

## Laboratorio de Física del medio Ambiente

### Medida y análisis de datos de Radiación Solar

#### Objetivo

Conocer y manejar dispositivos de medida de radiación solar. Calibrado de los dispositivos de medida. Análisis de datos de radiación solar integrada.

#### Datos experimentales

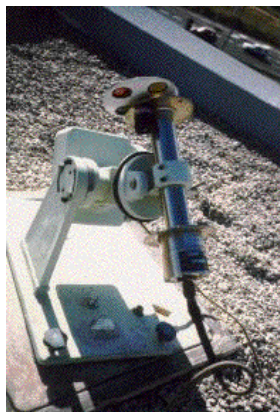
Valores de irradiancia solar global y directa obtenidos mediante distintos piranómetros y un pirheliómetro.

#### Instrumentación

La medida de la irradiancia directa integrada en incidencia normal se realiza mediante un pirheliómetro Eppley NIP, en la banda espectral de 285 nm a 2500 nm. El detector de este instrumento es una termopila de cobre-constantán de 3/8 pulgadas, con compensación de temperatura en el rango de  $-20^{\circ}\text{C}$  a  $+40^{\circ}\text{C}$ . Está provisto de un tubo limitador de radiancia con una apertura de  $5^{\circ} 43'$ , y montado sobre un seguidor solar de

tipo ecuatorial de la misma casa Eppley. La precisión de este instrumento está estimada por el fabricante en un 2%. El pirheliómetro se recalibra periódicamente en el Instituto de Energías Renovables (IER) del CIEMAT. La última calibración mostró una deriva en la constante de calibrado de 1.1%.

Las medidas tomadas con estos instrumentos se realizan de forma rutinaria. Los datos almacenados son el resultado de la integración cada 10 minutos de la irradiancia proporcionada por los sensores. El instrumento de registro y almacenamiento temporal de los datos es un datalogger modelo LI-1000 de la casa LI-COR.



La irradiancia global integrada sobre plano horizontal se mide mediante piranómetros de la casa Kipp – Zonen (CM-6 o CM-11). El rango de medida es de 285 -2500 nm. El sensor es una termopila de tipo Moll, protegida por una doble cúpula de vidrio de ángulo de visión  $2\pi$  sr. Según la OMM (Organización Meteorológica Mundial) estos piranómetro pertenece al grupo de piranómetros de campo.

La irradiancia global sobre planos verticales se mide mediante piranómetros Kipp-ZonenCM-11, con el mismo rango del piranómetro anterior (285 - 2500nm). Los piranómetros CM-11, son similares a los CM-6, pero no presentan dependencia respecto a la inclinación por lo que pueden utilizarse para medir tanto en posición horizontal como inclinada. Según la OMM estos piranómetros pueden considerarse dentro del grupo de los estándar secundarios.

## Laboratorio de Física del medio Ambiente



#### Desarrollo experimental

La práctica de radiación solar consta de dos partes diferenciadas. La primera de ella consiste en un calibrado de radiómetros o instrumentos de medida de radiación. La segunda de ella consiste en un análisis de datos experimentales de radiación.

### I. Calibrado de Radiómetros

#### Objetivos

Comparar las medidas de radiación solar obtenidas con diferentes tipos de piranómetros entre sí, y con las de un piranómetro de referencia (PSP), para obtener los coeficientes de calibración correspondientes.

#### Introducción y metodología

La calibración de piranómetros para su uso en el medio ambiente debe hacerse por comparación directa en el exterior con un piranómetro de referencia. En la medida en que sea posible, todos los piranómetros y el de referencia deben funcionar uno junto a otro durante períodos completos de alrededor de una o dos semanas en diferentes épocas del año. Los valores diarios de calibración se obtienen utilizando el periodo completo diario de luz solar. El valor final de la calibración es la media de los valores diarios. La media final no debe incluir los valores correspondientes a situaciones prolongadas de lluvia, nieve o cielo totalmente cubierto de nubes bajas. Sin embargo, el valor final debe representar una variedad de situaciones de cielo descubierto y de nubosidad, condiciones semejantes a las que usualmente se encuentran en la utilización del piranómetro.

#### Análisis de datos

Dicho análisis implica el cálculo para periodo y para cada instrumento de la regresión lineal ( $y = a + b x$ ;  $y = b x$ ) que se obtiene a partir de los valores medios en diez minutos correspondientes a las medidas registradas en el *datalogger*. En la ecuación de regresión,  $x$  representa el valor de irradiancia del piranómetro correspondiente, siendo  $y$  el valor de irradiancia del piranómetro de referencia.

Para realizar la calibración se utiliza un piranómetro (PSP), cuyo factor de calibrado es  $9.06 \mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$ . Este piranómetro junto con el resto de piranómetros que se calibren se situaran juntos,

## Laboratorio de Física del medio Ambiente

conectándose a un datalogger, configurado previamente para medidas de irradiancia (valores medios) en un periodo de 10 minutos. Cuando se configure el datalogger hay que tener en cuenta, que este tipo de sensores son lineales, ello implica que en el polinomio de quinto grado de calibración del datalogger:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4 + a_5x^5$$

únicamente nos interesa el factor multiplicativo  $a_1$ . Para obtener este factor haremos:

$$a_1 = \frac{1}{\text{Constante} \cdot \text{de} \cdot \text{calibrado}}$$

donde la constante de calibrado debe darse en las unidades adecuadas, teniendo en cuenta que el voltaje se mide en unidades de 0.1 V y la intensidad en unidades de microamperios. En caso de no disponer del coeficiente de calibrado, se utiliza un valor de  $a_1$  de  $10000 \text{ Wm}^{-2}/0.1 \text{ V}$ .

### Presentación de Resultados

Para realizar la calibración se proporcionará a los estudiantes un fichero de datos, con datos experimentales procedentes de calibrados de distintos radiómetros, cuyo análisis deben realizar.

Descripción fichero de calibrado *Calibrado 1*:

Columna 0: Fecha (AMMDD)

Columna 1: Hora solar (hhmm)

Columna 2: PSP (Constante de calibrado  $9.06 \mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$ )

Columna 3: CM11 (Constante de calibrado  $4.98 \mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$ )

Columna 4: Albedómetro (Constante de calibrado  $4.55 \mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$ )

Columna 5: Albedómetro (Constante de calibrado  $4.55 \mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$ )

Hay que tener en cuenta que el albedómetro (compuesto por dos CM-11, uno hacia arriba y otro hacia abajo) se le dio la vuelta al cabo de una semana de medidas aproximadamente.

Columna 6: Fecha en la que empiezan a medir las células fotoeléctricas

Columna 7: Hora solar en la que empiezan a medir las células fotoeléctricas

Columna 8: Célula fotoeléctrica 1 ( $a_1 = 10000 \text{ Wm}^{-2}/\mu\text{A}$ )

Columna 9: Célula fotoeléctrica 2 ( $a_1 = 10000 \text{ Wm}^{-2}/\mu\text{A}$ )

**Ojo!:** Las células fotoeléctricas varían las unidades respecto al resto de los sensores

Como resultado de esta primera parte de la práctica se debe dar los coeficientes de calibrado (en las unidades adecuadas y con los errores correspondientes) de los distintos piranómetros utilizados.

## II. Análisis de datos de radiación

### Objetivos

Analizar datos de radiación solar global.

## Laboratorio de Física del medio Ambiente

### Introducción y metodología

Cuando la radiación solar atraviesa la atmósfera terrestre, una parte de la energía radiante se ve atenuada por dispersión y otra parte por absorción. Ambas modifican la distribución espectral de la energía extraterrestre. La radiación dispersada se denomina *radiación difusa*. Una parte de esta radiación difusa vuelve al espacio y una parte llega al suelo. La radiación que llega al suelo directamente en la dirección del vector tierra-sol se denomina *radiación directa*. (Figura 1).

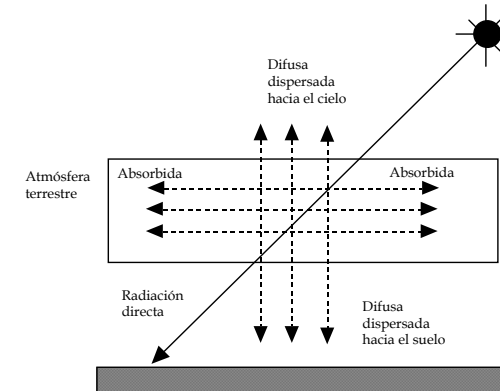


Figura 1. Distribución de la radiación procedente del sol.

La irradiancia espectral directa sobre una superficie normal a los rayos del sol se expresa por

$$I_{n\lambda} = (I_{sc\lambda} / \rho^2) \tau_{\lambda} \quad (1)$$

donde

$I_{n\lambda}$  = irradiancia espectral directa en la dirección normal

$I_{sc\lambda}$  = irradiancia espectral extraterrestre

$\rho = (r/r_0)$  es el factor de corrección de la excentricidad

$\tau_{\lambda}$  es la transmisividad espectral debida a los componentes atmosféricos.

Dado que la transmisividad espectral no engloba el efecto de la nubosidad esta expresión solo es válida para cielos despejados.

Sobre una superficie horizontal la irradiancia directa monocromática vendrá dada por

$$I_{b\lambda} = (I_{sc\lambda} / \rho^2) \cos \theta_z \tau_{\lambda} \quad (2)$$

En donde  $\theta_z$  es el ángulo cenital.

Por último, sobre una superficie inclinada, el valor de la irradiancia directa monocromática viene dado por

$$I_{b\lambda\beta} = (I_{sc\lambda} / \rho^2) \cos \theta \tau_{\lambda} \quad (3)$$

## Laboratorio de Física del medio Ambiente

En donde  $\theta$  es el ángulo que forma el rayo de sol con la normal a la superficie.

La irradiancia solar integrada viene dada por la suma de las componentes monocromáticas para todo el espectro solar (en la práctica desde 0.29 hasta 4.0  $\mu\text{m}$ ). Así pues la irradiancia directa total sobre una superficie perpendicular a los rayos del sol, a la distancia media tierra-sol, viene dada por

$$I_n = \int_0^{\infty} I_{\text{sol}} \tau_{\lambda} d\lambda \quad (4)$$

Esta es la que mide un pirheliómetro.

Sobre una superficie horizontal se calcula teniendo en cuenta la altura solar o el ángulo cenital

$$I_{b0} = I_n \cos \theta_z \quad (5)$$

La radiación difusa se genera por los procesos de dispersión por moléculas de aire y por aerosoles. En el primer encuentro de la radiación directa con la atmósfera se genera una radiación difusa primaria. Esta radiación difusa vuelve a ser difundida y a este proceso se le denomina difusión múltiple. La difusión originada en el primer proceso es la dominante. Una porción de la difusa vuelve al espacio, otra es absorbida y otra llega al suelo.

La irradiancia total difusa es la integral de las componentes monocromáticas para todo el espectro. Es decir:

$$I_n = \int_0^{\infty} I_d d\lambda \quad (6)$$

La irradiancia global sobre una superficie horizontal ( $I_{T0}$ ), que es la medida que proporciona un piranómetro es la suma de la irradiancia espectral directa más la irradiancia espectral difusa sobre una superficie horizontal. Vendrá dada por

$$I_{T0} = I_{d0} + I_n \cos \theta_z \quad (7)$$

En ausencia de medidas de difusa, esta se determina por el denominado método sustractivo

$$I_{d0} = I_{T0} - I_n \cos \theta_z \quad (8)$$

### Desarrollo experimental

Esta práctica se realizará en el laboratorio mediante un goniómetro y una lámpara de 500W que nos permitirán simular el recorrido y movimiento del sol.

Se deben conectar los piranómetros al datalogger, en medidas puntuales y con un periodo de medida de 1 minuto. Empezando por el punto mas bajo y recorriendo todo el goniómetro se medirá durante 5 minutos a intensidad máxima. Para poder separar las distintas medidas, es conveniente, después de cada intervalo de medida, apagar la lámpara y medir otros 5 minutos. También se debe medir el ángulo correspondiente a cada posición.

Una vez realizadas las medidas en los diferentes ángulos, se situará la lámpara en el punto más alto midiéndose la radiación durante aproximadamente 15 minutos. Por ultimo se variará la potencia de la lámpara, midiéndose durante 5 minutos para cada intensidad (es conveniente apagarla cada vez para tener la referencia de la medida).

## Laboratorio de Física del medio Ambiente

### Presentación de resultados

- Variación de la radiación con el ángulo de medida.
- Variación de la radiación con el tiempo.
- Variación de la radiación con la intensidad (en el punto más alto)

**NOTA:** Los coeficientes de calibrado de los distintos piranómetros son (para configurar el datalogger, ver instrucciones en la parte de calibrado):

Piranómetro	Nº de serie	Coef. Calibrado ( $\text{V/Wm}^{-2}$ )
CM-11	935114	$4.87 \cdot 10^{-6}$
CM-11	92394	$4.19 \cdot 10^{-6}$
CM-6	818089	$1.18 \cdot 10^{-5}$
B&W (1918)	----	$1.58 \cdot 10^{-5}$
Célula licor	----	$-0.025 (\mu\text{A/Wm}^{-2})$

### Apéndice I: Resumen de expresiones básicas para el cálculo de la posición del Sol respecto a una superficie horizontal e inclinada.

#### Coordenadas de Valencia:

$$\text{Latitud} = \phi = 39.5^\circ \quad \text{Longitud} = l = 0^\circ$$

#### Declinación:

$$\delta = [0.006918 - 0.399912 \cos J + 0.070257 \sin J - 0.006758 \cos 2J + 0.000907 \sin 2J - 0.002697 \cos 3J + 0.00148 \sin 3J] (180/\pi)$$

$$J = 2\pi(d-1)/365; d = \text{día del año (de 1 a 365)} \quad \text{En grados, } -23^\circ < \delta < 23^\circ \text{ aproximadamente.}$$

#### Tiempo Solar (LAT)

$$\text{LAT} = \text{LMT} + l + \text{ET} \quad (\text{en horas}); \text{ Para Valencia: LAT} = \text{LMT} + \text{ET} \quad (\text{en horas})$$

$$\text{LMT} = \text{tiempo local (horas)}; l = \text{longitud del lugar de medida}$$

$$\text{ET} = \text{ecuación de corrección del tiempo}$$

$$\text{ET} = -0.128 \sin\left(360 \frac{d-1}{365} - 2.80^\circ\right) - 0.165 \sin\left(2 \times 360 \frac{d-1}{365} + 19.7^\circ\right) (\text{horas})$$

#### Ángulo horario

$$\omega = 15 (12 - \text{LAT}) \quad (\text{en grados})$$

#### Altura solar y ángulo cenital

$$\sin \alpha = \cos \theta_z = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega$$