

Evaluación de distintos métodos de medida de la irradiancia atmosférica descendente en el infrarrojo térmico

V. García-Santos*, E. Valor, M. Mira, C. Coll, J. M. Galve y V. Caselles

Departamento de Física de la Tierra y Termodinámica. Universitat de Valencia.

C/ Dr. Moliner, 50. Burjassot. Valencia

Resumen

La medida de la temperatura de la superficie terrestre (TST) a nivel de suelo es necesaria para la validación de los productos TST obtenidos mediante teledetección en el infrarrojo térmico (IRT). En las campañas de validación, un factor importante a tener en cuenta, es la irradiancia atmosférica descendente (F_{sky}), la cual se ha de medir casi simultáneamente a las medidas de superficie. F_{sky} es un parámetro clave para eliminar la radiancia, de atmósfera y alrededores, reflejada en la superficie de la medida sobre ésta. La forma correcta de medir F_{sky} sería realizando medidas directas del cielo para todos los ángulos cenitales y acimutales, integrando luego estas medidas en el hemisferio superior. Como realizar estas medidas resulta un arduo trabajo, consumiendo una gran cantidad de tiempo, resulta un método poco útil, debido al continuo cambio de las condiciones atmosféricas durante el proceso de medida. En este estudio se comparan varios métodos capaces de determinar, de forma precisa, F_{sky} en un corto periodo de tiempo, evaluando así cuál de ellos es el más conveniente. Con este objetivo se llevó a cabo una campaña experimental, usando radiómetros térmicos multispectrales modelo CIMEL Electronique CE312, los cuales tiene cuatro bandas espectrales situadas en la el intervalo 8-14 μm . Se realizaron medidas directas de F_{sky} según el método de aproximación difusiva, el cuál estipula que F_{sky} es proporcional a la radiancia, procedente del cielo, medida en un determinado ángulo cenital efectivo que se sitúa en torno a los 53° . Otro método implica el uso de un panel de reflectividad difusa en el IRT. También se incluyeron, para su comparación, valores simulados de F_{sky} mediante un modelo de transferencia radiativa utilizando como datos de entrada a éste, radiosondeos realizados en la zona de estudio y perfiles atmosféricos obtenidos del National Center for Environment Prediction. Los resultados muestran una gran similitud entre todas las técnicas propuestas aquí, pudiéndose explicar las posibles diferencias entre éstas en términos de sus errores. No obstante si hubiera que decantarse por una de las técnicas, ésta implicaría el uso del panel de reflectividad difusa, pues tiene en cuenta la contribución de elementos circundantes como pueden ser, inevitablemente, el experimentador y su instrumental. Además puede ser usado bajo cualquier condición atmosférica, aspecto que excluye al resto de los métodos para el caso de cielos parcialmente cubiertos. Utilizar el panel supone cometer un error promedio de precisión, en términos de radiancia, de $\pm 1,5 \text{ mW m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ cm}$, equivalente en términos de temperatura atmosférica de $\pm 1,9 \text{ K}$.

Palabras clave: infrarrojo térmico, irradiancia atmosférica descendente, panel de reflectividad difusa, temperatura de la superficie terrestre, radiometría de campo.

Abstract

Evaluation of different methods to measure the atmospheric downwelling irradiance in the thermal infrared

Ground measurements of land surface temperature (LST) are necessary for the validation of LST products derived from thermal infrared (TIR) remote sensing data. In the validation campaigns, one important factor to take into account is the downwelling atmospheric irradiance (F_{sky}), which has to

* Corresponding author: vicente.garcia-santos@uv.es

Received: 02-03-10; Accepted: 14-01-11.

be measured near-simultaneously to the surface temperature measurements. F_{sky} is a key parameter for removing the radiance, both of atmosphere and surrounding, reflected at the surface from the radiance measured at ground level. Direct measurements of F_{sky} with a radiometer involve the measurement of sky radiances from all zenithal and azimuthal directions, and the integration over the upper hemisphere. Such measurements are time-consuming and are not useful because atmospheric conditions may change during the measurement process. Several methods to accurately determine F_{sky} in a short period of time are analyzed in this paper to evaluate which is the most suitable. With this aim, an experimental campaign was carried out using thermal radiometers CIMEL Electronique model CE312, which have four spectral bands in the 8-14 μm spectral window. One method for the determination of F_{sky} is the use of the diffusive approximation, which states that F_{sky} is proportional to the sky radiance measured at a given zenithal angle ($\sim 54^\circ$). Another method implies the use of a TIR diffuse reflectance panel. For comparison, F_{sky} values were simulated by means of a radiative transfer code using both radiosounding data measured at the study area, and atmospheric profiles from the National Center for Environment Prediction. Results show a great similitude between all the techniques proposed here, the possible difference between them could be explained in terms of their errors. Nevertheless the most recommended technique is the diffuse reflectance panel since takes into account the contribution of surrounding elements like the experimenter or his instrumental. Moreover the panel could be used under any atmospheric condition, aspect which excludes the rest methods in the case of skies partially cloudy. Using the panel suppose make an average error, in the terms of radiance, of $\pm 1.5 \text{ mW m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ cm, equivalent in terms of atmospheric temperature of $\pm 1.9 \text{ K}$.

Key words: thermal infrared, downwelling atmospheric irradiance, diffuse reflectance panel, land surface temperature, field radiometry.

Introducción

En la medida de temperatura de la superficie terrestre (TST) 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, término $(1-\epsilon)$. Así, la radiancia procedente de la superficie, L_{surf} , viene dada por:

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

siendo B la función de Planck, suponiendo un comportamiento reflector lambertiano para la superficie terrestre. Para obtener la irradiancia atmosférica descendente, es necesario 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:

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

Esto supone una tarea difícil de llevar a cabo en el corto espacio de tiempo requerido en campañas de campo, como la medida de temperatura in situ mediante radiómetros a nivel de superficie, realizada en unos pocos minutos, para su posterior validación con medidas de temperatura tomadas por un sensor a bordo

de satélite coincidentemente a su pasada por la zona de interés (Coll *et al.*, 2005). Como alternativa existen diversas técnicas capaces de medir rápidamente la F_{sky} .

Técnicas de medida directa

Las técnicas de medida directa de F_{sky} se basan en la medida de la radiancia directa procedente del cielo. Una de las técnicas más conocidas es la llamada *aproximación difusiva*, propuesta por Kondratyev (1969), necesitando tan solo una medida de la radiancia, realizada al apuntar el radiómetro térmico en una dirección cenital efectivo que se sitúa en torno a $53^\circ \pm 3^\circ$, no obstante este ángulo puede variar en función del tipo de atmósfera o del canal espectral de medida (Rubio, 1998). De esta forma se cumple que:

$$F_{sky} \approx \pi L_{sky}(\theta_{ef}) \quad [3]$$

Una modificación de la aproximación difusiva de Kondratyev, fue propuesta por Rubio *et al.* (1997), donde se demuestra que es posible estimar F_{sky} a partir de la medida a nadir de la radiancia atmosférica descendente, según la expresión:

$$F_{sky} \approx \gamma \pi L_{sky}(0^\circ) \quad [4]$$

donde γ es una constante que depende del intervalo espectral en el que se mide y de las condiciones atmosféricas, tomando valores de 1,1 a 1,7. La hipótesis de Rubio *et al.* (1997), es mucho más práctica en campo que la aproximación de Kondratyev (1969), porque evita la señalización exacta del ángulo cenital efectivo, siendo más fácil apuntar verticalmente.

Sin embargo, las técnicas de medida directa presentan dos inconvenientes importantes, el primero es que requieren de un cielo completamente cubierto o completamente despejado, es decir, en condiciones atmosféricas homogéneas. El segundo es que esta aproximación no considera la posible contribución de elementos circundantes a la superficie en estudio, sino que considera únicamente la contribución de la atmósfera.

Cálculo de valores simulados de F_{sky}

Una forma alternativa bastante fiable de obtener F_{sky} , es lanzar radiosondeos en la zona de estudio, capaces de proporcionar valores de altura geopotencial, humedad relativa, presión atmosférica y temperatura del aire, necesarios para introducirse en un modelo de transferencia radiativa (MTR), como puede ser el modelo MODTRAN 4.0 (Berk *et al.*, 1999) usado en este estudio, ofreciendo valores de la radiancia atmosférica descendente desde distintos ángulos cenitales: 0°, 11,6°, 26,1°, 40,3°, 53,7°, 65°, 70°, 75°, 80°, 85°, 87° y 89°, siendo los 5 primeros los ángulos llamados gaussianos (Wan y Dozier, 1989) y el resto propuestos por los autores con la finalidad de tener un barrido cenital completo de la atmósfera. Estos valores se integran según la expresión [2] para obtener el valor simulado de F_{sky} .

En caso de no disponer de radiosondeos de la zona, existe la posibilidad de obtener los parámetros requeridos por el MTR mediante la descarga de perfiles atmosféricos, interpolados espacial y temporalmente a la localización deseada. En el presente estudio se utilizaron perfiles atmosféricos del National Center for Environment Prediction (NCEP) (Kalnay *et al.*, 1995), para ello se indicaron en la aplicación telemática de LANDSAT a partir de perfiles del NCEP (<http://atmcorr.gsfc.nasa.gov/>), las co-

ordenadas de la zona deseada y la hora central de las medidas, obteniendo como resultado los datos de radiosondeos resultantes del reanálisis de modelos atmosféricos cercanos a la zona de estudio, junto a datos obtenidos mediante productos de sensores a bordo de satélites en la hora de pasada por la zona de interés.

No obstante, la simulación también presenta serios inconvenientes: no siempre se dispone de radiosondeos de la zona (se puede decir que casi exclusivamente se obtienen coincidiendo en campañas específicas), y los perfiles atmosféricos NCEP tampoco son siempre del todo fiables, ya que los datos son una predicción de parámetros atmosféricos, obtenidos a partir de datos interpolados espacialmente (tal vez las condiciones son distintas en una zona u otra) y temporalmente (los parámetros pueden ser distintos en una hora o en otra).

Panel de reflectividad difusa en el IRT

El panel de reflectividad difusa puede ser catalogado también como un método de medida directa, aunque no se apunte directamente al cielo, sino a una superficie lambertiana, que permite medir F_{sky} desde cualquier dirección angular y bajo cualquier condición atmosférica. Tiene en cuenta, además, la contribución radiativa de elementos circundantes, puesto que está situado a la altura de la superficie problema y recibe dicha contribución.

El objetivo del presente estudio es comparar las distintas técnicas existentes en radiometría de campo del IRT para determinar F_{sky} , evaluando así cuál de ellas es la más recomendable. Para ello se diseñó un dispositivo experimental que permite medir F_{sky} mediante la aproximación difusiva propuesta por Rubio *et al.* (1997) y mediante el uso de un panel de reflectividad difusa, caracterizando dicho panel al realizarse un barrido de medidas desde distintas combinaciones de ángulos (θ, ϕ). También se incluyeron así mismo los valores de F_{sky} calculados mediante simulación en un MTR.

Como último comentario decir que todas las técnicas propuestas previamente, a excepción del uso de un panel de reflectividad difusa, han sido comparadas con un valor patrón de F_{sky} proporcionado por la expresión [2]. Así por

ejemplo, la aproximación difusiva propuesta por Rubio *et al.* (1997), fue extraída a partir de una mediciones del cielo a diferentes ángulos cenitales y acimutales, realizadas por el propio autor, y cuyos resultados se pueden encontrar en Rubio (1998). En el presente trabajo lo que se pretende es comparar entre ellas, estas técnicas contrastadas, bajo unas condiciones atmosféricas óptimas. Tan solo en el caso del panel de reflectividad difusa se pretende llevar a cabo, una caracterización de éste con la finalidad de averiguar cuáles son sus mejores condiciones de uso a la hora de medir F_{sky} .

Instrumentación

El radiómetro multispectral

El radiómetro térmico CIMEL Electronique modelo CE312 (Brogniez *et al.*, 2003), 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 $\pm 0,1$ 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 oro rugoso, de dimensiones $25,4 \times 5,4$ cm^2 , viene caracterizada por un alto valor de reflectividad en el infrarrojo. Según los canales 1 a 4 del radiómetro CE312, sus reflectividades son respectivamente 0,923, 0,925, 0,925 y 0,918, con un error de $\pm 0,009$, Teniendo en cuenta las leyes de conservación de la energía y Kirchhoff, éstas corresponden a emisividades de 0,077, 0,075, 0,075 y 0,082, respectivamente, con un error de $\pm 0,009$. Estas emisividades sirven, como se verá a posteriori, para corregir la contribución a las medidas del panel.

Sistema goniométrico

Durante el experimento se utilizó un goniómetro de hierro pintado de negro, compuesto por un soporte horizontal con brazos extensibles formando la base del conjunto. Sobre ésta descansa un semicírculo, de radio 40 cm, dividido en grados desde 0° hasta 180° , en intervalos de 5° . Del centro de la base parte un brazo giratorio (de longitud 1,70 cm) que tiene en dicho punto su eje de giro, de tal modo que al girar se desliza apoyándose sobre el semicírculo. En el extremo superior del brazo se acopla una abrazadera que sujeta el radiómetro, manteniéndolo paralelo a la dirección del brazo y mirando hacia el panel, lo cual permite realizar un doble recorrido cenital, desde 65° hasta -65° (a partir de 70° cenitales, la elipse proyectada por el FOV del radiómetro se sale del panel midiendo parte de suelo de forma no deseada).

Metodología

Condiciones atmosféricas de las medidas

Se decidió realizar las medidas en un día completamente despejado con la finalidad de optimizar la hipótesis de considerar F_{sky} invariable durante todo el tiempo de medidas, además de ser la condición atmosférica exigida para obtener F_{sky} según el método de la aproximación difusiva, y también para que la estimación mediante un MTR y un radiosondeo sean posibles.

La zona elegida para realizar el estudio fueron los arrozales de la Marjal en la Albufera de Valencia, coordenadas $39^\circ 15' 53''$ N, $0^\circ 18' 15''$ O. Localización cuya finalidad era evitar, en la medida de lo posible, la contribución radiativa de elementos circundantes en las medidas sobre el panel.

Sistemática de medidas experimentales

Para comparar las medidas de F_{sky} y caracterizar a su vez el panel, se diseñó un dispositivo experimental consistente en fijar un radiómetro sobre el goniómetro, permitiendo realizar medidas angulares de radiancia sobre el panel, desde 0° hasta 65° respecto del nadir,

en intervalos de 5° . Se realizaron unas 3 medidas consecutivas para cada ángulo cenital, considerándose a posteriori su valor promedio y su desviación estándar. A su vez, un segundo radiómetro CE312 se colocó cerca del panel apuntando verticalmente al cielo con el fin de medir la radiancia en el nadir, $L^\downarrow(0^\circ)$, necesaria para obtener F_{sky} según la ec. [4], como γ depende del canal espectral de medida y del contenido de vapor de agua atmosférico (García-Santos *et al.*, 2010), tal como se comentó anteriormente, dicho factor γ toma los siguientes valores en los canales 1 a 4 del radiómetro utilizado: 1,38, 1,49, 1,61 y 1,40, respectivamente. Se puede apreciar un esquema del dispositivo experimental en la Figura 1. Además, se consideraron dos valores más de F_{sky} , obtenidos al introducir dos perfiles atmosféricos en un MTR; MODTRAN 4.0 (Berk *et al.*, 1999). El primero se obtuvo descargándose de la aplicación telemática ofrecida por LANDAST, cuyo link puede encontrarse en el apartado de introducción en el presente documento. Dicha aplicación requiere una previa introducción de datos suministrados por el usuario: fecha y hora de las medidas, coordenadas de la zona de interés, estación del año y especificar las condiciones de superficie (esta última es opcional). Como resultado ofrece un perfil atmosférico fruto del reanálisis de datos obtenidos mediante radiosondeos del NCEP realizados en zonas circundantes a la de interés. El segundo perfil se obtuvo gracias a un radiosondeo realizado en la misma zona de las medidas y a la misma hora que éstas. Lo llevo a cabo el Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo (CEAM) en una campaña alter-

nativa a la nuestra. Dicho radiosondeo ofrece valores de: altura geopotencial (desde la superficie hasta 16.000 m), presión atmosférica (en mbar), temperatura del aire (en K) y humedad relativa (en %).

El proceso de medidas fue llevado a cabo en el transcurso de una hora, concretamente de 11:30 a 12:30 a.m., hora local. De este modo se obtenían las medidas en el mismo instante en que se lanzaba, *in situ*, el radiosondeo.

Para estudiar la variación cenital de la radiancia recibida procedente del panel, se usó la siguiente metodología: Desde $\theta = 0^\circ$ a $\theta = 45^\circ$ se midió a una distancia radiómetro-panel de 90 cm a nadir; desde $\theta = 50^\circ$ a $\theta = 65^\circ$ se redujo la distancia a 50 cm con el objetivo de aumentar la superficie observada del panel y evitar la contribución de elementos exteriores.

Resultados y discusión

Resultados experimentales

En la Figura 2 se muestran los valores de radiancia hemisférica descendente obtenidos según medidas realizadas con el goniómetro en la Albufera de Valencia sobre el panel directamente ($L^\downarrow_{\text{HEM_panel}}$), siendo este valor en cada ángulo cenital, el promedio de las tres medidas realizadas consecutivamente en dicho ángulo. El error de precisión asociado a las medidas del panel es el error cuadrático medio asociado a la desviación estándar de las tres medidas y al error asociado instrumental del radiómetro. Dicho error adquiere valores de: $\pm 1,4$, $\pm 1,7$, $\pm 1,7$ y $\pm 1,2 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{cm}$, para los canales 1 a 4 del CE312, respectivamente, así como para su corrección por el efecto de emisividad de éste ($L^\downarrow_{\text{HEM_ent}}$, ver apartado *corrección de emisividad del panel*). Además, junto a estos dos valores, se añade el valor obtenido por el método de la aproximación difusiva propuesto por Rubio *et al.* (1997) ($L^\downarrow_{\text{HEM_difusiva}}$), siendo este valor el promedio de toda la hora de sesión de medidas. El error de precisión asociado a esta técnica se obtiene de forma idéntica a la del panel, solo que esta vez la desviación estándar corresponde a todas las medidas de la sesión. Los valores que adquiere este error en los canales 1 a 4 del radiómetro son: $\pm 0,2$, $\pm 0,3$, $\pm 0,2$ y $\pm 0,2$

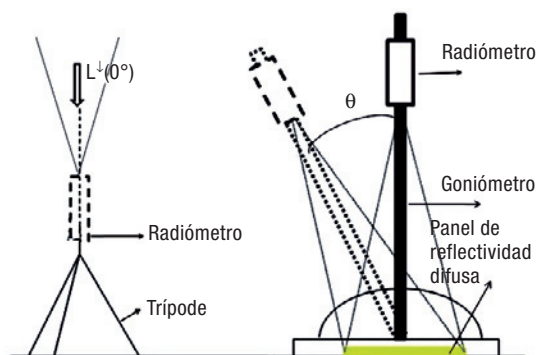


Figura 1. Montaje experimental para las medidas de los métodos directos utilizando un goniómetro.

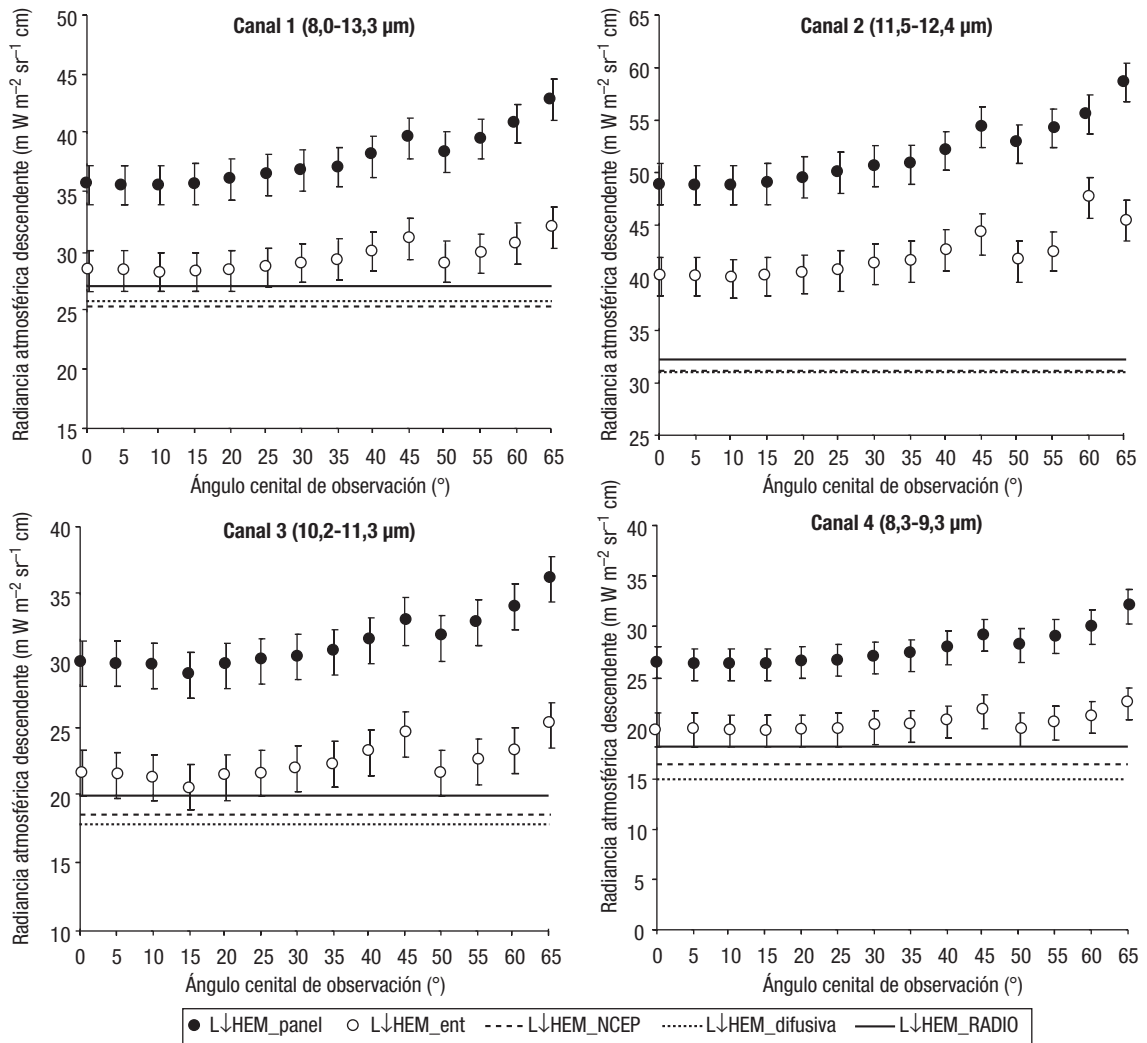


Figura 2. Resultados experimentales para los cuatro canales del radiómetro CE 312 de la medida de la radiancia hemisférica descendente, obtenida según: medida directa del panel ($L_{\text{HEM_panel}}^{\downarrow}$), la corrección del efecto de emisividad de éste ($L_{\text{HEM_ent}}^{\downarrow}$), el cálculo mediante simulación de perfiles atmosféricos del NCEP ($L_{\text{HEM_NCEP}}^{\downarrow}$), el método de la aproximación difusiva ($L_{\text{HEM_difusiva}}^{\downarrow}$) y mediante datos de un radiosondeo hecho en el momento y lugar de las medidas ($L_{\text{HEM_RADIO}}^{\downarrow}$).

$\text{mW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{cm}$, respectivamente. También se muestran valores de simulación calculados al introducir en un MTR perfiles del NCEP, ($L_{\text{HEM_NCEP}}^{\downarrow}$), o datos de un radiosondeo lanzado *in situ* ($L_{\text{HEM_RAD}}^{\downarrow}$). Los errores de estos dos parámetros simulados, se obtienen mediante la diferencia entre la radiancia hemisférica obtenida al introducir previamente el perfil atmosférico correspondiente y la radiancia obtenido al introducir nuevamente el perfil, pero modificando dos parámetros de éste: la temperatura del aire en $\pm 1 \text{ K}$ y la humedad relativa en $\pm 10\%$ (Seeman et al. 2006). El valor de dicho error en los canales 1 a 4 del radiómetro es: ± 2 , ± 4 , ± 3

y $\pm 2 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{cm}$, respectivamente. Decir que $L_{\text{HEM_difusiva}}^{\downarrow}$, $L_{\text{HEM_NCEP}}^{\downarrow}$ y $L_{\text{HEM_RAD}}^{\downarrow}$, no dependen del ángulo cenital que aparece en el eje de las abscisas, se decidió representar de este modo los resultados para una mayor comodidad visual a la hora de comparar las diferentes técnicas. Cabe comentar que se representa sólo la variación de L_{HEM}^2 con el ángulo cenital y no con el acimutal, porque se comprobó que la diferencia promedio entre los valores de $L_{\text{HEM_panel}}^{\downarrow}$ para un mismo ángulo cenital en sus cuatro acimuts es del orden de $\pm 1 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{cm}$, correspondiente a un error en temperatura de $\pm 1 \text{ K}$, y el error promedio de las medidas es alrede-

dor de $\pm 2 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{cm}$, siendo esta variación menospreciable. A partir de aquí se considerará en cada ángulo cenital, pues, el valor promedio de radiancia de sus cuatro acimuts.

En los resultados de las gráficas de la Figura 2, se observan valores de F_{sky} estables y casi constantes, en todo el intervalo angular cenital 0° - 50° , aunque para ángulos grandes ($\theta > 50^\circ$) se produce un efecto narciso del radiómetro, el cuál mide su propia contribución. Esto se debe al necesario acercamiento del radiómetro hacia el panel por la necesidad de reducir la superficie observada por el radiómetro, evitando así medir superficie no deseada. Como se puede observar el goniómetro contribuye significativamente a las medidas y por tanto convendría utilizar uno hecho de un material menos radiativo en el térmico, como por ejemplo, el aluminio pulido al espejo, cuya emisividad en el IRT está en torno a 0,03 (Rubio *et al.*, 1997). En todo caso, las discrepancias que todavía se observan entre el uso del panel y el resto de métodos, son debidas fundamentalmente por dos motivos. El primero que el panel tiene en cuenta la contribución de los posibles elementos circundantes (incluyendo los experimentadores), factor que no se considera en el resto de métodos y que evidentemente es solución de posibles fuentes de error. Y el segundo que el panel posee cierto valor de emisividad que debe ser tenido en cuenta, puesto que en la medida hecha directamente sobre el panel, éste tiene una cierta contribución que debe ser corregida. Esto se verá con más detalle en el siguiente punto.

Corrección de la emisividad del panel

Como se puede observar en las gráficas de la Figura 2, los valores de $L_{\text{HEM_panel}}^\downarrow$ distan bastante de los valores ofrecidos tanto por la aproximación difusiva como por los valores de simulación del NCEP y del radiosondeo. El motivo radica en la necesidad de eliminar la contribución radiativa propia del panel, puesto que tiene una emisividad no nula cuyo efecto debe tenerse en cuenta (Korb *et al.* 1996). La radiación procedente del panel responde entonces a la ecuación:

$$L_{\text{HEM_panel},i}^\downarrow = \epsilon_{\text{panel},i} B_i(T_{\text{panel}}) + (1 - \epsilon_{\text{panel},i}) L_{\text{HEM_ent},i}^\downarrow \quad [5]$$

donde $\epsilon_{\text{panel},i}$ es la emisividad del panel en el canal i del radiómetro, T_{panel} es la temperatura termométrica del panel y $L_{\text{HEM_ent},i}^\downarrow$ es el valor de la radiancia que interesa conocer, ya que está corregida del efecto de la emisividad del panel y en ella ya viene integrada la contribución tanto de la atmósfera como del entorno. Por tanto, si se despeja este parámetro en [5], nos queda:

$$L_{\text{HEM_ent},i}^\downarrow = \frac{L_{\text{HEM_panel},i}^\downarrow - \epsilon_{\text{panel},i} B_i(T_{\text{panel}})}{(1 - \epsilon_{\text{panel},i})} \quad [6]$$

Para obtener correctamente el valor de radiancia a partir de la expresión [6] se ha de conocer el valor de la temperatura del panel (T_{panel}) para calcular el término $B(T_{\text{panel}})$. La estimación de esta temperatura se hizo mediante un termómetro de contacto, con una precisión de $\pm 1 \text{ K}$. Se tomaron medidas de la temperatura del panel en cinco puntos distintos de la superficie, realizándose así un muestreo de toda ésta y considerándose el valor promedio. El error en la medida de la temperatura del panel implica una indeterminación en el cálculo de $L_{\text{HEM_ent}}^\downarrow$ de $\pm 0,12$, $\pm 0,14$, $\pm 0,13$ y $\pm 0,12 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{cm}$ para los canales 1 a 4, respectivamente, correspondientes a un error en la determinación de la temperatura de $\pm 0,2$, $\pm 0,2$, $\pm 0,3$ y $\pm 0,3 \text{ K}$. Considerar nula la emisividad del panel en el momento de tratar los datos experimentales, supone cometer una sobrestimación de $L_{\text{HEM_ent}}^\downarrow$ para los canales 1 a 4 del radiómetro de 9, 18, 12 y 11 $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$, respectivamente. Esto está reflejado en las gráficas de la Figura 2, si observamos la diferencia entre $L_{\text{HEM_ent}}^\downarrow$ y $L_{\text{HEM_panel}}^\downarrow$. En términos de temperatura atmosférica, en este caso, se comete un error de sobrestimación de 10, 10, 15 y 10 K, para los canales 1 a 4 respectivamente. Una forma más intuitiva de apreciar el efecto de menospreciar la emisividad del panel, es evaluar la diferencia en TST obtenida en [1] cuando se sustituye en ésta el valor de $L_{\text{HEM}}^\downarrow$ corregido por el efecto de emisividad del panel y sin corregir. La diferencia de temperatura de la superficie, $\Delta T = TST_{\text{no_corr}} - TST_{\text{corr}}$, se puede observar en la Figura 3 para el caso de una superficie de temperatura radiométrica de 303 K. Así, por ejemplo, para el caso de una emisividad de la superficie de 0,9 se obtiene una diferencia de $\pm 0,4$, $\pm 0,5$, $\pm 0,5$ y $\pm 0,4 \text{ K}$ para los canales 1 a 4, respectivamente. También se concluye que cuando

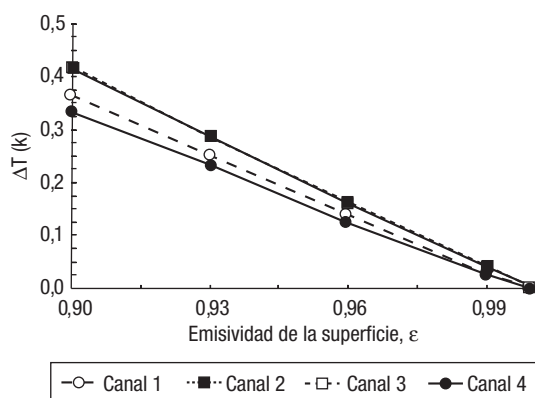


Figura 3. Diferencia entre la temperatura de brillo de una superficie cuando no se corrige el efecto de emisividad del panel y la temperatura de brillo de la misma superficie cuando se corrige dicho efecto, $\Delta T = T_{\text{no_corr}} - T_{\text{corr}}$, en función del valor de la emisividad para los 4 canales del CE312.

más grande es la emisividad de la superficie, menor es el efecto de emisividad del panel.

Comparación de métodos

A partir de los resultados expuestos en la Figura 2, se puede ver que todos los métodos utilizados convergen en valores comparables de $L_{\text{HEM}}^{\downarrow}$, siendo los valores simulados con perfiles NCEP los que sufren mayor desviación y que presentan un mayor error; también presentan cierta incongruencia con los valores del panel los valores obtenidos mediante la aproximación difusiva $L_{\text{HEM_difusiva}}^{\downarrow}$. Las medidas de $L_{\text{HEM}}^{\downarrow}$ del panel, una vez corregidas del efecto de emisividad de éste, coinciden con los valores ofrecidos con los datos del radiosondeo realizado en la zona (excepto en el canal 2), lo que lleva a la conclusión de que las medidas de F_{sky} , mediante el uso de un panel de reflectividad difusa son más fiables, siempre que se realicen en el intervalo angular cenital 0° - 50° y distanciando el radiómetro del panel entre 80 y 90 cm para evitar el efecto narciso de éste.

Conclusiones

En el presente estudio se ha tratado la determinación de un parámetro imprescindible en radiometría de campo en el infrarrojo térmico, la irradiancia atmosférica descendente, F_{sky} . Se

han valorado los distintos métodos existentes hoy en día para obtenerla, tanto directamente como mediante simulaciones en un MTR. La conclusión a la que se llega es que los métodos de medida directa de F_{sky} , suponen la mejor y más rápida alternativa, y concretamente medirla mediante la utilización de un panel de reflectividad difusa es sin duda la mejor de todas ellas. El panel permite, mediante una simple medida, obtener un valor de F_{sky} de toda la contribución hemisférica de la atmósfera que rodea a la superficie en estudio, además también tiene en cuenta la contribución radiativa de elementos circundantes, y su utilización no viene limitada por las condiciones atmosféricas del momento, por lo que puede usarse incluso bajo condiciones de nubosidad parcial y variable.

No obstante, cabe tener en cuenta ciertas precauciones en el uso del panel. El pequeño valor de emisividad que posee el panel, añade una cierta contribución radiativa a las medidas realizadas sobre éste. Si no se corrige dicho efecto de emisividad del panel, al determinar la TST de una superficie se estará obteniendo un valor sobreestimado de ésta. Sobreestimación que aumenta a medida que disminuye la emisividad de la superficie de estudio. Variando este error de temperatura en 0,4 K por cada disminución del 10% de la emisividad de la superficie. Por lo tanto, se tiene que conocer la emisividad del panel en el intervalo espectral en el que se mide, y se debe tener un control de la temperatura de éste, para corregir el efecto radiativo de la emisividad en las medidas originales.

Finalmente, con un panel de características similares al presentado aquí, se puede obtener el valor de F_{sky} , realizándose una única medida, situando el radiómetro entre 80 y 90 cm, desde cualquier ángulo acimutal. Aunque el ángulo cenital es independiente, convendría realizar la medida en el intervalo 0° - 50° , controlando, en todo caso, la temperatura del panel en el momento de las medidas.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el MICINN (becas de V. García y M. Mira y contrato de J.M. Galve. Proyectos CGL2007-64666/CLI

y CGL2007-29819-E/CLI cofinanciados con fondos FEDER), y por la Conselleria d'Educació de la Generalitat Valenciana (PROMETEO/2009/086). Los autores desean agradecer la inestimable ayuda del Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo (CEAM) por facilitarnos, para el estudio, los datos del radiosondeo realizado en la Albufera de Valencia, en su proyecto TRANSREG (CGL2007-65359/CLI).

Referencias

- BERK, A., ANDERSON, G. P., ACHARYA, P. K., CHETWYND, J. H., BERNSTEIN, L. S., SHETTLE, E. P., MATTHEW, M. W. & ADLER-GOLDEN S. M. 1999. *MODTRAN 4 user's manual*, Air Force Research Laboratory, Space Vehicles Directorate, Air Force Materiel Command, Hanscom AFB, MA, 95 pp.
- BROGNIEZ, G., PIETRAS, C., LEGRAND, M., DUBUISSON, P. & HAEFFELIN, M. 2003. A high-accuracy multiwavelength radiometer for in situ measurements in the thermal infrared. Part II: Behavior in field experiments, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 20: 1023-1033.
- COLL, C., CASELLES, V., GALVE, J. M., VALOR, E., NICLÒS, R., SÁNCHEZ, J. M. & RIVAS, R. 2005. Ground measurements for the validation of land surface temperatures derived from AATSR and MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 97: 288-300.
- KALNAY, E., KANAMITSU, M., KISTLER, R., COLLINS, W., DEAVEN, D., GANDIN, L., IREDELL, M., SAHA, S., WHITE, G., WOOLLEN, J., ZHU, Y., CHELLIAH, M., EBISSUZAKI, W., HIGGINS, W., JANOWIAK, J., MO, K.C., ROPELEWSKI, C., WANG, J., LEETMAA, A., REYNOLDS, R., JENNE, R. & JOSEPH, D. 1995. NCEP/NCAR 40 Year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society* pp. 437-471.
- KONDRATYEV K. Y., 1969. *Radiation in the Atmosphere*. New York: Academic Press.
- KORB, A.R., DYBWAD, P., WADSWORTH, W. & SALISBURY, J. W. 1996. Portable Fourier transform infrared spectroradiometer for field measurements of radiance and emissivity, *Applied Optics*, 35(10): 679-1692.
- RUBIO, E., CASELLES, V. & BADENAS, C. 1997. Emissivity Measurements of Several Soils and Vegetation Types in the 8-14 μm Wave Band: Analysis of Two Field Methods. *Remote Sensing of Environment*, 59: 490-521.
- RUBIO, E. 1998. Hacia la optimización de la medida de la emisividad y la temperatura en teledetección. Tesis Doctoral, cap. 2: 42-51.
- SEEMANN, S. W., BORBAS, E. E., LI, J., MENZEL, W. P. & GUMLEY, L. E. 2006. MODIS Atmospheric Profile Retrieval Algorithm Theoretical Basis Document. Madison, WI: Univ. Wisconsin-Madison.
- WAN, Z. & DOZIER, J. 1989. Land-surface temperature measurement from space: Physical principles and inverse modeling. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 27(3): 268-277.