

# 1 Introducción

## 1.1 Marco General

Casi toda la energía de que disponemos proviene directa o indirectamente del Sol. La energía solar está constituida por la porción de irradiación solar que es interceptada por la Tierra y constituye, como recurso energético terrestre, la principal fuente de energía renovable a nuestro alcance.

La Comisión de las Comunidades Europeas en sus objetivos estratégicos para 2000-2005 (UE, 2000a) presenta a la energía como un factor esencial de la competitividad y del desarrollo económico de Europa.

La seguridad de abastecimiento de energía de la Unión Europea y la protección del medio ambiente han adquirido una gran importancia estos últimos años. En particular, la firma del Protocolo de Kioto de 1997 sobre el cambio climático reforzó la importancia de la dimensión medioambiental y del desarrollo sostenible en la política energética mundial y comunitaria. La dependencia energética exterior de la Unión Europea crece continuamente, como indica el *Libro Verde* (UE, 2000b), en la actualidad un 50% de sus necesidades energéticas son cubiertas con productos de importación (75% en el caso de España) y si nada cambia este factor de dependencia alcanzará el 70% antes de 2030, lo que debilitaría todavía más la posición de la UE en el mercado energético internacional.

La energía obtenida a partir de las fuentes de energía renovables desempeña una función capital en la diversificación y la sostenibilidad de las fuentes de energía y en la lucha contra el cambio climático. En el *Libro Blanco de las Energías Renovables* (UE, 1997) por el que se establece una estrategia y un plan de actuación comunitarias propone “Alcanzar, en el 2010, una penetración mínima del 12% de las fuentes de energías renovables en la Unión Europea”, lo que supone doblar el actual 6% que dichas energías tienen en el consumo interior bruto de energía en la UE.

Como soporte a ésta política de penetración de las energías renovables, se ha aprobado la *Directiva 2001/77/CE relativa a la promoción de electricidad generada a partir de fuentes de energía renovables en el mercado interior de electricidad* (Diario Oficial L 283 de 27.10.2001) con fecha de transposición 27 de octubre de 2003; con la que los estados miembros de la UE tendrán el compromiso de conseguir

para el año 2010 una cuota de 22.1% de electricidad generada a partir de fuentes de energía renovables.

En España, el *Plan de Fomento de las Energías Renovables* ha asumido el mismo objetivo global fijado por la Unión Europea en el Libro Blanco de las Energías Renovables, es decir que al menos el 12% de la demanda total de energía en España para el año 2010, sea cubierto por fuentes de energía renovables (IDAE, 1999). Lo que al igual que en la UE implica la práctica duplicación de la participación actual de las energías renovables en España (6.3% del consumo de energía primaria en 1998, 6.2% considerando año hidráulico, eólico y solar medio).

Las energías renovables son inagotables, limpias y se pueden utilizar de forma autogestionada (aprovechamiento en el mismo lugar en que se producen). Además tienen la ventaja adicional de complementarse entre sí, favoreciendo la integración entre ellas. Una de estas fuentes de energía renovable es la energía solar en sus diferentes aplicaciones.

Respecto al aprovechamiento de la energía solar, se puede hablar de dos tipos de sistemas: los que la convierten en electricidad mediante células fotovoltaica y los que la utilizan para la producción de energía térmica (agua caliente sanitaria y calefacción). También existe la posibilidad de hacer un uso más racional de la irradiación solar, la luz natural y las condiciones climatológicas característicos de cada emplazamiento mediante lo que se ha llamado Arquitectura Bioclimática. Adicionalmente se puede producir frío con el uso de energía solar como fuente de calor en un ciclo de enfriamiento por absorción.

Las aplicaciones agrícolas son muy amplias. Los invernaderos solares permiten obtener mayores y más tempranas cosechas, los secaderos agrícolas consumen menos energía si se combinan con un sistema solar, y las plantas de purificación o desalinización de aguas pueden funcionar sin consumir ningún tipo de combustible.

Los hornos solares son una aplicación importante de los concentradores de alta temperatura (del orden de 4.000 °C). Estos hornos son ideales para investigaciones que requieren altas temperaturas en entornos libres de contaminantes, por ejemplo en la investigación de materiales.

La energía solar fotovoltaica es una de las formas de aprovechamiento de las energías renovables más recientes y tiene un campo de aplicación muy amplio con clara ventaja sobre otras alternativas, pues al carecer los paneles de partes móviles, resultan totalmente inalterables al paso del tiempo, no contaminan ni producen ningún ruido, no consumen combustible y no necesitan un gran mantenimiento. Su utilización va desde productos de consumo, como relojes y calculadoras, hasta la electrificación de zonas rurales sin suministro convencional, como casas aisladas o

instalaciones agrícolas y ganaderas, pasando por las señalizaciones terrestres y marítimas, las comunicaciones o el alumbrado público.

A pesar de todo, de momento, la participación actual de la energía fotovoltaica en el balance energético europeo es todavía marginal. Su coste de inversión es más elevado que el de otras energías alternativas convencionales, aunque experimenta una rápida reducción y se espera que en los próximos años el mercado europeo crezca a un ritmo de entre un 15 y un 25% anual.

La energía solar térmica ha conseguido en los últimos años un grado de madurez que tanto técnica como económicamente la convierte en una buena opción. En este sentido, la aplicación de la energía solar para producir agua caliente sanitaria es una de las posibilidades que ofrece una rentabilidad más atractiva. Los últimos avances y líneas de investigación se han centrado en la mejora de los materiales y elementos de control, regulación y seguimiento del funcionamiento de las instalaciones.

En España a finales de 2001 la superficie de colectores solares de baja temperatura instalados era del orden de 454.500 m<sup>2</sup>, en su mayor parte para la producción de agua caliente sanitaria (ACS) en el sector doméstico y turístico. Mientras que la potencia instalada asociada a aplicaciones de energía solar fotovoltaica era de 15.6 MWp, la que corresponde a las instalaciones que se han venido realizando desde el inicio del desarrollo de la energía solar fotovoltaica, en el ámbito comercial a partir de los años ochenta.

Para cumplir con el objetivo general del plan de fomento de las energías renovables, se prevén nuevas aplicaciones y crecimientos muy importantes en las áreas de la energía solar. En nuevas aplicaciones se estima la instalación de 200 MW de energía solar termoeléctrica y 135 MW de energía solar fotovoltaica. Paralelamente para la energía solar térmica de baja temperatura se prevé la instalación de 4.500.000 m<sup>2</sup>, entre los años 1999 y 2010.

A pesar de su abundancia, del orden de 4.500 veces la energía anual que se consume, el aprovechamiento de la energía solar está condicionado principalmente por dos aspectos: de la intensidad de la irradiación solar recibida por la Tierra, la que su vez depende de los ciclos diarios y anuales y de la latitud del lugar de aplicación sobre la superficie terrestre, y de las condiciones climatológicas y meteorológicas imperantes.

Así el aprovechamiento de la irradiación solar como fuente de energía requiere del conocimiento de la cantidad y distribución de la irradiación solar que incide en un lugar determinado y de su variación temporal a lo largo de los ciclos anual y diario.

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 además los datos obtenidos mediante satélites en la determinación de la irradiación solar en superficie.

En el caso de España existen algunos trabajos relacionados con la determinación de la irradiación solar (Font, 1984; EVE, 1992; Baldasano et al., 1992 y 1996; GV, 1997 y Baldasano et al., 2001), los que en general utilizan la interpolación de superficie como método de generalización de los datos de irradiación solar obtenidos por medio de piranómetros, sólo los últimos (Sidrach, 2002; Baldasano et al., 2003) hacen uso de datos de satélites aunque con ciertas limitaciones respecto a los períodos de tiempo estudiados (menor que 3 años), a la cobertura espacial de las zonas de estudio (Cataluña, Islas Baleares) y a la resolución espacial de los datos utilizados ( $5 \times 5 \text{ km}^2$ ).

Adicionalmente los datos de irradiación solar tienen una gran aplicación en modelos de simulación ambiental, los que a menudo requieren de datos climáticos como variables de entrada. Mientras los datos de precipitación y temperatura se encuentran usualmente disponibles, hay a menudo una escasez de datos representativos de irradiación solar. La irradiación solar es uno de los parámetros principales que gobiernan el balance energético de la Tierra y los procesos de fotosíntesis y de evaporación de humedad superficial. Muchos modelos de ciclo del carbón, agua o flujos de energía en los ecosistemas terrestres requieren datos de irradiación solar como datos de entrada. En ausencia de estrés hídrico, la disponibilidad de radiación fotosintéticamente activa (PAR) puede llegar a ser el factor climático limitante que actúe dentro de las restricciones establecidas por la disponibilidad de nutrientes. Los datos de irradiación solar son necesarios, entre varias aplicaciones, para: determinar las emisiones biogénicas en los inventarios de emisiones, determinar algunos parámetros atmosféricos relevantes (estabilidad atmosférica, altura de mezcla convectiva, etc.) en los modelos mesoescalares y modelos de dispersión, y para la modelación de reacciones fotoquímicas en los modelos de calidad de aire.

Es por todo esto que la determinación de Atlas climáticos de irradiancia solar de la Península Ibérica, actualizado en cuanto a los datos y metodologías utilizadas con la mayor y más precisa información disponible, es de la mayor importancia y objetivo de este trabajo.

## **1.2 Trabajos previos en el Laboratorio de Modelización Ambiental**

El Laboratorio de Modelización Ambiental de la UPC, ha venido realizando desde el año 1987 para el Instituto Catalán de Energía los mapas climáticos de radiación solar de Cataluña. Para procesar los datos aplica principalmente la metodología descrita por Baldasano et al. (1992 y 1996) y Santabàrbara et al. (1996), basada inicialmente en el análisis de los armónicos de las series de Fourier a los datos medidos de irradiación solar en estaciones de superficie. Esto constituye un tratamiento estadístico muy sólido de los datos y ha permitido obtener la tercera versión del “Atlas Climático de Radiación Solar de Cataluña” (Baldasano et al., 2001). La primera alcanzaba datos desde el año 1964 hasta el año 1989, la segunda versión se extiende hasta el año 1993 y esta tercera hasta el año 1997.

Así mismo, se ha realizado un primer trabajo para la determinación de mapas irradiación solar global superficial horaria puntal (de las 14 horas) mediante imágenes de satélite (Flores y Baldasano, 2001c; Flores, 2002 y Flores et al., 2002), en él se utilizó un modelo estadístico, e imágenes NOAA-AVHRR (imágenes correspondientes al sensor AVHRR del satélite NOAA) del año 1998, su ámbito de aplicación se centró en Cataluña y las Islas Baleares.

## **1.3 Objetivos**

Los objetivos que se han fijado para esta tesis doctoral, se orientan a:

Objetivo general:

**Determinación de Atlas climático de irradiación solar a partir de imágenes del satélite NOAA para la Península Ibérica**

Obtención de un Atlas climático de irradiación solar en superficie para la Península Ibérica, se adoptará un modelo estadístico, el cual utilizará imágenes NOAA-AVHRR, conjuntamente con datos de irradiación solar de estaciones de medición en superficie. Se analizarán 5 años de datos con la finalidad de dar a los resultados el carácter de climatológicos.

La zona de estudio estará limitada entre  $-10^{\circ}\text{O}$  y  $5^{\circ}\text{E}$  de longitud y entre  $35^{\circ}\text{N}$  y  $45^{\circ}\text{N}$  de latitud, lo que abarca principalmente la Península Ibérica y las islas Baleares.

Se obtendrán datos horarios puntuales, diarios, mensuales y anuales, lo que permitirá estudiar la evolución de la irradiación solar global en su ciclo anual.

La resolución espacial del Atlas estará determinada por la resolución espacial proporcionada por el satélite utilizado, en éste caso alrededor de un kilómetro cuadrado (en el nadir).

Se evaluarán distintos aspectos de la metodología a utilizar, tanto desde el punto de vista de los datos de entrada (cantidad y calidad) como la forma de cálculo de los distintos parámetros (índice de nubosidad, transmisividad atmosférica, etc.). Se desarrollará un sistema de gestión de imágenes de satélite y datos de irradiación solar en superficie, el cual realizará los procesos de calibración y validación del modelo, así como la determinación de la irradiación solar global superficial.

Objetivos particulares:

### **Implementar el sistema para la determinación de la irradiación solar**

Se implementará un sistema de gestión de imágenes de satélite y datos de irradiación solar de estaciones de medición en superficie para la determinación de la irradiación solar en superficie.

Se utilizará el programa Envi y el lenguaje de programación IDL, se realizarán automáticamente todas las operaciones de tratamiento de imágenes de satélite, desde la calibración de las bandas originales, pasando por la detección de nubes y terminado con la corrección geométrica de las mismas, conjuntamente con la creación y manejo de una base de datos de irradiación solar y factores de transmisión atmosférica. El sistema correlacionará los datos y obtendrá los coeficientes de calibración para la zona de estudio, para luego determinar la irradiación solar correspondiente. Además el sistema validará los resultados con datos de irradiación solar independientes.

El sistema estará construido modularmente, para lo cual se desarrollarán los algoritmos necesarios para la gestión de cada componentes y la determinación de los parámetros necesarios para el cálculo de la irradiación solar.

El sistema utilizará un modelo estadístico y será desarrollado para el uso de imágenes NOAA-AVHRR conjuntamente con datos de irradiación solar de estaciones de medición en superficie.

## **Calibrar y validar el modelo estadístico**

El modelo estadístico será calibrado confrontando los datos que se obtendrán de las imágenes NOAA-AVHRR con los datos de irradiación solar que serán obtenidos de estaciones de medición en superficie.

Las imágenes NOAA-AVHRR serán suministradas por el CREPAD (Centro de Recepción, Proceso, Archivo y Distribución de Imágenes de Observación de la Tierra). Los datos de irradiación solar serán suministrados por el INM de España quién posee una red de 33 estaciones de medición en superficie para la zona de estudio y período de tiempo considerados.

Cabe mencionar que el período de estudio considerado fue determinado por la disponibilidad de imágenes NOAA-AVHRR, ya que el CREPAD posee una base datos desde junio de 1997, motivo por el cual el período de estudio se fijó desde enero de 1998 a diciembre de 2002, es decir 5 años de datos.

En este proceso se determinarán los coeficientes del modelo, los que serán utilizados para determinar la irradiación solar global. Posteriormente los resultados obtenidos serán validados comparando éstos con datos de campo independientes de irradiación solar global, para tal efecto, las estaciones de medición en superficie serán divididas en dos grupos, uno de los cuales será utilizado para calibrar el modelo y el otro para validarlo.

## **1.4 Estructura del documento**

El documento está estructurado en una serie de Capítulos y Anexos, desarrollados de la manera siguiente:

En el Capítulo 1 se hace una pequeña referencia a los trabajos previos realizados en el Laboratorio de Modelización Ambiental, los objetivos que persigue esta tesis doctoral y la estructura del documento.

En el Capítulo 2 se realiza la investigación bibliográfica, mostrando el estado del conocimiento tanto en la realización de atlas de irradiación solar a través de datos de estaciones de medición en superficie hasta la determinación de la irradiación solar a través de imágenes de satélites, mostrando la evolución que han tenido dichas metodologías.

En el Capítulo 3 se describe el modelo que se utilizará para la determinar la irradiación solar global superficial a través de imágenes de satélite. Se presenta la

formulación del modelo, así como el esquema operativo del mismo, el cual se estructurará de forma modular: los algoritmos para la obtención del índice de nubosidad, para la detección de nubes, y por último para la determinación de la irradiación solar global superficial.

En el Capítulo 4 se describen los procesos de filtrado y análisis realizados a los datos de irradiación solar provenientes de estaciones de medición en superficie.

En el Capítulo 5 se describen las características de los satélites NOAA y del sensor AVHRR, el número de imágenes utilizadas y las características de las mismas.

En el Capítulo 6 se presenta la metodología para la obtención del albedo a partir de las imágenes de satélite, las correcciones radiométricas y geométricas realizadas, y la detección de nubes implementada.

En el Capítulo 7 se presentan los resultados de irradiación solar en superficie obtenidos a partir del modelo, se presentan además los coeficientes de calibración obtenidos y los resultados de la validación realizada.

En el Capítulo 8 se presentan las conclusiones y recomendaciones obtenidas en el desarrollo de este trabajo.

En el Capítulo 9 se presenta la bibliografía empleada para la elaboración del trabajo.

En el Anexo A se presentan los aspectos básicos de la radiación solar, la declinación solar, la ecuación del tiempo, etc.

En el Anexo B se describe la zona de estudio, la geografía, la orografía y topografía, la hidrología, el clima y la vegetación.

En el Anexo C se presenta el glosario.

En el Anexo D se presenta el resumen de los datos de irradiación solar en superficie.

En el Anexo E se presentan los coeficientes de calibración mensuales y anuales para todos los años y para cada estación de calibración, para datos diarios y horarios (puntuales).

En el Anexo F se presentan los resultados de la validación del modelo, para todos los años y para todas las estaciones de validación.

En el Anexo G se presentan los mapas de irradiación solar diaria para los años 1998 al 2002, primero la media anual y luego las medias mensuales de cada año.