

Estudio de la dependencia angular de la emisividad de los suelos sin vegetación en el infrarrojo térmico

V. García-Santos, E. Valor, V. Caselles, M. A. Burgos y C. Coll

*Departamento de Física de la Tierra y Termodinámica, Universitat de Valencia,
C/ Dr. Moliner, 50, Brujassot (Valencia)*

Resumen

En el dominio espectral infrarrojo térmico (IRT) la emisividad (ϵ) de los suelos inorgánicos (SI) sin vegetación, puede sufrir variaciones debido a tres factores: el intervalo espectral de medida, la composición (macroscópica y microscópica) de la superficie y la geometría de observación de ésta. Uno de los parámetros de superficie afectado por la variación de su ϵ es la temperatura (TST), parámetro clave en estudios como el balance de energía entre la atmósfera y la superficie, la prevención del riesgo de incendios o la medida de la humedad del suelo. Dadas las escasas publicaciones existentes en lo referente a la medida experimental de la anisotropía de la ϵ en SI, el presente estudio llevó a cabo una campaña de medida de la variación angular de la ϵ en doce SI, clasificados según su composición granulométrica en el triángulo textural definido por el United States Department of Agriculture. Para ello se diseñó un dispositivo goniométrico capaz de medir la radiancia angular de un SI mediante el uso de un radiómetro multispectral operando en seis canales del IRT situados entre 8 y 14 μm . Los resultados mostraron que la ϵ es independiente del ángulo de visión acimutal, y presenta poca dependencia con el ángulo cenital para valores inferiores a 30°. No obstante, las medidas de radiancia o temperatura realizadas a ángulos cenitales superiores a 60°, deben ser corregidas del efecto angular en la ϵ del SI. Se pueden observar diferencias en emisividad de hasta 0,083 entre el nadir y 70° cenitales para un SI arenoso con un alto contenido de cuarzo. Esta diferencia implicaría, si fuera ignorada, sobreestimar la TST del suelo en unos 5°C para un SI con una TST de 40 °C.

Palabras clave: emisividad angular, infrarrojo térmico, temperatura, medidas experimentales, suelos desnudos inorgánicos.

Abstract

Study of the angular dependence of the emissivity on non vegetated soils in the thermal infrared

Within the thermal infrared (TIR) spectral domain, emissivity (ϵ) of inorganic bare soils (IBS) can suffer variations due three factors: spectral range of measurements, surface composition (both macroscopic and microscopic) and viewing geometry of the surface. One of the surface parameters affected by possible variations of ϵ is the temperature (LST), which is in turn a key parameter in several studies such as atmosphere-surface energy budget, wildfire risk prevention or soil moisture estimations. Given the few publications on experimental measurements concerning anisotropy in ϵ of IBS, a field campaign was carried out with the aim of measuring the angular variation of ϵ in twelve IBS, classified according to grain size in the textural triangle defined by the United States Department of Agriculture. A goniometric device was designed capable of measuring the angular radiance of an IBS by means of using a multispectral radiometer working on six TIR channels located between 8 and 14 μm . Results showed that ϵ is azimuthally independent and also with zenith angle from nadir up to 30°. Nevertheless radiance or temperature measurements made on IBS at zenith angles upper to 60°, must be corrected due to angular effects of ϵ . Differences up to 0.083 in ϵ can be found between nadir and 70° for a sandy IBS with high quartz content. These differences involve, if ignored, overestimating LST around 5 °C for IBS with a ϵ value at nadir of 0.94 and a LST of 40 °C.

Key words: angular emissivity, thermal infrared, temperature, experimental measurements, inorganic bare soils.

* Autor para la correspondencia: vicente.garcia-santos@uv.es

Recibido: 04-11-11; Aceptado: 03-07-12.

Introducción

La aparición en las dos últimas décadas de sensores, a bordo de satélites espaciales que observan la superficie terrestre desde ángulos de visión elevados [$\pm 55^\circ$ para MODIS en la plataforma EOS Terra/Aqua (Barnes *et al.* 2002), $\pm 55.4^\circ$ para AVHRR/3 a bordo de NOAA 17/18 (NOAA, 2001), visión biangular 0° - 55° para el sensor AATSR a bordo del satélite ENVISAT (Llewellyn-Jones *et al.* 2001) o hasta $\pm 72^\circ$ del sensor geostacionario SEVIRI-MSG (Merchant *et al.* 2006)], supone un interesante campo de estudio en la teledetección en el infrarrojo térmico (IRT). Prueba de ello es la aparición de trabajos en los que se pone de manifiesto la importancia de las medidas angulares en el IRT. Por ejemplo, Lagouarde *et al.* (2000, 2004) encontraron un efecto angular en la medida de la temperatura de la superficie terrestre (TST) sobre un bosque y sobre la ciudad de Marsella, respectivamente, Niclòs *et al.* (2007) mostraron la mejora obtenida al determinar la temperatura de la superficie marina mediante un algoritmo split-window, cuando se tenían en cuenta aspectos angulares en las medidas de radiancia para dos canales espectrales térmicos (31 y 32) del sensor MODIS, Chehbouni *et al.* (2001) obtuvo una relación entre la humedad del suelo y la diferencia de la temperatura de dicho suelo a dos ángulos distintos, Ball & Pinkerton (2006) demostraron la utilidad de las medidas angulares en volcanología.

La obtención de la TST es indispensable en multitud de estudios relacionados con procesos de la superficie terrestre tales como el transporte de energía en la interfase superficie-atmósfera, prevención de incendios o medida de la humedad del suelo y del índice de vegetación, por ejemplo. Una precisa obtención de la TST desde satélite pasa por una necesaria corrección sobre la medida del efecto atmosférico y de la emisividad de la superficie, ϵ . Por tanto el conocimiento de su comportamiento respecto al ángulo de visión es de importancia al tratar datos obtenidos por sensores como los mencionados anteriormente, pues imprecisiones en la obtención de la emisividad conllevan errores sistemáticos en la obtención de la TST.

Existen diversos estudios sobre la variación angular de la emisividad térmica, $\epsilon(\theta, \varphi)$, con el ángulo de observación para distintos tipos de superficie: Agua (Rees & James, 1992 y Niclòs *et al.*, 2005), nieve (Dozier & Warren, 1982 y Hori *et al.*, 2006), vegetación (McAtee *et al.*, 2003) o lava (Ball & Pinkerton, 2006). El presente estudio se centra en un tipo de superficie, suelos inorgánicos sin vegetación (SI), los cuales ocupan una gran extensión en la superficie terrestre en forma y textura diversa tales como desiertos, playas o suelos preparados para el cultivo. Relativamente pocos trabajos se pueden encontrar relacionados con la variación de la emisividad angular en SI, los más significativos se enumeran a continuación: Barton & Takashima (1986) y Takashima & Masuda (1987) tomaron medidas de $\epsilon(\theta, \varphi)$ para un suelo arenoso con un alto contenido en cuarzo en el intervalo espectral 7-13 μm . Becker *et al.* (1985) ampliaron el espectro de muestras añadiendo medidas de $\epsilon(\theta, \varphi)$ para limo y un suelo con un alto contenido de Al_2O_3 . Labed & Stoll (1991) abordaron el estudio del valor relativo de la $\epsilon(\theta, \varphi)$, aparte de para un suelo arenoso y otro limoso, para tres suelos agrícolas con diferente composición textural. Snyder *et al.* (1997) estudiaron la $\epsilon(\theta, \varphi)$ de un suelo orgánico, uno limoso y otro arenoso, junto a un suelo con vegetación y un suelo de grava. Sobrino & Cuenca (1999) y Cuenca & Sobrino (2004) añadieron a los trabajos previos una muestra de arcilla y otra de césped.

El presente estudio pretende investigar en profundidad el comportamiento angular de la emisividad térmica para una amplia colección de SI representativa de la mayor parte de los tipos de suelos existentes en la Tierra desde un punto de vista textural, prestando especial atención a aspectos estructurales tales como rugosidad, tamaño del grano o porosidad. Para ello se llevó a cabo una campaña experimental mediante la construcción de un goniómetro, que junto a dos radiómetros térmicos multiespectrales, permitió realizar medidas simultáneas de los SI en dos configuraciones angulares distintas.

En la siguiente sección se expondrá la teoría en que se basó la obtención de $\epsilon(\theta, \varphi)$ para los SI estudiados. La sección 3 presenta en detalle la metodología propuesta para la obtención de las medidas. La sección 4 muestra los

resultados obtenidos y la discusión que de ellos se deriva. Finalmente las conclusiones más relevantes se exponen en la sección 5.

Teoría

Para un sensor térmico operando en la ventana atmosférica 8-14 μm , que mide la radiación procedente de una superficie a una distancia entre ambos lo suficientemente pequeña para ignorar el efecto de la atmósfera existente entre ambos, la radiancia que recibe consta de dos términos de contribución: (i) la emisión de radiación directa desde la superficie hacia el sensor, y (ii) la reflexión de la radiación incidente en la superficie procedente de la atmósfera y posibles objetos circundantes (Norman & Becker, 1995):

$$L_i(\theta, \varphi) = \varepsilon(\theta, \varphi) B_i(TST) + \rho_i(\theta, \varphi) L_i^\downarrow \quad [1]$$

donde $L_i(\theta, \varphi)$ es la radiancia espectral en la dirección angular cenital θ y acimutal φ , medida directamente por el sensor procedente de la muestra, a la que considera comportamiento de cuerpo negro, $L_i(\theta, \varphi) = B_i(T_b)$, donde T_b es la temperatura de brillo de la muestra, $B_i(TST)$ es la función Planck de radiación de cuerpo negro a una temperatura real de la muestra TST, L_i^\downarrow es la radiancia espectral hemisférica descendente compuesta por la contribución atmosférica y posibles elementos circundantes, $\rho_i(\theta, \varphi)$ es la reflectividad hemisférico-direccional (Nicodemus *et al.* 1977), y $\varepsilon_i(\theta, \varphi)$ es la emisividad absoluta de la superficie. El subíndice i representa la banda espectral en que se realizan las medidas.

La relación entre la emisividad de superficie y la reflectividad hemisférico-direccional para una superficie opaca a la radiación y en equilibrio térmico, se relaciona mediante la Ley de Kirchhoff (Nicodemus, 1965) como:

$$\varepsilon_i(\theta, \varphi) = 1 - \rho_i(\theta, \varphi) \quad [2]$$

Esta relación puede ser aplicada en dos casos concretos, o bien se tiene una radiación anisótropa incidente sobre una superficie Lam-

bertiana o en la situación inversa la superficie no-Lambertiana recibe radiación incidente isótropa.

De las expresiones [1] y [2] se deduce fácilmente una expresión de la emisividad:

$$\varepsilon_i(\theta, \varphi) = \frac{L_i(\theta, \varphi) - L_i^\downarrow}{B_i(TST) - L_i^\downarrow} \quad [3]$$

Sin embargo llevar a cabo el cálculo de la emisividad absoluta según la Ec. [3] es una tarea más complicada de lo que parece *a priori*. Conocer con exactitud el valor de la TST es extremadamente complicado dado que dicho valor corresponde a la capa del medio cuyo grosor es igual a la profundidad de penetración de la radiación electromagnética a una longitud de onda dada, siendo en el caso del IRT de unos 8-10 μm , y en el presente estudio no se dispuso de termómetros capaces de medir la TST en esos primeros 10 μm de profundidad.

La solución a este problema pasa por calcular valores relativos de la $\varepsilon_i(\theta, \varphi)$ respecto a su valor absoluto a nadir (Labeled & Stoll, 1991). Siempre y cuando se consiga realizar dos o más medidas, una de ellas a nadir y el resto en una configuración angular arbitraria, simultáneas o en un periodo de tiempo tal que la TST y la L_i^\downarrow permanezcan estables, de la Ec. [3] se puede obtener una expresión de la emisividad espectral relativa sin más que dividir la Ec. [3] por su misma expresión en visión nadir:

$$\varepsilon_{ri}(\theta, \varphi) = \frac{L_i(\theta, \varphi) - L_i^\downarrow}{L_i(0, 0) - L_i^\downarrow} \quad [4]$$

donde ε_{ri} es la emisividad espectral relativa y $L_i(0, 0)$ es la radiancia medida por el sensor en el caso particular de visión nadir.

Dado que esta expresión es el cociente entre la emisividad absoluta a un ángulo dado y a nadir, previo conocimiento de este último valor de emisividad, se puede obtener su valor absoluto en cualquier dirección según:

$$\varepsilon_i(\theta, \varphi) = \varepsilon_{ri}(\theta, \varphi) \varepsilon_i(0, 0) \quad [5]$$

La expresión [5] será la empleada en el presente estudio para obtener el valor de emisividad espectral.

Tabla 1. Características texturales y mineralógicas de los 12 de SDI seleccionados. Más información se puede encontrar en Mira et al. 2007 y 2010

Notación	Textura según USDA	Clasificación textural (%)			Clasificación mineral (%)					
		Arena	Limo	Arcilla	Cuarzo	Feldespatos	Filosilicatos	Hematita	Calcita	Gibbsite
B	arenoso	99	0.9	0.1	95.3	2.9	—	—	—	—
BR3	arenoso	92	2	6	100	—	—	—	—	—
LW03	Franco-arenosa	77	18	5	53.7	46.3	—	—	—	—
BR2	Areno-francosa	69	15	16	82.3	16.8	0.8	—	—	—
E	Areno-francosa	67	20	13	72	21.4	3.2	—	—	—
LW52	Areno-arcillo-francosa	62	15	23	58.4	32.2	9.4	—	—	—
LW13	Franca	51	35	14	76	16.7	4.8	2.6	—	—
F	Franca	50	30	20	19.9	4.5	4.1	8.7	62.9	—
BR1	Arcillosa	40	6	54	37.9	—	—	13.1	—	49.0
LW45	Limo-francosa	29	54	17	72.4	23.4	4.2	—	—	—
C	Arcillo-Francosa	20	43	37	29.4	5.5	9.0	—	56.1	—
D	Limo-arcillo-francosa	14	50	35	19.3	3.5	6.0	8.9	62.3	—

Metodología

Clasificación de SI

Con la finalidad de obtener resultados lo más generales posibles, se usaron unas 12 muestras representativas de 9 de los 12 tipos de suelo clasificados según su composición granulométrica de acuerdo a la clasificación hecha por el United States Department of Agriculture (USDA). Dichas muestras fueron recolectadas en diferentes zonas (todas las BR proceden de Brasil, las LW de Estados Unidos, también hay muestras de Argentina y de España, etc.). En la Tabla 1 se puede observar las características de los 12 SI disponibles para el estudio experimental llevado a cabo.

Según Lagouarde *et al.* (1995), SI con un radio del grano inferior a 4-5 cm y superior a 200 μm , sufre variaciones de la temperatura de brillo a medida que se aumenta el ángulo cenital de observación, como consecuencia de la variación angular de su emisividad térmica. Los suelos presentados en la Tabla 1, se encuentran dentro de este intervalo granulométrico. Para más información sobre las características de estas muestras se remite al lector a ver los trabajos de Mira *et al.* (2007 y 2010).

Instrumentación

Las medidas de radiancia angular para los SI propuestos en la Tabla 1 fueron llevadas a cabo en la terraza de la Facultad de Física de la Universitat de Valencia (13°30'25"N, 0°25'13"W) para determinar el comportamiento angular de la emisividad térmica mediante el cálculo de la Ec. [5].

Las radiancias fueron medidas con un radiómetro térmico multispectral CE 312-2 de la casa CIMEL Electronique, el cual opera en 6 bandas espectrales distintas. Una banda amplia abarcando el intervalo 7,7-14,3 μm (canal 1) y 5 bandas más estrechas situadas a lo largo de la banda ancha: 8,2-8,7 μm (canal 6), 8,4-8,9 μm (canal 5), 8,9-9,4 μm (canal 4), 10,1-11,1 μm (canal 3) y 10,9-11,9 μm (canal 2). Este radiómetro fue calibrado frente a una fuente térmica con comportamiento cercano al de cuerpo negro, Landcal Blackbody Source (P80P). Dicha fuente a su vez, fue calibrada frente a un radiómetro IRT de referencia en una campaña de comparación de instrumentos IRT organizada por el Committee on Earth Observation Satellites (CEOS) en el National Physical Laboratory (NPL, London) en Abril de 2009 (Theocarus & Fox, 2010) ofreciendo una precisión de $\pm 0,19^\circ\text{C}$. La temperatura de cuerpo negro que medía el CE 312-2, comparada con aquella ofrecida por la fuente P80P, para

un intervalo de temperaturas desde -5 hasta 50 °C, presentaba una precisión de $\pm 0,03$ °C en todos sus canales, lo que concluyó que el CE 312-2 tiene una precisión de $\pm 0,19$ °C.

La medida de L_i^\perp en la Ec. [4] se obtuvo mediante el uso de un panel de reflectividad difusa en el IRT, Infragold Reflectance Target (IRT-94-100) de la casa Labsphere. Se trata de una superficie de oro rugosa, de dimensiones $25,4 \times 25,4$ cm², caracterizada por una alta reflectividad cuyo valor filtrado espectralmente a los 6 canales del radiómetro es: 0,926 (canal 1), 0,927 (canal 2), 0,926 (canal 3), 0,920 (canal 4), 0,917 (canal 5) y 0,918 (canal 6), con un error promedio de $\pm 0,009$ en todos los canales. No obstante las medidas directas realizadas sobre el panel deben ser convenientemente corregidas dado el efecto radiativo del pequeño valor de emisividad de la superficie dorada, cuyo valor se puede obtener sin más que aplicar a la Ec. [2] los valores de reflectividad previos. La expresión final de L_i^\perp calculada a partir de medidas del panel es:

$$L_i^\perp = \frac{L_{panel,i} - \varepsilon_{panel,i} B_i(T_{panel,i})}{1 - \varepsilon_{panel,i}} \quad [6]$$

donde $L_{panel,i}$ es la medida directa de radiancia hecha sobre el panel, $\varepsilon_{panel,i}$ es la emisividad espectral del panel y T_{panel} es la temperatura real de la superficie dorada del panel medida mediante un termómetro de contacto con una precisión de ± 1 °C. Dicha imprecisión implica cometer un error en temperatura de brillo de la atmósfera y entorno de $\pm 0,3$ °C, al determinar L_i^\perp para los 6 canales del radiómetro.

Se eligió la alternativa de usar un panel de reflectividad difusa dadas las ventajas que presentaba comparado con otros métodos conocidos (García-Santos *et al.*, 2011): rápida adquisición de medidas, puede ser utilizado bajo condiciones de nubosidad variable y lo más importante, tiene en cuenta la contribución radiativa de elementos circundantes a la superficie, ajenos a la atmósfera.

Método de medida

Con la finalidad de poder calcular el valor relativo a nadir de la emisividad térmica espectral



Figura 1. Fotografía del montaje experimental en el momento de medir simultáneamente un SDI a nadir (CE1) y a un ángulo cenital (CE2).

a diferentes ángulos de observación, propuesto por la Ec. [4], se decidió realizar medidas simultáneas de la radiancia espectral procedente de un SI, fijando en un goniómetro, un radiómetro a nadir y un segundo radiómetro en una combinación angular (θ, ϕ), pudiéndose desplazar éste último a lo largo del arco del goniómetro variando el ángulo de observación. De esta forma se consigue fácilmente que permanezcan constantes TST y L_i^\perp , siendo apropiado el uso de la Ec. [4]. Se puede ver el montaje experimental en la **Figura 1**, donde se aprecia una configuración de medida simultánea de la radiancia de una muestra a nadir, radiómetro etiquetado como CE1 y a una dirección angular (θ, ϕ), radiómetro CE2.

La obtención de las medidas angulares se llevó a cabo mediante un barrido acimutal dentro de uno cenital. El principal barrido es el cenital, variando CE2 desde $\theta = 10^\circ$ hasta $\theta = 70^\circ$ en intervalos de 10° . Dentro de este barrido cenital, para cada combinación cenital de radiómetros, CE1(0°)- CE2(θ), se realizó un barrido acimutal de la muestra girándola a intervalos de 90° , obteniéndose por tanto 4 medidas en dicha combinación. Por último, el barrido cenital se realizó 3 veces midiéndose, en resumen, la radiancia para una combinación angular (θ, ϕ) dada, con un espacio temporal de 60 minutos.

La decisión de evaluar acimutalmente la muestra girando ésta, y no el goniómetro, se basó en que aparte de ser un método rápido y cómodo, permitía evaluar la muestra a distin-

tas orientaciones acimutales con exactamente las mismas condiciones de entorno (elevación solar, contribución atmosférica, contribución de elementos circundantes, etc.). De esta forma cualquier variación de la emisividad con el acimut puede ser achacada exclusivamente a la muestra en estudio.

L_i^\downarrow es medida antes y después de cada barrido cenital colocando el panel de reflectividad difusa en el FOV del CE1(0°). El lapso de tiempo entre ambas medidas es de 30 minutos, lo que conlleva a una fluctuación media del valor de L_i^\downarrow respecto a su promedio en torno al 7%, para todos los barridos en todas las muestras. Esta fluctuación, tomada como error de precisión, supone cometer un error en el cálculo de $\epsilon_{ri}(\theta, \varphi)$ de $\pm 0,0003$, en torno a un 0,03% de su valor, por tanto a todos los efectos dicha fluctuación es mínima y se puede tomar el valor promedio de L_i^\downarrow como el apropiado en la Ec. [4].

Conocida la metodología e instrumentación empleada para obtener la $\epsilon_{ri}(\theta, \varphi)$ mediante Ec. [4] la obtención de su valor absoluto es inmediata atendiendo a la Ec. [5]. Tan solo se necesita el valor absoluto a nadir de la emisividad de la superficie. Existen muchas técnicas para obtener dicho valor, pero en el presente estudio se ha recurrido al método TES propuesto por Gillespie *et al.* (1998), y adaptado al caso de nuestra instrumentación para ser utilizado en medidas de campo (Payan and Royer, 2004).

El error asociado a la $\epsilon_{ri}(\theta, \varphi)$ es el mayor entre: (i) el obtenido por propagación de errores, a partir del error en la radiancia medida según la Ec. [4], y (ii) la desviación estándar de los tres valores de $\epsilon_{ri}(\theta, \varphi)$ calculados según Ec. [4] para una configuración angular (θ, φ) dada.

El error asociado a la $\epsilon_i(\theta, \varphi)$ se obtiene al aplicar nuevamente la propagación de errores, esta vez en la Ec. [5] obteniendo la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} \delta\epsilon_i(\theta, \varphi) &= \\ &= \sqrt{\left[\epsilon_{ri}(\theta, \varphi) \delta\epsilon_i(0,0)^2 + \epsilon_i(0,0) \delta\epsilon_{ri}(\theta, \varphi)^2 \right]} \quad [6] \end{aligned}$$

Resultados y discusión

En la **Figura 2** se representa la variación angular de la emisividad absoluta, para cada uno

de los 12 SI seleccionados para este estudio, en los 6 canales del radiómetro térmico. El error mostrado es el obtenido a partir de la Ec. [7].

Como se observa en dicha figura, sólo está representada la variación cenital, no así la acimutal. La explicación se encuentra analizando los resultados: para todos los SI medidos, la variación cenital de $\epsilon_{ri}(\theta, \varphi)$, era bastante mayor que la acimutal. De hecho, la variación acimutal promedio de $\epsilon_{ri}(\theta, \varphi)$ para cada ángulo cenital ofrece una desviación estándar por debajo de $\pm 0,01$. Esta incertidumbre, en el caso de los valores absolutos de la emisividad, supone cometer un error al obtener T_b de $\pm 0,5$ °C mediante la Ec. [1], calculado usando un valor promedio de la emisividad en el nadir obtenido de todas las muestras de: 0,943, 0,967, 0,960, 0,897, 0,900 y 0,893, del canal 1 a 6 del radiómetro, respectivamente, y para una TST de 40 °C y una temperatura atmosférica de -50 °C. Por lo tanto, a partir de estos resultados se puede deducir que todos los SI presentan anisotropía frente a la variación cenital, siendo muy reducida así en la visión acimutal.

Por último, el valor de $\epsilon_{ri}(\theta, \varphi)$ que se utiliza en la Ec. [5] para obtener el valor absoluto en un ángulo cenital dado, ha sido el valor acimutal promedio para este ángulo cenital. El error asociado a esta emisividad relativa promedio, $\epsilon_{ri}(\theta)$, ha sido el mayor entre la desviación estándar del promedio acimutal y los errores descritos en la sección 3.3. En resumen, el error promedio en la emisividad para los 12 SI de $\epsilon_{ri}(\theta)$ en cada ángulo cenital, desde $\theta = 10^\circ$ a 70° (en intervalos de 10°), es el siguiente: $\pm 0,003$, $\pm 0,003$, $\pm 0,003$, $\pm 0,004$, $\pm 0,005$, $\pm 0,006$ y $\pm 0,007$, respectivamente.

Características espectrales de $\epsilon_i(\theta, \varphi)$ y su efecto sobre TST

Analizando la diferencia entre el valor de $\epsilon_i(\theta)$ en el nadir y a otros ángulos cenitales, los resultados muestran que las variaciones angulares más notables se producen en suelos arenosos con un alto contenido en cuarzo. Ningún SI presenta variación angular para ángulos cenitales menores de 30° , independientemente de su composición, en cambio para ángulos superiores a 60° se supera el valor umbral de 0,01

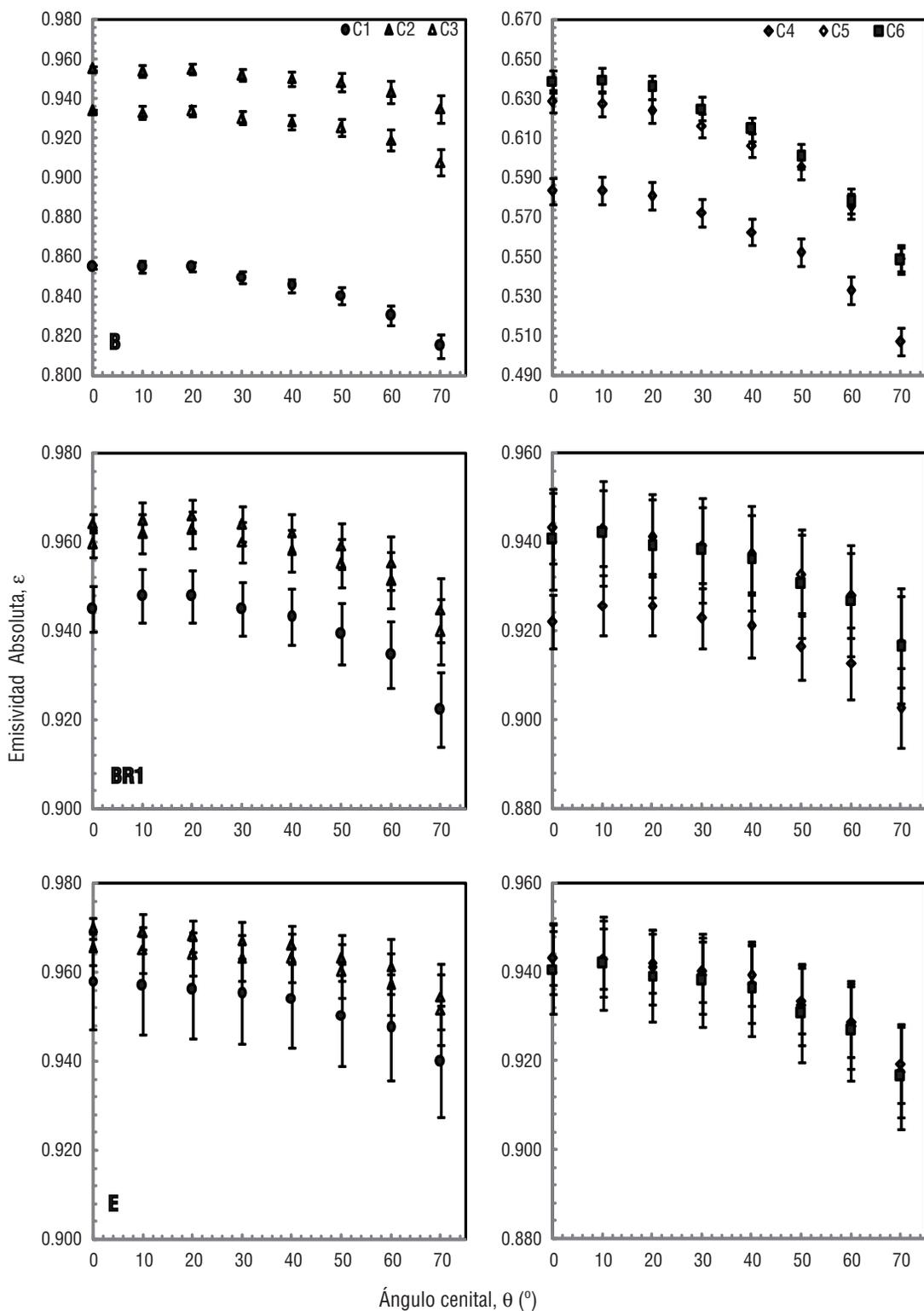


Figura 2. Valores absolutos de emisividad angular en función del ángulo cenital, obtenidos para los 12 SI seleccionados. Se presentan los resultados en los 6 canales espectrales del radiómetro CE 312-2. Partiendo de izquierda en dirección horizontal, el primer gráfico corresponde a los canales 1 (8-14 μm) 2 y 3 (asignados en 10-12 μm) y el segundo gráfico corresponde a los canales 4, 5 y 6 (8-9,5 μm). Se incluye el error de emisividad absoluta, calculado según Ec. [7].

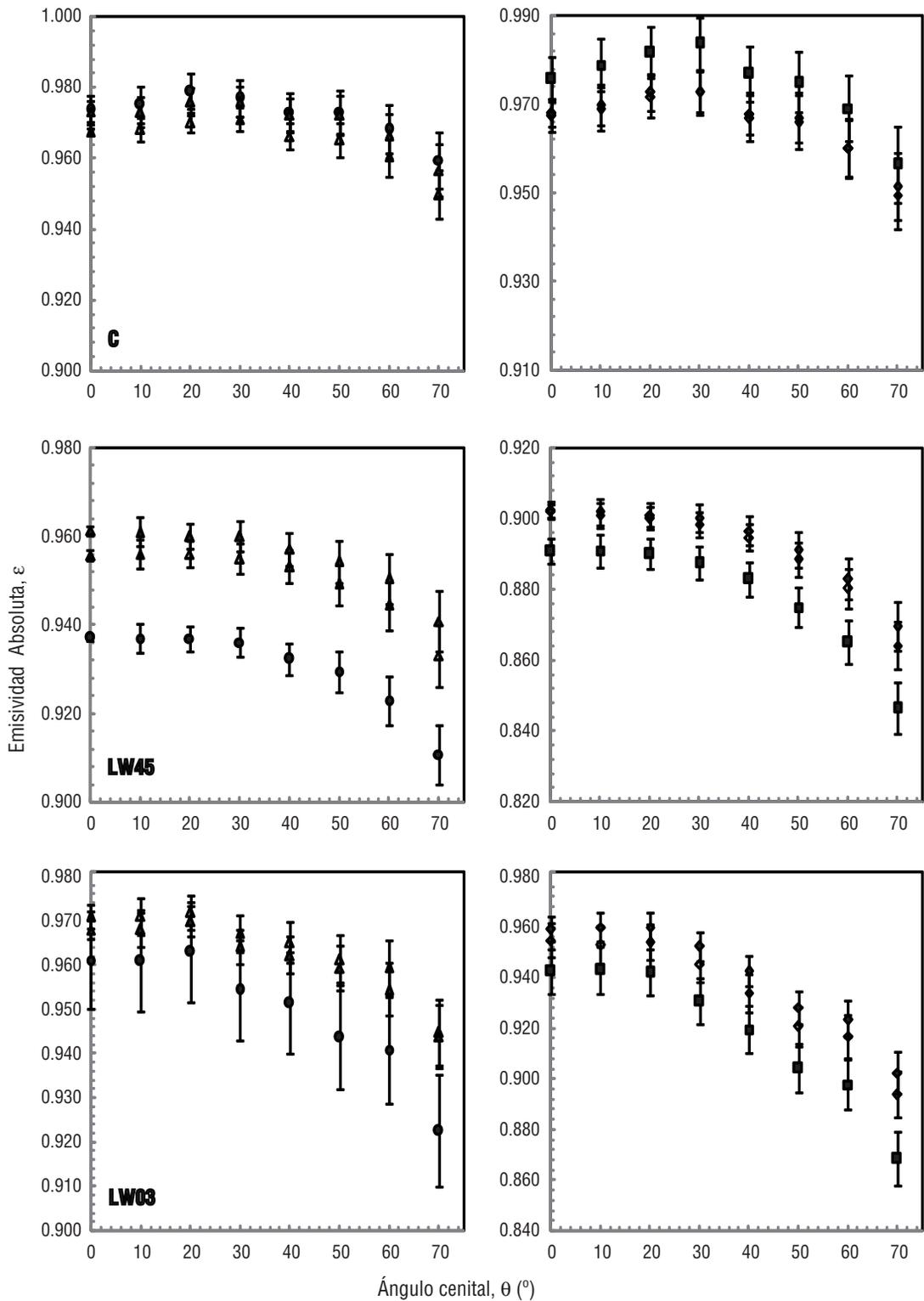


Figura 2 (cont.). Valores absolutos de emisividad angular en función del ángulo cenital, obtenidos para los 12 SI seleccionados. Se presentan los resultados en los 6 canales espectrales del radiómetro CE 312-2. Partiendo de izquierda en dirección horizontal, el primer gráfico corresponde a los canales 1 (8-14 μm) 2 y 3 (asignados en 10-12 μm) y el segundo gráfico corresponde a los canales 4, 5 y 6 (8-9,5 μm). Se incluye el error de emisividad absoluta, calculado según Ec. [7].

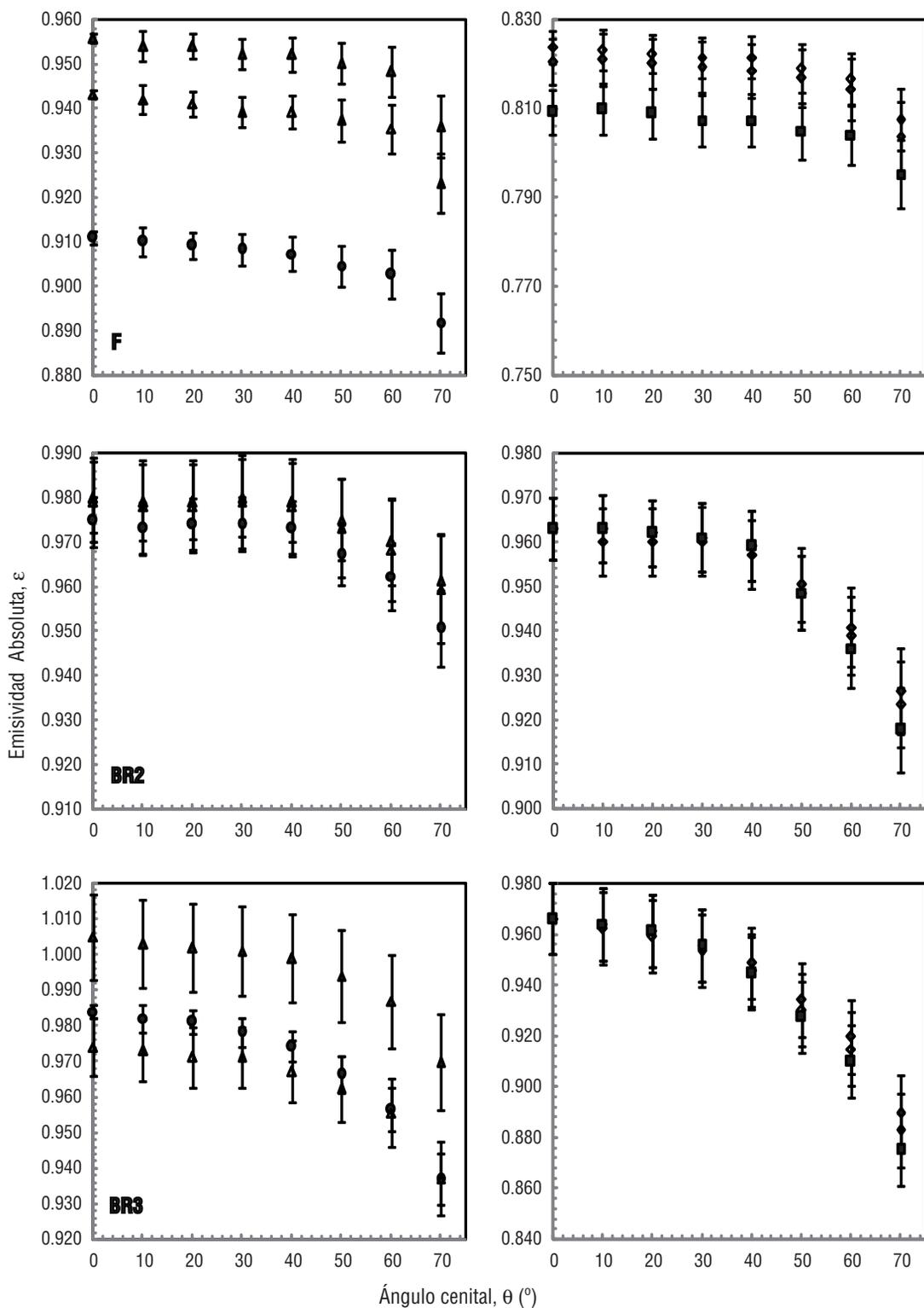


Figura 2 (cont.). Valores absolutos de emisividad angular en función del ángulo cenital, obtenidos para los 12 SI seleccionados. Se presentan los resultados en los 6 canales espectrales del radiómetro CE 312-2. Partiendo de izquierda en dirección horizontal, el primer gráfico corresponde a los canales 1 (8-14 μm) 2 y 3 (asignados en 10-12 μm) y el segundo gráfico corresponde a los canales 4, 5 y 6 (8-9,5 μm). Se incluye el error de emisividad absoluta, calculado según Ec. [7].

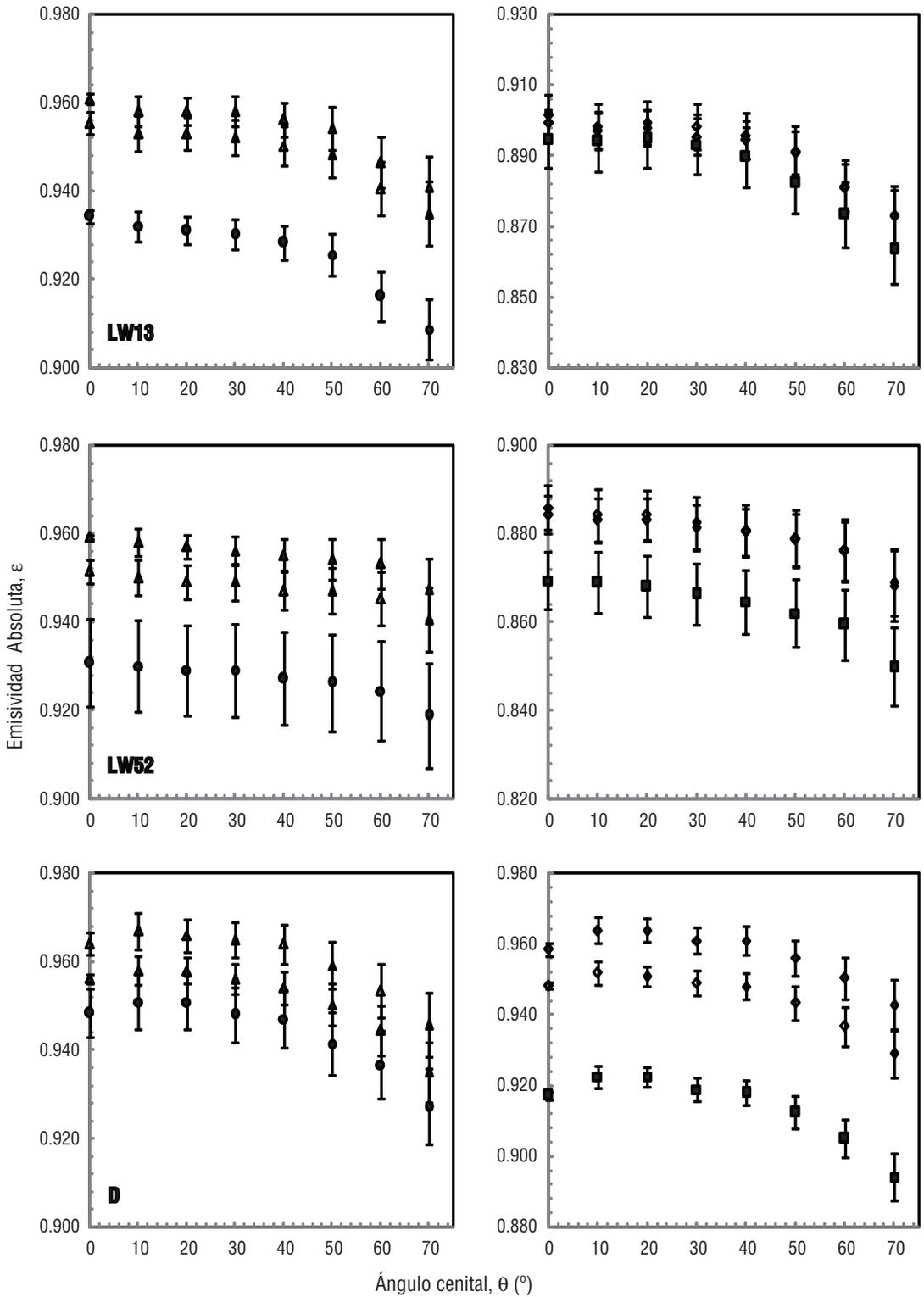


Figura 2 (cont.). Valores absolutos de emisividad angular en función del ángulo cenital, obtenidos para los 12 SI seleccionados. Se presentan los resultados en los 6 canales espectrales del radiómetro CE 312-2. Partiendo de izquierda en dirección horizontal, el primer gráfico corresponde a los canales 1 (8-14 μm) 2 y 3 (asignados en 10-12 μm) y el segundo gráfico corresponde a los canales 4, 5 y 6 (8-9,5 μm). Se incluye el error de emisividad absoluta, calculado según Ec. [7].

establecido como cambio significativo (error máximo obtenido según el criterio estipulado en el párrafo anterior). Al evaluar la variación angular de la $\epsilon_s(\theta)$ respecto a estos dos parámetros (arenas con alto contenido en cuarzo), se llega a conclusiones interesantes que a continuación pasan a ser explicadas desde un punto de vista espectral.

Intervalo 8-14 μm

La variación angular en la ventana atmosférica (canal 1), llega a ser significativa para el SI con un contenido de arena superior al 80% y de cuarzo superior a 90%, para ángulos cenitales superiores a 50°. El efecto angular debe ser tenido en cuenta, inevitablemente, para ángulos cenitales superiores a 60° para cualquier SI, independientemente de su composición mineral o textural. En este amplio intervalo espectral, la variación angular máxima de la emisividad absoluta se produce entre el valor a nadir y a $\theta = 70^\circ$, para el caso de un suelo arenoso con alto contenido en cuarzo. La diferencia entre ambos es de +0,047, lo que significa cometer una sobreestimación de la T_b de +2,6 °C si no se tiene en cuenta dicha variación angular de la emisividad, para un suelo cuyo valor a nadir de la emisividad es de 0,93 y para una TST de 40 °C, siendo la temperatura atmosférica de -50 °C. Esta sobreestimación de la temperatura se reduce para $\theta = 70^\circ$ a medida que disminuye, a su vez, el porcentaje de arena y cuarzo en el SI. No obstante la variación mínima de la emisividad obtenida a dicho ángulo cenital es de +0,012, lo que equivale a una sobreestimación de T_b de 0,7 °C. A $\theta = 60^\circ$, solo los SI con un porcentaje de arena y cuarzo alto deben tener en cuenta efectos angulares en su emisividad, situándose las diferencias, respecto el valor a nadir, entre +0,014 y +0,028, lo que significa sobreestimar la T_b entre +0,8 y +1,7 °C.

Intervalo 11-12 μm

Los efectos angulares en este intervalo espectral, representado por los canales 2 y 3 del radiómetro, son muy pequeños hasta ángulos

cenitales de 60°; a partir de este punto las medidas de la TST sobre SI con un contenido de arena superior al 80% y con un alto contenido de cuarzo, deben ser corregidas debido a un significativo efecto angular de la emisividad, situándose las diferencias entre su valor a nadir y a 60° entre +0,013 y +0,018, lo que equivale a sobreestimar T_b entre +0,8 y +1,1 °C, para una emisividad del SI de 0,96, en dicho intervalo espectral, y para las mismas condiciones de temperatura en superficie y atmósfera del apartado anterior. Nuevamente a $\theta = 70^\circ$, el efecto angular de la emisividad es significativo para todos los SI aunque afecta en mayor medida a superficies con alto contenido de arena y cuarzo, disminuyendo la diferencia entre la emisividad a nadir y a dicho ángulo, a medida que se reduce el contenido de arena y cuarzo. Dicha diferencia se sitúa entre +0,011 y +0,036, equivalente a sobreestimar el T_b entre +0,7 y +2,1 °C.

En este intervalo espectral se sitúan las bandas 31 y 32 de MODIS y las dos bandas térmicas del AATSR, ambos sensores midiendo la superficie con ángulos de visión de hasta $\pm 55^\circ$. Las medidas realizadas sobre SI por estos sensores se verán afectadas, entre otros factores como pueden ser la humedad del suelo, por el efecto angular de su emisividad en suelos arenosos con un alto contenido en cuarzo. Las diferencias entre emisividad a nadir y a 55° se sitúan entre +0,011 y +0,015, estimadas para los SI en el presente estudio que cumplan la condición anterior. Dichas diferencias supondrían sobreestimar la T_b entre +0,7 y +0,9 °C, aunque la diferencia podría ser inferior dada la transmisividad de la atmósfera existente entre sensor y superficie.

Intervalo 8-9,5 μm

Según los resultados de la figura 2, en el canal 4, 5 y 6, el efecto angular se ve fuertemente afectado por la textura y composición de cuarzo, siendo muy significativo nuevamente para SI con contenidos de arena y de cuarzo superiores al 90%, a partir de ángulos cenitales iguales o superiores a 30°. Si dichos contenidos son superiores al 50%, el efecto angular es importante a partir de 50°, donde se obtuvie-

ron diferencias entre la emisividad a nadir y a dicho ángulo entre $+0,01$ y $+0,035$, a $\theta = 60^\circ$ dichas diferencias aumentaron, situándose entre $+0,014$ y $+0,051$, lo que equivale a una sobreestimación de T_b entre $+0,8$ y $+3,0$ °C para un SI con un valor de emisividad a nadir de $0,87$ en este intervalo espectral. La máxima variación angular de la emisividad se registra a $\theta = 70^\circ$ para un suelo arenoso con alto contenido cuarzo, cuyo valor respecto al nadir es de $-0,083$, lo que equivale a una sobreestimación de T_b de $+4,8$ °C, siendo el mínimo en torno a $-0,016$, para un suelo limo-arcilloso.

Conclusiones

Los efectos angulares implícitos en las medidas de radiación por parte de sensores a bordo de satélites pueden tener consecuencias importantes en parámetros como la TST. En el caso particular del SI, con un contenido de materia orgánica inferior al 8% y una baja rugosidad (diámetro del grano menor de 4-5 cm y superior a 200 μm), los efectos angulares son debidos fundamentalmente a la emisividad del SI según Lagouarde *et al.* (1995). En el presente estudio se estudió la dependencia angular de la emisividad térmica espectral de doce suelos diferentes que representan, desde un punto de vista textural, una parte apreciable de los SI existentes en la superficie terrestre. Se han obtenido las siguientes conclusiones:

La emisividad de un SI es casi independiente de la orientación acimutal, y también de la cenital para valores cercanos al nadir (0°) y hasta 30° , con diferencias observadas siempre inferiores a $0,01$ lo que implica cometer un error en TST en torno a $0,5$ °C. Para ángulos de visión mayores, la emisividad comienza a decrecer con el aumento del ángulo cenital y dicha disminución es observada en todos los SI estudiados aquí. La variación angular de la emisividad es muy significativa a ángulos cenitales superiores a 60° . La diferencia entre los valores de emisividad a ángulos cenitales superiores a 30° y los valores a nadir, varían en función del tipo de composición de la muestra y del intervalo espectral en que se realicen las medidas.

En el intervalo 8-9,5 μm la variación angular de la emisividad sufre los descensos más

pronunciados, especialmente para muestras arenosas (contenido de arena superior al 80%), y con un alto contenido en cuarzo (superior al 90%). Para dicho intervalo espectral y en dichos suelos, la variación angular de la emisividad empieza a ser notable a partir de los 30° (diferencia respecto a nadir de $-0,013$) llegando a alcanzar las mayores diferencias registradas, en torno a $-0,083$ (a $\theta = 70^\circ$), lo que equivale a cometer una sobreestimación de la temperatura medida de $+4,8$ °C, en caso de ignorar dicho efecto. Para el resto de SI, el efecto angular empieza a ser importante a partir de 60° , independientemente del contenido textural y de cuarzo del SI.

Los efectos sobre la TST debidos a la variación angular de la emisividad en el intervalo 10-12 μm son despreciables hasta un ángulo cenital de 60° . A partir de este ángulo, la medidas de la TST sobre SI con un contenido de arena superior al 80% y con un alto contenido de cuarzo ($> 90\%$), debe ser corregida a causa de un significativo efecto angular en la emisividad, situándose las diferencias entre su valor a dicho ángulo y a nadir entre $-0,013$ y $-0,018$, lo que equivale a sobreestimar T_b en la Ec. [1] entre $+0,8$ y $+1,1$ °C, para una emisividad en nadir del SI de $0,96$. A $\theta = 70^\circ$, el efecto angular es significativo para todos los SI aunque afectando en mayor o menor medida a las superficies con mayor o menor contenido de arena y cuarzo, respectivamente, apreciándose diferencias entre la emisividad a nadir y a 70° entre $+0,011$ y $+0,036$, equivalente a sobreestimar la T_b entre $+0,7$ y $+2,1$ °C.

Los resultados ofrecidos en el presente estudio muestran la necesidad de atender aspectos angulares en la medida de la temperatura. En caso contrario se pueden producir sobreestimaciones en su medida desde $+1$ °C hasta $+5$ °C.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el MICINN (beca FPI de V. García, y Proyectos CGL2007-64666/CLI, CGL2007-29819-E/CLI y CGL2010-17577/CLI, cofinanciados con fondos FEDER), y por la Conselleria d'Educació de la Generalitat Valenciana (PROMETEO/2009/086).

Referencias

- BALL, M., & H. PINKERTON. 2006. Factors affecting the accuracy of thermal imaging cameras in volcanology, *Journal of Geophysical Research*, 111, B11203, DOI:10.1029/2005JB003829.
- BARNES, W. L., PAGANO, T. S., & SALOMONSON, V. V. 1998. Prelaunch characteristics of the moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) on EOS-AM1. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(4), 1088-1100.
- BARTON, I. J., & TAKASHIMA, T. 1986. An AVHRR investigation of surface emissivity near Lake Eyre, Australia, *Remote Sensing of Environment*, 20(2), 153-163, ISSN 0034-4257, DOI: 10.1016/0034-4257(86)90020-9.
- BECKER, F., RAMANANTSIZEHENA, P., & STOLL, M. P. 1985. Angular variation of the bidirectional reflectance of bare soils in the thermal infrared band, *Applied Optics*, 24(3), 365-375, DOI:10.1364/AO.24.000365.
- CHEHBOUNI, A., NOUVELLON, Y., KERR, Y. H., MORAN, M. S., WATTS, C., PREVOT, L., GOODRICH, D. C., & RAMBAL, S. 2001. Directional effect on radiative surface temperature measurements over a semiarid grassland site, *Remote Sensing of Environment*, 76(3), 360-372, DOI: 10.1016/S0034-4257(01)00183-3.
- CUENCA, J., & SOBRINO, J. A. 2004. Experimental Measurements for Studying Angular and Spectral Variation of Thermal Infrared Emissivity, *Applied Optics*, 43, 4598-460, DOI:10.1364/AO.43.004598.
- DOZIER, J., & WARREN, S. 1982. Effect of Viewing Angle on the Infrared Brightness Temperature of Snow, *Water Resources Research*, 18(5), 1424-1434.
- GARCÍA-SANTOS, V., VALOR, E., MIRA, M., COLL, C., GALVE, J. M., & CASELLES, V. 2011. Evaluación de distintos métodos de medida de la irradiancia atmosférica descendente en el infrarrojo térmico, *Revista de Teledetección*, 35, 23-31.
- GILLESPIE, A., ROKUGAWA, S., MATSUNAGA, T., COTHERN, J. S., HOOK, S., & KAHLE, A. B. 1998. A temperature and emissivity separation algorithm for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) images, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(4), 1113-1126, DOI: 10.1109/36.700995.
- HORI, M., AOKI, T., TANIKAWA, T., MOTOYOSHI, H., HACHIKUBO, A., SUGIURA, K., YASUNARI, T. J., EIDE, H., STORVOLD, R., NAKAJIMA, Y., & TAKAHASHI, F. 2006. In-situ measured spectral directional emissivity of snow and ice in the 8-14 μm atmospheric window, *Remote Sensing of Environment*, 100(4), 486-502, DOI: 10.1016/j.rse.2005.11.001.
- LABED, J., & STOLL, M. P. 1991. Angular variation of land surface spectral emissivity in the thermal infrared: laboratory investigations on bare soils. *International Journal of Remote Sensing*, 12, 2299-2310.
- LAGOUARDE, J. P., KERR, Y. H., & BRUNET, Y. 1995. An experimental study of angular effects on surface temperature for various plant canopies and bare soils, *Agricultural and Forest Meteorology*, 77(3-4), Thermal Remote Sensing of the Energy and Water Balance over Vegetation, 167-190, DOI: 10.1016/0168-1923(95)02260-5.
- LAGOUARDE, J. P., BALLANS, H., MOREAU, P., GUYON, D., & CORABOEUF, D. 2000. Experimental Study of Brightness Surface Temperature Angular Variations of Maritime Pine (*Pinus pinaster*) Stands, *Remote Sensing of Environment*, 72(1), 17-34, DOI: 10.1016/S0034-4257(99)00085-1.
- LAGOUARDE, J. P., MOREAU, P., IRVINE, M., BONNEFOND, J. M., VOOGT, J. A., & SOLLIEC, F. 2004. Airborne experimental measurements of the angular variations in surface temperature over urban areas: case study of Marseille (France), *Remote Sensing of Environment*, 93(4), 443-462, DOI: 10.1016/j.rse.2003.12.011.
- LLEWELLYN-JONES, D., EDWARDS, M. C., MUTLOW, C. T., BIRKS, A. R., BARTON, I. J., & TAIT, H. 2001. AATSR: Global-change and surface temperature measurements from ENVISAT. *ESA Bulletin*, 11-21.
- McATEE, B. K., PRATA, A. J., & LYNCH, M. J. 2003. The Angular Behavior of Emitted Thermal Infrared Radiation (8-12 μm) at a Semiarid Site. *Journal of Applied Meteorology*, 42, 1060-1071, DOI: 10.1175/1520-0450(2003)042<1060:TABOET>2.0.CO;2.
- MERCHANT C. J., EMBURY O., LE BORGNE P., & BELLEC B. 2006. Saharan dust in nighttime thermal imagery: Detection and reduction of related biases in retrieved sea surface temperature, *Remote Sensing of Environment*, 104, 15-30.
- MIRA, M., VALOR, E., BOLUDA, R., CASELLES, V., & COLL, C. 2007. Influence of soil water content on the thermal infrared emissivity of bare soils: Implication for land surface temperature determination, *Journal of Geophysical Research*, 112, F04003, DOI:10.1029/2007JF000749.
- MIRA, M., VALOR, E., CASELLES, V., RUBIO, E., COLL, C., GALVE, J. M., NICLOS, R., SANCHEZ, J. M., & BOLUDA, R. 2010. Soil Moisture Effect on Thermal Infrared (8-13 μm) Emissivity, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48(5), 2251-2260, DOI: 10.1109/TGRS.2009.2039143.
- NICODEMUS, F. E. 1965. Directional Reflectance and Emissivity of an Opaque Surface, *Applied Optics*, 4, 767-773, DOI:10.1364/AO.4.000767.
- NICODEMUS, F. E., RICHMOND, J. C., HSIA, J. J., GINSBERG, I. W., & LIMPERIS, T. 1977.

- Geometrical considerations of nomenclature for reflectance, National Bureau Standards Monograph 160. *US Department of Commerce*, Washington DC, 52.
- NICLOS, R., VALOR, E., CASELLES, V., COLL, C., & SANCHEZ, J. M. 2005. In situ angular measurements of thermal infrared sea surface emissivity-Validation of models, *Remote Sensing of Environment*, 94(1), 83-93, DOI: 10.1016/j.rse.2004.09.002.
- NICLOS, R., CASELLES, V., COLL, C., & VALOR, E. 2007. Determination of sea surface temperature at large observation angles using an angular and emissivity-dependent split-window equation, *Remote Sensing of Environment*, 111(1), 107-121, DOI: 10.1016/j.rse.2007.03.014.
- National Oceanic Atmospheric Administration. 2001. NOAA KLM User's Guide. G. Goodrum, K. B. Kidwell, and W. Winston.
- NORMAN, J. M., & BECKER, F. 1995. Terminology in thermal infrared remote sensing of natural surfaces, *Agricultural and Forest Meteorology*, 77(3-4), Thermal Remote Sensing of the Energy and Water Balance over Vegetation, 153-166, DOI: 10.1016/0168-1923(95)02259-Z.
- PAYAN, V., & ROYER, A. 2004, Analysis of Temperature Emissivity Separation (TES) algorithm applicability and sensitivity, *Int. J. Remote Sensing*, 25(1), 15-37, DOI: 10.1080/0143116031000115274.
- REES, W. G., & JAMES, S. P. 1992. Angular variation of the infrared emissivity of ice and water sea surfaces. *International Journal of Remote Sensing*, 13, 2873-2886.
- SNYDER, W. C., WAN, Z., ZHANG, Y., & FENG, Y. Z. 1997. Thermal Infrared (3-14 μm) bidirectional reflectance measurements of sands and soils, *Remote Sensing of Environment*, 60(1), 101-109, DOI: 10.1016/S0034-4257(96)00166-6.
- SOBRINO, J. A., & CUENCA, J. 1999. Angular Variation of Thermal Infrared Emissivity for Some Natural Surfaces from Experimental Measurements, *Applied Optics*, 38, 3931-3936.
- TAKASHIMA, T., & MASUDA, K. 1987. Emissivities of quartz and Sahara dust powders in the infrared region (7-17 μm), *Remote Sensing of Environment*, 23(1), 51-63, DOI: 10.1016/0034-4257(87)90070-8.
- THEOCHAROUS, E., & FOX, N. P. 2010, CEOS comparison of IR brightness temperature measurements in support of satellite validation. Part II: Laboratory comparison of the brightness temperature of blackbodies, *NPL Report*, ISSN: 1754-2944.