a; Otani, et al., 1994; Chung et al., 1998; Taniguchi et al., 2001) y el GOES (Hiser y Senn, 1980; Gautier et al., 1980; McNider et al., 1997; Brisson et al., 1999; Colle et al., 1999) e incluso el Meteosat Second Generation (Brisson et al., 1999; Mueller et al., 2002), operativo desde enero de 2004. En el caso de los satélites heliosíncronos se tiene dentro de la bibliografía consultada exclusivamente al NOAA-AVHRR (Rafiqul Islam y Exell, 1996; Laine et al., 1999 y Flores, 2002).

2.2.2 Tipo de modelo

Los modelos empleados para estimar la irradiación solar global a través de datos de satélites se pueden clasificar en dos categorías: estadísticos (o empíricos), que establecen relaciones entre los datos proporcionados por el satélite y las mediciones realizadas en superficie, y físicos (o teóricos), que hacen uso de modelos de transferencia radiativa para relacionar los datos de satélite con las medidas en superficie.

La idea de los métodos consiste en establecer los algoritmos de cálculo necesarios que permitan relacionar la información contenida en la imagen de acuerdo al tipo de sensor y la banda o bandas del espectro que se estén analizando, con la irradiación solar superficial, teniendo en cuenta todos los factores que intervienen en el proceso como pueden ser la nubosidad, la transmisividad atmosférica, la turbiedad atmosférica, etc. Adicionalmente entre los métodos de determinación de la irradiación hay los que trabajan con una sola banda del espectro como puede ser el visible o el infrarrojo térmico, o los métodos multiespectrales que emplean para sus cálculos la información procedente de dos o más bandas del espectro.

En la revisión de artículos realizada por Noia et al. (1993), se presentan los mejores modelos para la determinación de la irradiación solar global en la superficie terrestre usando datos de satélites geoestacionarios, empleando modelos estadísticos y físicos.

Posteriormente, Pinker et al. (1995) presentan una actualización de los métodos para obtener la radiación de onda corta a través de observaciones de satélites realizados a principio de los años 90, al igual que presentan un resumen del estado del tema y la viabilidad de los datos globales para la obtención de la irradiación solar global superficial.

Hiser y Senn (1980), relacionan la irradiación solar horaria con los minutos de iluminación y nubosidad horaria, registrada en seis estaciones de medición en superficie, correspondientes a diferentes regiones climáticas y de distinta calidad de aire de los Estados Unidos. Los satélites estacionarios o geoestacionarios SMS/GOES en el canal visible proporcionan imágenes de la iluminación y nubosidad horarias en el transcurso del día. Las relaciones entre nubosidad e iluminación registradas en las estaciones de medición y la irradiación total son usadas para transformar las medidas de iluminación del satélite en su equivalente a irradiación solar global. El procesamiento computacional de los datos permite obtener mapas mesoescales de iluminación y irradiación solar global. Es de hacer notar que factores como la nubosidad, latitud, estación del año, y la calidad del aire (turbiedad, aerosoles, etc.) son importantes en la determinación de la irradiación solar. En este caso las imágenes de satélites geoestacionarios proporcionan la distribución horaria de iluminación y nubosidad.

Gautier et al. (1980) presentan un modelo físico simple para la estimación de la irradiación solar incidente en la superficie terrestre usando datos de satélite GOES. El modelo toma en consideración la dispersión Rayleigh. La absorción de vapor de agua se introduce por medio de efectos climatológicos de la radiación de onda corta en el sur de Canadá, pero el énfasis principal se realiza sobre el efecto de las nubes. El albedo y la absorción de las nubes son derivados a partir de mediciones de brillo del satélite, bajo la suposición de que ambos se pueden relacionar linealmente. Esto constituye un tratamiento simple del problema, pero sin embargo produce estimaciones adecuadas de la irradiación solar. El error estándar en la estimación en días claros fue menor del 5% en promedio. Este índice estuvo alrededor del 14%-15% en días completamente nublados, y en menos de un 9% para la combinación de ambos casos.

Cano et al. (1986) presentan un modelo estadístico para la determinación de la irradiación solar global a través de imágenes de satélites meteorológicos (Meteosat de primera generación). Requiere de un mapa del albedo en superficie y de datos procedentes de estaciones de medición en superficie (piranómetros), para obtener los parámetros de regresión del modelo, los cuales son utilizados para predecir la irradiación solar global. Luego mediante la comparación de los datos del satélite con el mapa del albedo superficial determina el índice de nubosidad para cada punto de la superficie, con una resolución espacial de $5 \times 5 \text{ km}^2$.

Nunez (1987a) aplica un modelo lineal para la determinación de la irradiación solar global diaria en Tasmania (Australia), a partir del canal visible del GMS (Japanese Geostationary Meteorological Satellite) y de registros de tres estaciones de medición en superficie.

Diabaté et al. (1989), proponen una herramienta operacional para la determinación de mapas de irradiación solar incidente en la superficie de la tierra denominada "Heliosat station". Para esto trabaja en el rango visible de las imágenes de satélites meteorológicos geoestacionarios (Meteosat de primera generación, GMS, GOES). Y establece una ecuación lineal para la determinación del factor de transmisión atmosférica. La expresión obtenida permite calcular la irradiación solar global sobre una superficie horizontal. El modelo fue probado durante más de 30 meses consecutivos comenzando en enero de 1983, y es usado para la representación de los mapas horarios y diarios de irradiación solar global en el continente Europeo.

Por otra parte Rafiqul Islam y Exell (1996), proponen un sistema para la elaboración de mapas de irradiación solar global diaria a partir de imágenes NOAA-AVHRR. El sistema se basa en un método biespectral que permite obtener la irradiación solar a partir del análisis de las imágenes en la banda visible e infrarrojo térmico.

Determinan una expresión lineal que correlaciona el factor de nubosidad con la transmisividad atmosférica.

Ceballos y Moura (1997), utilizan el canal visible del satélite geoestacionario Meteosat-4 para determinar la irradiación solar en el noreste de Brasil, durante los años 1991 al 1994, para ello se basa en el modelo propuesto por Gautier (1980) para la determinación de la cubierta nubosa.

Más recientemente se vienen utilizando las imágenes de satélites para obtener datos de irradiación solar superficial para la aplicación de modelos de calidad de aire a escala regional (McNider et al., 1997), partiendo del modelo físico propuesto por Gautier et al. (1980) que permite obtener el albedo superficial a partir del nivel digital de las imágenes de satélites. Siguiendo este procedimiento, McNider determina mapas de irradiación solar superficial horarios sobre los Estados Unidos de América a partir de imágenes GOES con una resolución de $80 \times 80 \text{ km}^2$, de manera tal que cada píxel en la imagen corresponde a una celda de un modelo fotoquímico o meteorológico. Para probar la validez del método realizan comparaciones entre los valores de insolación obtenidos de las imágenes de satélites para el período comprendido entre el 31 de julio y el 8 de agosto de 1988, con los obtenidos en las estaciones de medición en superficie, encontrándose que no es de esperar obtener una excelente correlación en esta comparación, entre otras cosas debido al hecho de que la calibración y la precisión de los instrumentos de medición en superficie (piranómetros) y los sensores de las imágenes de satélites son diferentes, las medidas que registra el sensor GOES son casi instantáneas a diferencia de los piranómetros que realizan el promedio horario, además por la interpolación de pocas estaciones en superficie y por último por la baja resolución de la imagen en cuestión, que no permite discriminar adecuadamente los usos del suelo, tipo de vegetación etc. Pese a estas dificultades se pueden obtener resultados prácticos y útiles, de hecho consiguieron un mejor ajuste de píxel aumentando la resolución al doble y comparando con estaciones de medición en un radio de 20 km obteniendo un factor de correlación de 0.94.

Bishop et al. (1997) presentan 8-años (julio 1983 a junio 1991) de datos diarios y mensuales de irradiación solar global media para todo el planeta. Utilizan el modelo propuesto por Bishop y Rossow (1991) y datos del International Satellite Cloud Climatology (ISCCP).

Olseth y Skartveit (1998) aplican un modelo estadístico partiendo del índice de nubosidad propuesto por Cano et al. (1986), para la determinación de la irradiación solar global y difusa a través de datos de Meteosat de primera generación para altas latitudes en Escandinavia, para condiciones de suelo sin nieve. Para ello definen dos índices adicionales: el índice global de cielo despejado y el índice difuso de cielo

despejado. El primero se define como la relación entre la irradiación solar global actual (observada o derivada por satélite) y el promedio de la irradiación solar global para la condición de cielo despejado. El segundo se define de manera similar al primero, pero la relación es entre la irradiación solar difusa derivada a partir de la irradiación solar global utilizando el modelo de fracción difusa de Skartveit et al. (1998), y la irradiación solar global para cielo despejado.

Hammer et al. (1999) aplica un modelo estadístico para detectar el movimiento de estructuras de nubes a partir de imágenes de satélites, luego extrapolando el desarrollo temporal de la cobertura nubosa predice la irradiación solar con una antelación que va desde los 30 minutos hasta las 2 horas. Para la determinación de la irradiación solar utiliza el modelo propuesto por Diabaté et al. (1989).

Laine et al. (1999) aplican un modelo físico para la estimación de la radiación solar global instantánea y la insolación acumulada diaria a través de imágenes NOAA-AVHRR. Las estimaciones del satélite fueron comparadas con medidas de piranómetros en superficie de 6 estaciones de medición en Finlandia. El error estándar varía para la radiación solar global instantánea para cielo despejado entre 10% y 15%, mientras que con cielo nublado se encuentra entre 17% y 39%, mientras que el error estándar de la insolación acumulada diaria fue inferior al 7% en condiciones de cielo despejado y entre 11% y 19% en condiciones de cielo nublado.

Ineichen y Perez (1999) investigan la relación entre los valores digitales de las imágenes de satélite y la irradiación global, y sus componente directa y difusa, especialmente en situaciones de elevaciones solares bajas (menores de 20°). Se basan en los datos de los satélites geoestacionarios Meteosat de primera generación y GOES. Concluyen que la correlación lineal entre el índice de transmisividad global y la irradiación global (como el método Heliosat) es imprecisa para bajas elevaciones solares, y por ello para regiones en latitudes altas, por tal motivo desarrollan un modelo que relaciona directamente el índice de transmisividad dependiente de la elevación solar con el índice de nubosidad, el cual permite obtener la irradiación global, la directa y la difusa. Evalúan el modelo en dos regiones independientes (Albany, Estados Unidos y Lausanne, Suiza), y obtienen una precisión de 30%, 40% y 60 % para las componentes global, difusa y directa respectivamente.

Dribssa et al. (1999) presentan una modificación al método propuesto por Diabaté (1989). En este caso la ausencia de nubes sobre cada píxel es chequeada por el índice de nubosidad. Si no se detecta nube la irradiación global incidente es determinada usando un modelo de cielo claro, por el contrario, si se detecta nube la irradiación incidente es calculada siguiendo el algoritmo original. Comparan la irradiancia global estimada por el método original y la determinada por el método modificado con los valores medidos en 13 estaciones de superficie en Italia. Encuentran que el

error estándar global y el error medio mejoró en un 5.17 % y 8.03% respectivamente, respecto al método original.

Brisson et al. (1999) desarrollan un método físico para determinar la irradiancia solar superficial sobre el océano Atlántico. Utilizan imágenes de satélite GOES y preparan la metodología para cuando el MSG-1 (Meteosat Second Generation) entre en operación. Comparan los resultados con estaciones de medición representativas de condiciones marítimas, el método da un error medio entre 0,6 y 2,6% y un error estándar entre 15 y 17.6%.

Rigollier (2000) presenta un modelo de cielo claro que fue desarrollado para el Atlas de Radiación Solar Europeo (ESRA). El modelo ESRA es descrito y analizado con el propósito de ser usado para estimar la irradiación solar en superficie a partir de imágenes de satélite utilizando el método Heliosat. Por esta razón se compara el modelo ESRA con los modelos de cielo claro que han sido usados en el método Heliosat y con mediciones en superficie. El resultado muestra que el modelo ESRA es el más preciso y robusto. El error estándar en la estimación de la irradiación difusa horaria varía desde 11 Wh m^{-2} a 35 Wh m^{-2} para valores sobre 250 Wh m^{-2} .

Zelenka (2001) presenta un método para la determinación de la insolación sobre montañas cubiertas de nieve. Analiza la diferencia de reflectancias mínima y máxima en el comportamiento de píxeles cubiertos y libres de nieve sobre intervalos sinópticos y estacionales para las imágenes del satélite Meteosat de primera generación, y obtiene umbrales para los valores digitales de las imágenes de satélite, lo que permite una aceptable distinción entre cielos claros y nublados sobre regiones montañosas cubiertas de nieve.

Sidrach et al. (2002) presenta una metodología para la generación de años tipo de irradiación solar para la Península Ibérica a partir de imágenes del satélite Meteosat de primera generación. Utiliza el método Heliosat, imágenes correspondientes a los slots 21, 25 y 27 y datos de irradiación solar global horaria de quince estaciones de medición en superficie correspondientes a los años 1994, 1995 y 1996.

Perez et al. (2002), describe y valida un modelo híbrido para la determinación de irradiancias a partir de imágenes del satélite GOES. El modelo considerado usa una modelización física simple y algún grado de ajuste por observaciones de campo. Validan con 10 lugares de los Estados Unidos que presenten distintos comportamientos climáticos. Encuentran que el desempeño del modelo es mejor comparado con la práctica actual de modelización basada en el canal visible.

Hammer et al. (2003), insiste en la utilización del método HELIOSAT para determinar irradiancia solar a partir de imágenes de satélite, presenta una breve introducción de su metodología y muestra algunos ejemplos de aplicación: El uso de

la luz de día en edificios, la generación de series de tiempo correlacionadas de irradiación solar y temperatura como datos de entrada para simulaciones de sistemas de producción de energía solar y para predicción a corto plazo de irradiancia solar, la cual podría ser utilizada en el control de edificios inteligentes. Finalmente, analiza las mejoras potenciales esperadas de la próxima generación de los satélites meteorológicos Europeos Meteosat Second Generation (MSG).

Janjai et al. (2003), desarrolla un modelo para determinar la iluminancia global sobre superficies horizontales a partir de datos de satélites meteorológicos. Los datos usados para el desarrollo del modelo son la iluminancia global medida en cuatro estaciones de medición situadas en diferentes partes de Tailandia y los datos digitales en 8-bit son del canal visible del satélite GMS-5, todo esto para períodos de 1 a 2 años. El modelo utilizado es semejante al propuesto por Cano (1986), con la excepción que el índice de nubosidad se correlaciona con la iluminación global en vez de la irradiación solar global. El comportamiento de este modelo fue validado usando un conjunto de datos de iluminación independientes encontrándose que la iluminación global calculada con el modelo se ajusta adecuadamente con los datos obtenidos de medidas superficiales, con un RMSE de un 7.0%.

Rigollier et al. (2004), presenta el método Heliosat-2 que convierte las observaciones realizadas por satélites meteorológicos geostacionarios en estimaciones de irradiación global superficial. Esta nueva versión integra el conocimiento obtenido de varias aplicaciones del método original Heliosat y sus variaciones en una forma coherente y sencilla. Se basa en las mismas leyes físicas pero los datos de entrada del método son radiancias calibradas, en vez de valores digitales extraídos del sensor. Esta mejora permite utilizar modelos para los procesos físicos que ocurren en la atmósfera y así evitar el uso de correlaciones empíricas y por consiguiente la medición de la irradiación solar en superficie. El cálculo del albedo superficial y del albedo nuboso es determinado mediante formulaciones explícitas del camino de radiancia y de la transmitancia de la atmósfera. El método Heliosat-2 es aplicado a imágenes Meteosat de primera generación de Europa para los meses de enero de 1995, abril de 1995 y julio de 1994. Para validar utilizan medidas piranométricas realizadas por treinta y cinco estaciones de superficie, encontrándose que su comportamiento es similar al obtenido con el método Heliosat-1 encontrado en la literatura.

Mueller et al. (2004), presenta dentro del Proyecto Europeo Heliosat-3 una nueva metodología para la obtención de la irradiación solar en superficie. Esta nueva metodología utilizará modelos de transferencia radiativa (RTM) y datos de parámetros atmosféricos extraídos del satélite Meteosat Second Generation (MSG) (nubes, ozono, vapor de agua) y del satélite ERS-2/ENVISAT (aerosoles, ozono). El artículo se enfoca principalmente a los beneficios que conlleva el uso de los RTM en

la modelación de diferentes situaciones atmosféricas y en la posibilidad de proveer datos de radiancia espectralmente desarrollada, lo que permitiría obtener una mejor información para la planificación y gestión de sistemas de energía solar, el cálculo de la radiación fotosintética activa, el índice de UV y la iluminación.

Grau (2005), describe una nueva metodología para la obtención de las cubiertas terrestre y nubosa mediante el análisis temporal (1999-2002) de series de imágenes Meteosat de primera generación. Obtiene una imagen base de la cobertura terrestre (sin nubes) para la zona de Cataluña, que utiliza como parámetro de entrada en la obtención de la irradiación solar superficial mediante un modelo similar al propuesto por Cano (1986), calcula el índice de nubosidad y correlaciona con datos de estaciones de medición en superficie para la zona de Cataluña e Islas Baleares. Obtiene un coeficiente de determinación para datos horarios superior al 85% y para datos diarios de un 94%. Reporta un RMSE entre los valores modelados y los valores medidos de alrededor de 1.6%.

2.3 Comparación entre datos de satélites y mediciones de estaciones de superficie para la determinación de la irradiancia solar

Las mediciones de piranómetros son hechas en lugares geográficos específicos de la superficie de la tierra, siendo difícil considerar la representatividad de ellas en grandes áreas sobre todo cuando la densidad geográfica de las estaciones de medición es baja. Algunas investigaciones de la variabilidad de la irradiación solar sobre la superficie de la tierra han sido realizadas, a este respecto tenemos que:

Perez et al. (1994), en el caso de una comparación de datos diarios, consideran que si las estaciones de medición en superficie se encuentran espaciadas más de 50 km, los datos obtenidos por satélite son más precisos que los obtenidos a partir de interpolación de los datos de las estaciones.

Posteriormente Perez et al. (1997a) realizan una nueva comparación, esta vez sobre datos horarios. Consideran 12 estaciones de medición en superficie del sureste de los estados de Nueva York y Massachussets y datos del satélite geoestacionario GOES-8. Respecto a los datos de las estaciones de medición interpolan y extrapolan para obtener el campo de irradiación solar horaria en todo el dominio. Calculan el error estándar (RMSE) “relativo” como una función de la distancia a la estación de medición. Encuentra que el RMSE aumenta asintóticamente con la distancia y que persiste un error relativamente grande (15%) a distancias muy cortas (4 km). En el caso de los datos de satélite utilizan un modelo estadístico basado en el método

propuesto por Cano (1986) y obtienen un RMSE de un 24.5%. Comparan ambos procedimientos y encuentran que, el RMSE del satélite corta al de los valores interpolados en 27 km, lo que significa que para distancias mayores a este valor los datos obtenidos a partir de satélite son más precisos que los datos obtenidos por extrapolación.

Siguiendo con el trabajo anterior Perez et al (1997b) muestran que la determinación de la irradiancia solar basada en datos de satélite puede proveer más información y de mejor calidad (precisión) que los métodos tradicionales.

Zelenka et al. (1999) intentan cuantificar los diferentes componentes del RMSE que se produce al estimar la irradiancia horaria a partir de los datos de satélites geostacionarios. Realizan un procedimiento similar al realizado por Perez et al. (1997a) y obtienen un RMSE de un 23%. Encuentran que una parte importante de este error es atribuible a errores de medición por parte de los instrumentos de superficie y, de manera más importante a microvariaciones del campo de la irradiación. Terminan recomendando el uso de estimaciones de irradiancias mediante datos de satélite, incluso cerca del lugar de medición (estaciones).

2.4 Conclusiones sobre el estado actual del tema

Para mayor claridad se ha tabulado y ordenado cronológicamente la información discutida en este capítulo (Tabla 2.1).

Se observa un desarrollo notable, partiendo de la aplicación de la ecuación de Angström-Prescott (1924) para mediciones en superficie, la cual permite obtener la irradiación solar en un lugar determinado, a partir de los datos de insolación (Kasten et al., 1984 y 1996; Font, 1984; Generalitat Valenciana, 1987; EVE, 1992), pasando por el tratamiento estadístico de los datos de irradiación solar (Baldasano et al., 1992, 1996 y 2001), hasta llegar a las consideraciones astronómicas y meteorológicas del fenómeno y la aplicación conjunta de mediciones en superficie con datos de satélite (Beyer et al., 1997; Aguiar et al., 2000; Flores, 2002).

Cabe hacer notar que para el caso de España, desde el año 1984 no se ha realizado ninguna actualización al “Atlas de Radiación Solar de España” (Font, 1984), para Portugal la situación es más crítica, ya que la única referencia data de 1975.

En relación al aprovechamiento de datos de satélite puede decirse que constituye una mejora notable a los procedimientos utilizados hasta la fecha, pudiendo emplearse una metodología alternativa para la determinación e interpretación de la irradiación solar en la superficie terrestre, lo que ha permitido abordar la elaboración de atlas de

irradiación solar desde una perspectiva mucho más amplia y precisa. Su utilización esta justificada por el hecho de que la red de estaciones de medición es muy dispersa (principalmente por razones económicas), y porque los métodos de extrapolación tradicionales no logran reflejar los aspectos microclimáticos locales de las variables de estudio (Perez et al., 1994, 1997a, 1997b; Zelenka et al., 1999).

Es de hacer notar que los mejores resultados se obtienen mediante la aplicación conjunta de datos de medición en superficie y de imágenes de satélites. Un trabajo en esta dirección lo constituye el proyecto ESRA - European Solar Radiation Atlas, en el cual se trabaja con imágenes de satélites del Continente Europeo para el período comprendido entre 1985-1988, conjuntamente con 10 años de registros de estaciones de medición de irradiación solar en superficie, para obtener los mapas de medias mensuales de irradiación solar global con una resolución espacial de $10 \times 10 \text{ km}^2$.

Respecto al tipo de satélite y sensor a utilizar la elección depende de varios aspectos: por una parte de la resolución espacial, temporal y espectral del binomio satélite-sensor y de la disponibilidad de los datos para la zona y período de tiempo considerados. En el caso de la irradiación solar cuya variación temporal es muy alta (ciclo diario) la elección quedará supeditada a los satélites con la mayor resolución temporal, esta es la razón por la que la mayoría de los estudios realizados utilizan satélites geoestacionarios o el satélite heliosíncrono NOAA. Además interesa la mayor resolución posible y la mayor cobertura de observación, de modo de reproducir los aspectos locales de la irradiación solar sobre la mayor área posible. En el caso particular de España el satélite geoestacionario Meteosat de primera generación proporciona 18 imágenes diarias (una cada 30 minutos) con una resolución espacial de 5 km en el nadir para todo el continente Europeo y Africano, por su parte los satélites NOAA proporcionan 3 imagen diurnas (una cada 6 horas) con una resolución espacial de 1,1 km en el nadir con una swath width (anchura de pase) del orden de 3000 km, suficientes para cubrir (dependiendo del pase) toda la Península Ibérica.

Un avance importante lo constituirá el MSG-1 (Meteosat Second Generation), lanzado en agosto de 2002 y actualmente en operación, el cual mejorará notablemente la resolución espacial (1 km para el canal visible) y reducirá a la mitad la resolución temporal (15 minutos).

La metodología estándar empleada consiste en relacionar los datos obtenidos de 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, respecto a estos existen principalmente dos tipos: los modelos estadísticos y los modelos físicos.

Los modelos estadísticos relacionan la irradiación solar medida por los piranómetros en las estaciones meteorológicas con el valor instantáneo del nivel digital registrado por la imagen de satélite para el píxel donde se encuentra localizada la estación de medición en cuestión, emplean para ello análisis de regresión y tratamientos estadísticos. La relación así obtenida se asume válida para estimar la irradiación solar en la superficie para toda la región de estudio.

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. 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.

Los modelos estadísticos producen estimaciones de la irradiación solar global en superficie que se encuentran alrededor del 10% de los valores medidos, por último, 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. Las principales variables consideradas para el cálculo 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 generalidad, ya que no dependen de una región en particular y pueden ser aplicados en cualquier lugar. Adicionalmente, no necesitan datos de irradiación solar en la superficie terrestre. Desafortunadamente, los modelos físicos requieren de información meteorológica adicional (vapor de agua, ozono, presión atmosférica, etc.) para estimar algunas 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 global 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 entre 10% y 15%, mientras que con cielo nublado el error en la estimación varía entre 17% y 39% (Laine et al., 1999).

Varios autores han estudiado la precisión de los modelos tanto estadísticos como físicos, para obtener la irradiación solar global superficial a través de imágenes de satélite, comparándolo con los valores obtenidos utilizando técnicas tradicionales para el procesamiento de datos de estaciones de medición en superficie.

Tabla 2.1: Resumen de la revisión bibliográfica ordenado cronológicamente

Año	Autor	Descripción	Lugar	Método	Satélite	Resolución (km)	Nº de estaciones	Período	RMSE
1975	IGC	Atlas	Portugal	Interpolación de superficie	n/a	n/a		1931-1970	
1979	CCE	Atlas de radiación solar 1ª Ed.	Europa	Interpolación de superficie + Angström	n/a	n/a		1966-1975	
1980	Gautier		Canadá	Físico	GOES		3	1978	9%
1980	Hiser y Senn		USA	Estadístico	SMS-GOES		6		
1984	Kasten et al.	Atlas de radiación solar 2ª Ed	Europa	Interpolación + Angström	n/a	n/a	340	1966-1975	
1984	Font	Atlas de radiación solar	España	Interpolación	n/a	n/a	45	1955-1980	
1986	Cano		Europa	Estadístico (Heliosat)	Meteosat	5	89	1982	
1987	Nunez		Australia	Estadístico	GMS				
1987	GV	Atlas de radiación solar	Valencia	Interpolación + Angström	n/a	n/a	14	1 a 5 años	
1989	Diabaté		Europa	Estadístico (Heliosat 1)	MFG, GMS y GOES	5		1983-1985	
1992	Baldasano et al.	Atlas de radiación solar	Cataluña	Series de Fourier + interpolación	n/a	n/a	22	1971-1987	
1992	EVE	Atlas de radiación solar	País Vasco	Interpolación + Angström	n/a	n/a	4	1930-1989	
1996	Rafiqul y Excell		Tailandia	Estadístico biespectral	NOAA-AVHRR	1	2	1992	12.9%
1996	Baldasano et al.	Atlas de radiación solar	Cataluña	Series de Fourier	n/a	n/a	65	1971-1993	

Año	Autor	Descripción	Lugar	Método	Satélite	Resolución (km)	Nº de estaciones	Período	RMSE
1996	Kasten et al.	Atlas de Radiación 3ª Ed	Europa	Interpolación + Angström	n/a	n/a	340	1966-1975	
1997	Bishop		Global	Físico	ISCCP		-	1983-1991	
1997	McNider et al.			Físico (Gautier, 1980)	GOES	80	-		
1997	Cevallos y Moura		Brasil	Físico (Gautier, 1980)	Meteosat-4	25	5	01/1991 y 01/1994	>20%
1997	Beyer et al.	Solar radiation Atlas	Europa	Interpolación + imágenes de satélite	n/a	n/a			
1997	Satel-Light	Servidor de mapas vía web	Europa	Estadístico (Heliosat 1)	MFG	5	5	1996-1997	4%
1998	Olseth y Skartveit		Escandinavia	Estadístico (Cano, 1986)	MFG	5	9	1995	13%
1998	Maxwell	Servido de mapas vía web	USA	Interpolación	n/a	n/a	29	1961-1990	
1999	Brisson		Atlántico	Físico	GOES y MSG	10	26	1997-1998	18%
1999	Dribssa		Italia	Estadístico + cielo claro	MFG	5	13	1996	9%
1999	Ineichen y Perez		USA y Suiza	Estadístico	MFG y GOES	8-10	3	1994-1995	30%
1999	Laine		Finlandia	Físico	NOAA-AVHRR	1	6		25%
1999	Hammer et al.	Predicción	n/a	Estadístico (Diabaté, 1989)	MFG	5			10%
2000	Aguiar et al.	Atlas de Radiación Europeo	Europa			10		1981-1990	
2000	Rigollier	Teórico	Europa	Cielo claro	MFG	5	7	1994-1998	20%
2001	Zelenka	Teórico	Suiza	Series temporales	MFG	5	n/a		
2001	Baldasano et al.	Atlas de radiación solar	Cataluña	Interpolación + Series de Fourier	n/a	n/a	83	1971-1997	

Año	Autor	Descripción	Lugar	Método	Satélite	Resolución (km)	Nº de estaciones	Período	RMSE
2002	Perez et al.		USA	Híbrido	GOES	5	10	1999-2000	14%
2002	Sidrach		España	Estadístico (Heliosat 1)	MFG	5	15	1994-1996	8%
2002	Flores		Cataluña	Estadístico	NOAA-AVHRR	1	11	1998	125%
2003	Janjai		Tailandia	Estadístico	GMS-5	5	4	1999-2000	7%
2003	Hammer		Europa	Físico (Heliosat 2)	MFG y MSG	10		1996-1997	
2003	Baldasano et al.	Atlas de radiación solar + imágenes de satélite	Islas Baleares	Estadístico	NOAA-AVHRR	1	2	1998-1999	
2004	Mueller			Físico (Heliosat 3)	MSG y ERS-2	1	5		4%
2004	Rigollier		Europa	Físico (Heliosat 2)	MFG y MSG	5	35	1994-1995	
2005	Grau		Cataluña	Estadístico	MFG	5	14	1999-2002	2%
2005	Helioclim	Servidor de mapas vía web	Europa	Estadístico (Heliosat 1 y 2)	MFG y MSG	5	55	1997 a la fecha	17%