

DETERMINACIÓN DE LA IRRADIANCIA ATMOSFÉRICA DESCENDENTE MEDIANTE UN PANEL DE REFLECTIVIDAD DIFUSA

V. García, M. Mira, C. Coll, E. Valor, y V. Caselles.

*Departamento de Física de la Tierra y Termodinámica, Universidad de Valencia,
C/Dr. Moliner 50, 46100 Burjassot (Valencia). Maria.Mira@uv.es*

RESUMEN

A la irradiancia atmosférica descendente (F_{sky}) contribuye la radiancia emitida por la atmósfera desde todas las direcciones de la bóveda celeste, $L_{sky}^{\downarrow}(\theta, \phi)$, por lo que sería necesario medir ésta desde diferentes ángulos cubriendo el hemisferio, y calcular F_{sky} por integración. Debido a la larga tarea que esto implica, habitualmente en el infrarrojo térmico (IRT) se utiliza la aproximación de Kondratyev (1969), que asume $F_{sky} = \pi L_{sky}^{\downarrow}(53^{\circ})$. Existen otras aproximaciones, pero todas ellas requieren un cielo completamente despejado o nublado, y una mínima contribución de los elementos circundantes del paisaje. En cambio, la utilización de un panel de reflectividad difusa mejora la determinación de F_{sky} porque considera dicha contribución y, además, puede utilizarse en cielos heterogéneos. Previamente se requiere su caracterización y comparación con medidas directas de la atmósfera. En este estudio se presenta la calibración de un panel de reflectividad difusa del IRT, según los cuatro canales del radiómetro CE312 (8-14 μm). Se realizaron medidas angulares (de 0° a 70° respecto del nadir) de la radiancia que proviene del panel, simultáneamente a medidas directas del cielo. Además, se compararon con los valores obtenidos según un perfil atmosférico del National Centers for Environmental Prediction. Las medidas demuestran una óptima medida de F_{sky} a aproximadamente 30° .

ABSTRACT

The radiance emitted by the atmosphere at any angle, $L_{sky}^{\downarrow}(\theta, \phi)$, contributes to the downwelling sky irradiance (F_{sky}). Thus, it would be necessary to perform a scanning of the atmospheric radiance varying the zenith and azimuth angles of observation to determine F_{sky} . Since this process is very lengthy, the Kondratyev (1969) assumption is usually used in thermal infrared (TIR), $F_{sky} = \pi L_{sky}^{\downarrow}(53^{\circ})$. Despite there are other approximations, all of them require completely cloud free or cloudy skies and a minimum contribution of the surroundings. However, the use of an infrared diffuse reflectance plate improves F_{sky} determination because it includes this contribution and it can be used under heterogeneous conditions of the atmosphere. The panel characterization and comparison with direct measurements are previously required. This is the study presented here, using the four channels of the radiometer CE312 (8-14 μm). Angular measurements (0° to 70° from nadir) of radiance from the plate were carried out, simultaneously to direct measurements of the sky radiance. Besides, comparisons with F_{sky} values from an atmospheric profile of the National Centers for Environmental Prediction (NCEP) were made. The measurements show an optimum measurement of F_{sky} at approximately 30° .

Palabras clave: infrarrojo térmico, irradiancia atmosférica descendente, panel de reflectividad difusa, medidas angulares.

INTRODUCCIÓN

En la medida de temperatura de la superficie terrestre mediante radiometría en el infrarrojo térmico (IRT) es necesario tener en cuenta la emisividad de la superficie (ϵ) y la irradiancia atmosférica descendente (F_{sky}) que se refleja en ella. Así, la radiancia procedente de la superficie, L_{surf} , viene dada por:

$$L_{surf} = \epsilon B(T) + (1 - \epsilon) \frac{F_{sky}}{\pi} \quad (1)$$

siendo T la temperatura de la superficie y B la función de Planck, habiéndose supuesto un comportamiento reflector lambertiano para la superficie. Para obtener la irradiancia atmosférica,

se debería medir la radiancia descendente de los alrededores en todas las direcciones angulares, $L^{\downarrow}(\theta, \phi)$, siendo θ el ángulo cenital y ϕ el acimutal, e integrar dichas contribuciones según la expresión:

$$F_{sky} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} L^{\downarrow}(\theta, \phi) \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi \quad (2)$$

Esto supone una ardua tarea, por ello se propone como alternativa la utilización de un panel de reflectividad difusa, cuya superficie, hipotéticamente lambertiana, refleja por igual la radiancia procedente de los alrededores (cielo, elementos circundantes, etc.). De esta forma se obtiene la radiancia atmosférica (F_{sky}/π) de la Ec. (1) con una sola medida de la radiancia hecha sobre el panel desde cualquier ángulo de observación.

El objetivo del presente trabajo consiste en caracterizar dicho panel comprobando así su eficiencia en la medida de F_{sky}/π según diferentes ángulos de observación.

MATERIAL Y MÉTODOS

El radiómetro multispectral

El radiómetro térmico CIMEL Electronique modelo CE312 es un sensor multispectral que mide la radiancia emitida por una superficie en la región del IRT, determinando la temperatura radiométrica superficial de los cuerpos con una precisión de ± 0.1 K. Sus filtros permiten medidas en un canal ancho (c1: 8.0-13.3 μm), y tres canales más estrechos (c4: 8.3-9.3 μm ; c3: 10.2-11.3 μm ; c2: 11.5-12.4 μm). Su campo de visión (FOV) es de 10° .

El panel de reflectividad difusa del IRT

En el experimento se utilizó el panel de reflectividad difusa en el IRT "Infragold Reflectance Target, IRT-94-100" cuya superficie de dimensiones $25.4 \times 25.4 \text{ cm}^2$ viene caracterizada por un alto valor de reflectividad en el infrarrojo. Su correspondiente emisividad filtrada a los canales espectrales 1 a 4 del radiómetro CE312 es: 0.077, 0.075, 0.075 y 0.082, respectivamente.

Sistema goniométrico

El sistema goniométrico utilizado en el experimento consta de un trípode, regulable en altura, unido a una rótula que permite controlar el ángulo cenital (θ) y acimutal (φ) del radiómetro con una sensibilidad mayor que 5° . Al variar θ , el FOV del radiómetro proyectado sobre el panel es una elipse.

Para caracterizar el panel se diseñó un montaje experimental que permite realizar medidas angulares sobre éste de 0° a 70° respecto el nadir, con intervalos de 5° , realizándose 5 medidas consecutivas en cada ángulo cenital para considerar su valor medio y desviación estándar. El radiómetro CE312 tarda 20 segundos a realizar una medida con cada uno de sus cuatro canales. Se necesitaron unos 45 minutos para completar cada secuencia para un único ángulo acimutal. Y, por tanto, alrededor de 3 horas para medir en cuatro ángulos acimutales ($\varphi=0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ y 270°). Se consideró conveniente realizar las medidas en un día de cielo totalmente despejado (sin nubes) con el fin de optimizar la hipótesis de considerar F_{sky} invariable durante el tiempo total de las medidas. Además, los valores de F_{sky} obtenidos a partir de medidas hechas sobre el panel se comparan, con el fin de validarlas, con dos valores de referencia. El primero obtenido mediante medidas directas de radiancia realizadas con el

radiómetro mirando el cielo en dirección nadir, $F_{sky} = \pi \cdot 1,4 \cdot L_{sky}^{\downarrow}(0^\circ)$, que es equivalente a la aproximación difusiva $F_{sky} = \pi L_{sky}^{\downarrow}(53^\circ)$ (Kondratyev, 1969). Y el segundo valor se obtiene mediante simulación con perfiles atmosféricos del National Centers for Environmental Prediction (NCEP) obtenidos del reanálisis de modelos atmosféricos cercanos a la zona experimental e interpolados a la hora central de las medidas. Dichos perfiles han sido utilizados como datos de entrada del modelo de transferencia radiativa MODTRAN 4 (Berk *et al.* 1999) para calcular $L_{sky}^{\downarrow}(\theta, \varphi)$. Con su integración (Ec. 2) se obtiene F_{sky} , que filtramos a las distintas bandas espectrales del radiómetro utilizado en las medidas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resultados experimentales

Analizando los cuatro valores de radiancia (uno en cada acimut) para cada ángulo cenital, se observa la existencia de una variación promedio de $\pm 1.0 \text{ mWm}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{cm}$, correspondiente a un error en temperatura de $\pm 1.7 \text{ K}$. Por tanto a partir de este momento, para analizar los resultados consideraremos en cada ángulo cenital los valores promedio de radiancia obtenida según los cuatro acimuts, eliminando así la dependencia acimutal. En la Figura 1 se presenta la dependencia angular de las medidas de radiancia procedente del panel, $L_{plate}(\theta)$. Se observa una tendencia común a disminuir con el ángulo cenital desde 0° a 40° , y a aumentar su valor a partir de los 40° . Tenemos pues que $L_{plate}(\theta)$ varía con θ un máximo de 5, 7, 7 y 4 $\text{mWm}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{cm}$ en los canales 1 a 4, respectivamente, correspondiente a errores en temperatura de $\pm 8, \pm 9, \pm 12$ y $\pm 7 \text{ K}$, respectivamente. Parece ser que, a pesar de considerarse un panel lambertiano, no refleja por igual en todas direcciones, de acuerdo con su definición.

Corrección de emisividad de la placa

Para obtener F_{sky} a partir de las medidas realizadas sobre el panel, es necesario considerar el efecto de emisividad no nula de éste y medir su temperatura (T). La radiancia que proviene del panel, $L_{plate}(\theta)$, corresponde a:

$$L_{plate_i}(\theta) = \varepsilon_i B_i(T) + (1 - \varepsilon_i) L_{sky_surr_i}^{\downarrow}(\theta) \quad (3)$$

siendo $L_{sky_surr_i}^{\downarrow}$ la radiancia atmosférica descendente, que incluye la contribución del entorno donde i es la banda espectral. De (3) obtenemos:

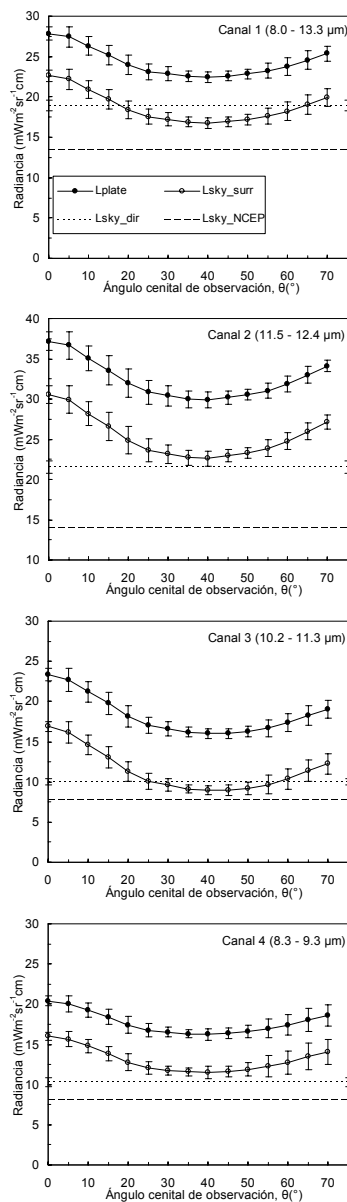


Figura 1.- Dependencia angular de la radiancia procedente del panel (L_{plate}), corrección de ésta por efecto de emisividad del panel (L_{sky_surr}) y comparación con valores de radiancia atmosférica descendente de referencia según la aproximación difusiva (L_{sky_dir}) y perfiles atmosféricos (L_{sky_NCEP}) para los 4 canales del CE312.

$$L_{sky_surr}^i(\theta) = \frac{L_{plate}^i(\theta) - \varepsilon_i B_i(T)}{(1 - \varepsilon_i)} \quad (4)$$

Es necesaria una estimación independiente de la temperatura del panel para resolver la ecuación (4), por lo que se utilizó un termómetro de contacto, con una precisión de ± 1 K. Antes de cada secuencia de medidas para un mismo ángulo acimutal, se tomaron 5 medidas de la temperatura del panel, realizando un muestreo por toda su superficie, y se consideró su valor medio. El error en la medida de la temperatura del panel implica una indeterminación en el cálculo de $L_{sky_surr}^i$ de ± 0.12 , ± 0.14 , ± 0.13 y ± 0.12 $\text{mWm}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{cm}$ en los canales 1 a 4 del radiómetro, respectivamente (correspondiente a un error en la determinación de temperatura atmosférica de ± 0.2 , ± 0.2 , ± 0.3 , ± 0.3 K, respectivamente).

Considerar nula la emisividad del panel en el momento de tratar los datos experimentales ha supuesto cometer una sobreestimación de $L_{sky_surr}^i$ para los canales 1 a 4 del radiómetro de +5, +7, +7 y +5 $\text{mWm}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{cm}$, respectivamente. En términos de temperatura, en este caso atmosférica, se comete un error de sobreestimación de +10, +10, +15 y +10 K. Una forma sencilla de apreciar el efecto de la emisividad del panel, es evaluar la diferencia en temperatura de superficie obtenida en la Ec. (1) cuando se sustituye en dicha ecuación el valor de F_{sky} , corregido por el efecto de la emisividad del panel y sin corregir. Dicha diferencia de temperatura de la superficie, ΔT , se puede observar en la Figura 2 para el caso de una superficie cuya temperatura de brillo es de 303 K. Así por ejemplo, para el caso de una emisividad de la superficie de 0.9, se obtiene una diferencia de 0.4, 0.5, 0.5, 0.4 K para los canales 1 a 4 del radiómetro, respectivamente.

Es necesario considerar pues, el efecto de la emisividad del panel para el cálculo de F_{sky} con el fin de obtener una mejor exactitud en la medida radiométrica de la temperatura.

Comparación con medidas directas

Tras comparar los valores obtenidos a partir de las medidas experimentales con el panel, corregidos por el efecto de su emisividad ($L_{sky_surr}^i$) con los valores de la aproximación difusiva ($L_{sky_dir}^i$), se observa un buen ajuste en los canales 2 y 4 en las medidas entre 30° y 65° . En cambio, en los canales 1 y 3 la máxima diferencia entre ambas medidas es significativa (3 y 2 $\text{mWm}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{cm}$, respectivamente) si se compara con el error experimental (± 1.6 y ± 1.3 $\text{mWm}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{cm}$, respectivamente).

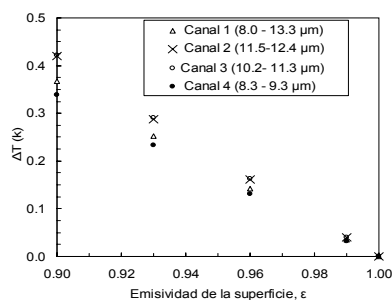


Figura 2.- Diferencia en la determinación de la temperatura real de una superficie, ΔT , debido al efecto de la emisividad del panel, según el valor de emisividad de dicha superficie para los 4 canales del CE312

Comparación con la simulación atmosférica

También se observa en la Figura 1 que los valores $L_{sky_NCEP}^{\downarrow}$ obtenidos a través de los perfiles atmosféricos NCEP son siempre menores a los valores experimentales. Este valor de F_{sky} explicaría mejor los valores obtenidos en los canales 1 y 3, pero no explicaría las medidas del canal 2.

Efecto del radiómetro

Pese a la corrección que se ha aplicado a los valores de radiancia, $L_{sky_surr}^{\downarrow}$ (Figura 1) al considerar el efecto de emisividad del panel, se observa que tanto para ángulos cenitales cercanos al nadir (0° a 15°) como para los que están bastante alejados (60° a 70°), los valores de $L_{sky_surr}^{\downarrow}$ difieren de los valores de la aproximación difusiva ($L_{sky_dir}^{\downarrow}$) y de los obtenidos mediante simulación de perfiles atmosféricos ($L_{sky_NCEP}^{\downarrow}$). La explicación se puede encontrar considerando la contribución de los elementos circundantes: experimentadores, edificios, trípode y sobre todo el propio radiómetro. La limitación que sufre el montaje experimental condicionado por las reducidas dimensiones del panel y el FOV del radiómetro obligan que éste se sitúe muy cerca del panel en las medidas realizadas en los dos intervalos de ángulos anteriormente mencionados. Entonces la contribución de la propia radiación del radiómetro hace aumentar de manera significativa la radiancia recibida por el panel y por tanto, se comete un error al atribuir dicha medida a la radiancia atmosférica descendente. Se trata del llamado *efecto narciso*, es decir, el radiómetro recibe la contribución de su propia radiación reflejada en el panel. Sin embargo al alejar el radiómetro, como ocurre en el intervalo de los 30° a los 60° , la radiancia se mantiene prácticamente constante, oscilando en un valor medio de: 16.3, 22.1, 8.0 y 11.2 $mWm^{-2}sr^{-1}cm$, con una desviación

estándar de $\pm 0.2, \pm 0.4, \pm 0.4, \pm 0.2 mWm^{-2}sr^{-1}cm$, que en unidades de temperatura son $\pm 0.5, \pm 0.6, \pm 1.2$ y $\pm 0.6 K$, para los canales 1 a 4, respectivamente.

En mediciones futuras se pretende estudiar la contribución del radiómetro con más detalle con el fin de minimizarla y semicuantificarla, comprobando al mismo tiempo si existen otros elementos circundantes que contribuyan a la radiancia recibida durante las medidas en los intervalos de ángulos anteriormente mencionados.

CONCLUSIÓN

Medir la radiancia atmosférica descendente con la ayuda de un panel de reflectividad difusa resulta una alternativa rápida y útil a las ya existentes. En el presente trabajo se ha demostrado que medir la radiancia (F_{sky}/π) procedente del panel, para un ángulo cenital óptimo de 30° , desde cualquier acimut, ofrece valores aceptables. Sin embargo, es necesario medir la temperatura del panel con el fin realizar la corrección del efecto de emisividad de éste, principalmente cuando se utilice para medir la temperatura de superficies de emisividad baja.

BIBLIOGRAFÍA

Berk, A., G. P. Anderson, P. K. Acharya, J. H. Chetwynd, L. S. Bernstein, E. P. Shettle, M. W. Matthew, and S. M. Adler-Golden, 1999. *MODTRAN 4 user's manual*, Air Force Research Laboratory, Space Vehicles Directorate, Air Force Materiel Command, Hascom AFB, MA, 95 pp.

Kondratyev K. Y., *Radiation in the Atmosphere*. New York: Academic Press, 1969.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el MICINN (becas de V. García y M. Mira, y proyectos CGL2007-64666/CLI, CGL2007-29819-E/CLI, y CGL2007-28828-E/BOS, cofinanciados por fondos FEDER).