



# Influencia del efecto de la humedad del suelo en la emisividad del infrarrojo térmico

M. Mira<sup>1</sup>, E. Valor<sup>1</sup>, R. Boluda<sup>2</sup>, V. Caselles<sup>1</sup> y C. Coll<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departament de Ciències de la Terra i Termodinàmica, Facultat de Física, Universitat de València, 50 Dr. Moliner, 46100 Burjassot, València

<sup>2</sup>Departament de Biologia Vegetal, Facultat de Farmàcia, Universitat de València, Av. Vicent Andrés Estellés, 46100 Burjassot, València

Recibido: 3-XI-2006 – Aceptado: 29-V-2007 – **Versión Traducida**

Correspondencia a: Maria.Mira@uv.es

## Resumen

*La influencia del efecto de la humedad del suelo en la emisividad del infrarrojo térmico es un hecho conocido pero poco estudiado en el pasado. Se ha diseñado un experimento para calcular la dependencia de la emisividad respecto a la humedad del suelo. Han sido seleccionadas seis muestras de horizontes superficiales de diferentes tipos de suelos mediterráneos. Su emisividad se ha medido con diferentes contenidos de agua de suelo, utilizando la variante de dos tapas del método de caja, mientras que el método gravimétrico ha sido seleccionado para obtener la humedad del suelo. Como resultado de esto, el estudio muestra que la emisividad aumenta significativamente cuando el contenido de agua se vuelve más alto, especialmente en suelos arenosos en el rango 8.2-9.2  $\mu\text{m}$ . Se han deducido una serie de ecuaciones para obtener la emisividad de la humedad del suelo a distintas bandas espectrales para los tipos de suelo analizados.*

## 1 Introducción

La temperatura del suelo es un parámetro de entrada en los estudios meteorológicos y climatológicos así como en los análisis hidrológicos y agrícolas. Sin embargo, la emisividad de superficies naturales es una magnitud necesaria para determinar la temperatura desde las medidas de la radiancia del infrarrojo térmico (TIR). Si la primera no está bien determinada, puede implicar un error importante a la hora de conseguir la segunda. Un 1% de incertidumbre en la emisividad puede provocar un error en la temperatura de 0.5 K aproximadamente cuando la temperatura superficial es de alrededor de 300 K y cuando el efecto atmosférico no se tiene en consideración (Sobrino y Caselles, 1989). Por esta razón, hay que estudiar los factores que influyen en la emisividad, ya que hay que calcularla con la mayor precisión posible.

La influencia del tipo de suelo en la emisividad es bien conocida gracias a estudios experimentales (Salisbury y D'Aria, 1992). Sin embargo, el análisis de la variación de la emisividad de la TIR con la humedad del suelo (HS) es uno de los temas pendientes en la percepción remota térmica. Hay pocos estudios sobre este tema, principalmente en el terreno experimental (Van Bavel y Hillel, 1976; Chen et al., 1989; Urai et al., 1997; Xiao et al., 2003; Ogawa et al., 2006). Debe tenerse en cuenta la dependencia de la HS en la ob-

tención de emisividad a partir de los datos de las observaciones de satélite, ya que el aumento de HS provoca un elevado error sistemático en este parámetro, p.ej., alrededor de +0.1 por un aumento de 0.04 a 0.10  $\text{g cm}^{-3}$  en la HS (Ogawa et al., 2006) para suelos arenosos.

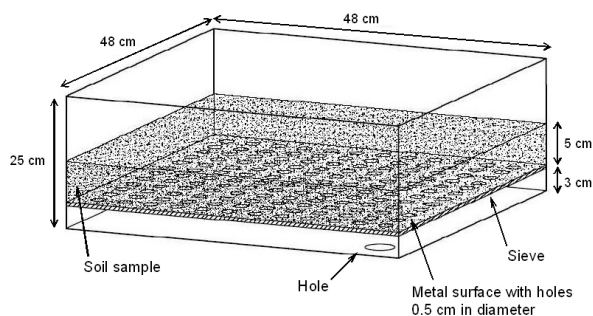
Sin embargo, en la zona de microondas hay diversos estudios teóricos (Galantowicz et al., 2000) y también experimentales (Alex y Behari, 1998; Jackson et al., 1999; Burke y Simmonds, 2003) sobre la variación en la emisividad con la HS. En esta zona, la variación es mucho más importante que el infrarrojo térmico. Las medidas de emisividad de microondas por radiometría pasiva son, de hecho, la base de uno de los métodos de medida sinópticos de la humedad del suelo por teledetección (Martín-Neira y Goutoule, 1997).

El principal objetivo de nuestra investigación es el de mejorar la descripción de la variación de la emisividad de la TIR del suelo con HS. Esto nos permitirá hacer una estimación más precisa de los valores de emisividad desde el espacio utilizando las estimaciones de la HS proporcionadas por sensores futuros como el instrumento MIRAS de la misión de la ESA sobre la humedad del suelo y la salinidad del mar (SMOS). En este estudio, se proponen una serie de ecuaciones para extraer la emisividad como una función de la HS a distintas bandas espectrales para los tipos de suelo analizados.



**Tabla 1.** Propiedades físicas i químicas del suelo. CE: conductividad eléctrica; MO: materia orgánica; CIC: capacidad de intercambio catiónico; V: saturación de bases.

Nombre de la muestra	A	B	C	D	E	F
Color seco	5YR4/6	10YR8/1	10YR4/2	10YR6/2	10YR5/6	10YR5/4
Color húmedo	7.5YR3/4	10YR7/2	10YR2/2	2.5Y4/2	10YR3/3	10YR5/3
pH (H <sub>2</sub> O) 1:2.5	7.50 ± 0.04	9.28 ± 0.06	7.50 ± 0.10	7.7 ± 0.4	5.180 ± 0.010	8.2 ± 0.2
pH (KCl) 1:2.5	6.9 ± 0.3	8.79 ± 0.04	6.70 ± 0.07	7.1 ± 0.4	4.460 ± 0.010	7.70 ± 0.10
EC 1:5 (dS/m)	0.40 ± 0.12	0.040 ± 0.009	0.48 ± 0.10	0.58 ± 0.09	0.150 ± 0.010	0.20 ± 0.03
MO (%)	2.1 ± 0.3	< 0.1	8.9 ± 0.5	4.5 ± 0.4	1.50 ± 0.10	3.5 ± 0.4
CaCO <sub>3</sub> (%)	1.70 ± 0.10	< 0.1	24 ± 3	44 ± 6	0	46 ± 8
CEC (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	21.3 ± 1.7	0	35 ± 4	24 ± 3	9.8 ± 1.9	14.7 ± 1.4
V (%)	100	0	100	100	59 ± 6	100
Arena (%)	41 ± 3	99 ± 6	20.0 ± 1.0	14 ± 6	67 ± 4	50 ± 3
Limo (%)	28.0 ± 1.0	1.0 ± 1.0	43 ± 2	50 ± 8	20.0 ± 1.0	30 ± 2
Arcilla (%)	31 ± 2	0 ± 0	37 ± 3	35 ± 4	13.0 ± 1.0	20.0 ± 1.0
Textura (USDA)	Franco-arcillosa	Arena	Franco-arcillo-limosa	Franco-arcillo-limosa	Franco-arenosa	Franca

**Figura 1.** Contenedor de vidrio para guardar las muestras y permitir una medida fácil de las emisividades, así como el drenaje del agua.

En la sección 2 mostramos algunos detalles de la puesta en marcha del experimento tanto para la medida de la emisividad como para la medida de la HS, y la descripción del suelo. En la sección 3, analizamos los resultados y la discusión de este experimento. Finalmente, en la sección 4 se dan las conclusiones.

## 2 Puesta en marcha del experimento

### 2.1 Descripción de los suelos

Para este experimento hemos seleccionado una serie de muestras de horizontes superficiales (0-15 cm) de diferentes tipos de suelos mediterráneos. La variación de la emisividad de la TIR con la HS ha sido estudiada según las distintas texturas del suelo (p. ej., medida de partícula). Parámetros como la textura, la porosidad o la estructura, entre otros, son responsables de esta variación.

En primer lugar, cada muestra ha sido caracterizada por

sus propiedades físicas y químicas del suelo (Tabla 1) relacionadas con la textura del suelo, el color, el contenido de materia orgánica (MO), los carbonatos totales, el pH del suelo, la conductividad eléctrica (CE), la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y la saturación de base (V). La textura del suelo se fijó según el estándar ISO 11277:1998 (ISO, 2002), basado en técnicas mecánicas de ruptura y sedimentación.

En segundo lugar, el tipo taxonómico de los suelos y sus horizontes diagnósticos han sido identificados según las clasificaciones de la FAO-ISRIC-SICS (1999) y de la USDA (1999) (Tabla 2) de la taxonomía del suelo. Todas las muestras pertenecen a un clima mediterráneo, salvo la muestra E que pertenece a un clima atlántico.

En tercer lugar, la identificación de los minerales arcillosos de todas las muestras fue determinada por medio de la técnica de difracción de rayos X (XRD) ya que siempre es considerada como uno de los procedimientos más rápidos. Según este análisis semi-cuantitativo mostrado en la Tabla 3, el cuarzo es el mineral predominante en las muestras A, B y E mientras que la calcita es el mineral principal en las muestras C, D y F. El resultado es importante ya que el cuarzo contribuye a aumentar la reflectancia del material entre 7.7 y 9.7  $\mu\text{m}$  así como cerca de 12.6  $\mu\text{m}$ . Esto significa un descenso de la emisividad en esas regiones espectrales.

### 2.2 Medida de la humedad del suelo

El primer paso en la estrategia de la medida fue la de moler y mezclar cada muestra antes de permitir que se secase por el aire, y tamizarla en 2 mm. Después, se inundó permitiendo la filtración del agua a través del recipiente que contiene el suelo. A partir de ese momento, se dejó secar libremente.

Con tal fin, se diseñó un contenedor de vidrio (Figura 1) de dimensiones 48 x 48 x 25 cm<sup>3</sup> para permitir el drenaje del

**Tabla 2.** Tipos taxonómicos de los suelos y sus horizontes diagnósticos.

Nombre de la muestra	FAO-ISRIC-SICS (1999)	Taxonomía del suelo (USDA, 1999)	Horizontes diagnósticos
A	lúvico Calcisol	Rhodoxeralf	Irragric
B	álbico Arenosol	Xeropsamment	Antropic
C	cálcico Kastanozem	Calcixeroll	Mollic
D	gleico-calcáreo Fluvisol	Fluvaquent	Antraquic
E	dístrico Cambisol	Dystrudept	Cambic
F	petric Calcisol	Petrocalcid	Ocric

**Tabla 3.** Análisis semi-cuantitativo de la identificación de los minerales usando la técnica XRD.

Mineral	Cantidad (%)					
	A	B	C	D	E	F
Quarzo	82	96	29	19	74	20
Feldspato	5	4	6	4	22	4
Filosilicato	5	-	9	6	4	4
Calcita	3	-	56	62	-	63
Hematites	5	-	-	9	-	9
Nombre de la muestra	A	B	C	D	E	F

agua y su último vaciado. La muestra se conservó sobre una superficie perforada de metal unos centímetros por encima de la base del recipiente. Además, se colocó un tamiz de hoja en la superficie metálica para impedir la pérdida de las partículas más finas.

Se escogió el método gravimétrico para medir la HS ya que es la técnica más precisa. Se basa en la determinación directa del contenido del agua del suelo (Day, 1965). La limitación principal es que es un método laborioso y destructivo ya que se sacan pequeñas cantidades de suelo de la muestra total cuando las medidas de HS ya han sido realizadas. Este hecho ha impedido tomar medidas con mucha frecuencia. Además, la factibilidad de las medidas depende de la variabilidad espacial de la humedad del suelo ya que no toda la muestra se seca al mismo tiempo. Por dicho motivo, se ha realizado un muestreo adecuado para cada medida de contenido de agua. Se cogieron tres muestras de suelo para el análisis del contenido del agua durante cada serie de medidas de emisividad para minimizar el error del valor de HS.

El contenido de HS se expresa por peso (wt) en la proporción entre masa de agua presente y peso en seco de la muestra o por volumen como proporción entre volumen de agua y volumen total de la muestra de suelo. Siguiendo el método gravimétrico, para determinar cualquiera de estas proporciones para una muestra concreta del suelo, la masa del agua tiene que determinarse drenando el suelo hasta obtener un peso constante y midiendo la muestra de suelo después y antes de secarse. La masa de agua (o peso) es la diferencia entre los pesos de las muestras húmedas y secas. El criterio para una muestra de suelo seco es la muestra de suelo que ha sido secada hasta obtener un peso constante en el horno a una temperatura de entre 100-110°C (105° C es

la típica). Finalmente, el contenido de humedad se calcula utilizando la ecuación:

$$\Theta_d = \frac{wt_w - wt_d}{wt_d} \quad (1)$$

donde:

- $wt_w$ : peso del suelo húmedo.
- $wt_d$ : peso del suelo seco.

Se han utilizado distintas técnicas para asegurar la homogeneidad de las muestras en términos de composición, textura y humedad, tales como mezclar el contenido de la muestra o moliendo el suelo. Además, las grietas del suelo que aparecieron en el proceso de secado fueron eliminadas cuando fue necesario. Además también, la secuencia de la saturación del suelo y el secado se repitió al menos dos veces para asegurar la validez y reproducibilidad de las medidas de la emisividad.

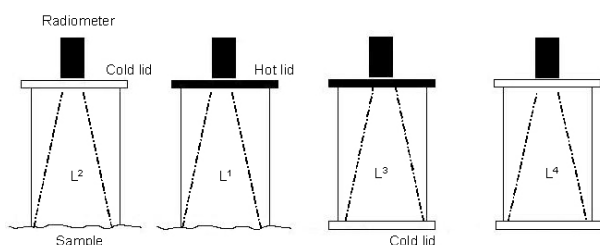
### 2.3 Medidas de la emisividad

Las emisividades se determinaron a través de la variante de dos tapas del método de caja (Rubio et al., 1997) y utilizando el radiómetro de infrarrojo térmico CIMEL CE 312 (Legrand et al., 2000). Tiene cuatro canales espectrales: uno ancho, 8-14  $\mu\text{m}$  (canal 1), y tres canales estrechos, 8.2 - 9.2, 10.5 - 11.5, 11.5 - 12.5  $\mu\text{m}$  (canales 4, 3, y 2 respectivamente). El radiómetro tiene un campo de visión de 10°, un tiempo de respuesta de 1 s, y precisiones de  $\pm 0.10$  K para cada canal.

La caja utilizada es una caja sin fondo, con una base de 30 x 30  $\text{cm}^2$  y una altura de 80 cm. Las paredes laterales son superficies reflectantes especulares de aluminio pulido con una emisividad de  $\varepsilon_c \sim 0.03$ . Dos tapas intercambiables con distintas respuestas espectrales, cada una con un pequeño agujero central a través del cual se toman las medidas radiométricas se utilizan como tapas superior. La *tapa caliente* es una tapa de aluminio áspero anodizado pintado con negro Parson con un valor de emisividad de  $\varepsilon_h \sim 0.98$  mantenido a una temperatura de 15-20°C por encima de la temperatura de las muestras por medio de un sistema de calentamiento eléctrico. La *tapa fría* es una tapa reflectante especular de aluminio pulido, con un valor de emisividad de  $\varepsilon_c \sim 0.03$ .

**Tabla 4.** Variación máxima de la emisividad dentro de todo el rango de la humedad del suelo ( $\Delta\varepsilon_i \pm \delta(\Delta\varepsilon_i)$ ), y los errores de medición de la emisividad media ( $\overline{\delta\varepsilon_i}$ ), para cada muestra a los diferentes canales CE312.

Muestra	$\Delta\varepsilon_1 \pm \delta(\Delta\varepsilon_1)$	$\Delta\varepsilon_2 \pm \delta(\Delta\varepsilon_2)$	$\Delta\varepsilon_3 \pm \delta(\Delta\varepsilon_3)$	$\Delta\varepsilon_4 \pm \delta(\Delta\varepsilon_4)$	$\overline{\delta\varepsilon_1}$	$\overline{\delta\varepsilon_2}$	$\overline{\delta\varepsilon_3}$	$\overline{\delta\varepsilon_4}$
A	0.029±0.008	0.024±0.007	0.017±0.009	0.036±0.009	0.003	0.005	0.004	0.004
B	0.074±0.018	0.046±0.007	0.036±0.007	0.16±0.02	0.006	0.004	0.004	0.009
C	0.060±0.007	0.050±0.009	0.058±0.006	0.055±0.010	0.004	0.005	0.006	0.006
D	0.031±0.006	0.031±0.009	0.029±0.010	0.041±0.011	0.004	0.004	0.004	0.005
E	0.034±0.004	0.027±0.006	0.032±0.006	0.046±0.010	0.003	0.004	0.004	0.005
F	0.023±0.005	0.030±0.008	0.028±0.008	0.037±0.007	0.003	0.005	0.004	0.005

**Figura 2.** Procedimiento seguido para la medida de emisividad con la variante de dos tapas de método de caja. L<sup>4</sup> pertenece a una medida adicional cuando la caja no se considera ideal. La secuencia de medidas de campo es de izquierda a derecha (p.ej., L<sup>2</sup>, L<sup>1</sup>, L<sup>3</sup> y L<sup>4</sup>).

En el método de dos tapas, se realizan tres medidas de radiancia con tres configuraciones distintas del sistema de muestra de caja, que mostramos en la Figura 2. Además, se ha realizado una cuarta medida (L<sup>4</sup>) para calcular el efecto de una caja no-ideal. De esta manera, el método da el valor de emisividad de una muestra del suelo a través de la fórmula (Rubio et al., 1997):

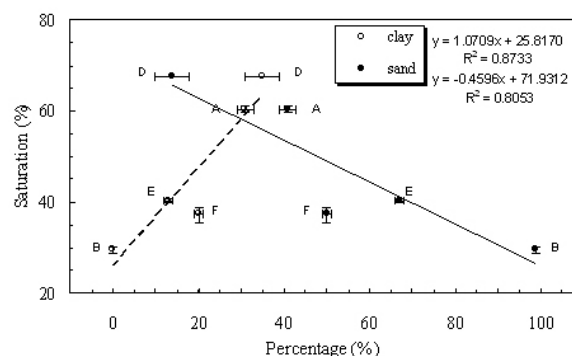
$$\varepsilon = 1 - \frac{(L^1 - L^2)(1 - \varepsilon_c)}{(L^3 - L^2) - (L^3 - L^1)P + (L^2 - L^4)Q} \quad (2)$$

donde:

- $\varepsilon_c = 0.03$
- $\varepsilon_h = 0.98$
- $P = F^2(1 - \varepsilon_c)(1 - \varepsilon_h)$
- $Q = 1 - F^2(1 - \varepsilon_c)^2$
- $F = 0.8674$

Siguiendo a Rubio et al. (1997),  $F$  es un factor de transferencia de energía que depende de la geometría de la caja y de  $\varepsilon_c$  y representa la proporción de energía de la base (tapa) que llega a la parte de la tapa (base).  $P$  y  $Q$  son valores constantes que dependen de  $F$ , y  $L^i$  (amb  $i = 1, 2, 3, 4$ ) son los valores de la radiancia efectiva ( $\text{mW cm}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{cm}$ ) medidos con el radiómetro a través del pequeño agujero.

Según este método antes mencionado, se realizó una serie de 30 medidas de emisividad por canal y muestra con

**Figura 3.** Relación entre el contenido de arena y el punto de saturación de cada suelo muestreado, salvo la muestra C teniendo en cuenta su comportamiento especial a su alto contenido de MO.

el objetivo de obtener una buena estadística y reducir el error. Hay que recalcar que si consideramos que cada medida de emisividad se obtiene de las cuatro medidas de radiancia (L<sup>i</sup>;  $i = 1, 2, 3, 4$ ), se necesita un total de 120 medidas individuales para inferir un único valor de emisividad para cada canal y muestra.

### 3 Resultados y discusión

En relación a la HS, se obtiene un valor excepcional del valor de la HS más alto para el castanozem cálcico (muestra C). Probablemente la causa principal de este alto valor sea la riqueza de contenido en materia orgánica (MO) de este suelo. La Tabla 1 muestra que el contenido de MO de la muestra C es cuatro veces superior a la media de contenido de MO de las otras muestras. Aunque la MO sea generalmente un componente menor de los suelos, es el principal almacenamiento de agua disponible para plantas debido al alto porcentaje de agregados estables en el agua. Por esta razón, los suelos con un alto contenido de MO tienen un comportamiento distinto que los otros por lo que respecta al agua retenida. El resto de muestras tienen una acusada tendencia a disminuir el valor de su punto de saturación con el aumento de su contenido en arena, tal como puede

**Tabla 5.** Regresión ajustada de la emisividad en función del contenido de agua del suelo para cada canal y muestra.  $\varepsilon$ : emisividad;  $\Theta_d$ : contenido de agua del suelo;  $R^2$ : coeficiente de determinación;  $\sigma_f$ : error estándar ajustado.

Nombre de la muestra	Canal	$\varepsilon_i = a \cdot \Theta_d^2 + b \cdot \Theta_d + c$			$R^2$	$\sigma_f$
		$a \times 10^{-3}$	$b \times 10^{-2}$	$c$		
A	1	-0.024	0.18	0.930	0.953	0.002
	2	-0.034	0.21	0.942	0.946	0.002
	3	-0.024	0.16	0.943	0.971	0.0013
	4	-0.029	0.24	0.914	0.978	0.002
B	1	-0.13	0.6	0.862	0.931	0.010
	2	-0.05	0.3	0.931	0.954	0.005
	3	-0.059	0.31	0.928	0.990	0.002
	4	-0.4	1.5	0.72	0.878	0.03
C	1	-0.0031	0.10	0.901	0.991	0.003
	2	-0.0025	0.08	0.910	0.986	0.003
	3	-0.004	0.11	0.897	0.988	0.003
	4	-0.004	0.11	0.895	0.985	0.004
D	1	-0.010	0.08	0.951	0.396	0.006
	2	-0.011	0.088	0.954	0.928	0.0016
	3	-0.003	0.03	0.957	0.586	0.003
	4	0.000	0.03	0.948	0.874	0.003
E	1	-0.05	0.291	0.9326	0.999	0.0003
	2	-0.038	0.23	0.943	0.989	0.002
	3	-0.034	0.23	0.938	0.995	0.0019
	4	-0.031	0.27	0.918	0.997	0.0019
F	1	-0.12	0.5	0.914	0.844	0.005
	2	-0.19	0.8	0.902	0.798	0.006
	3	-0.12	0.5	0.914	0.824	0.005
	4	-0.13	0.6	0.897	0.919	0.004

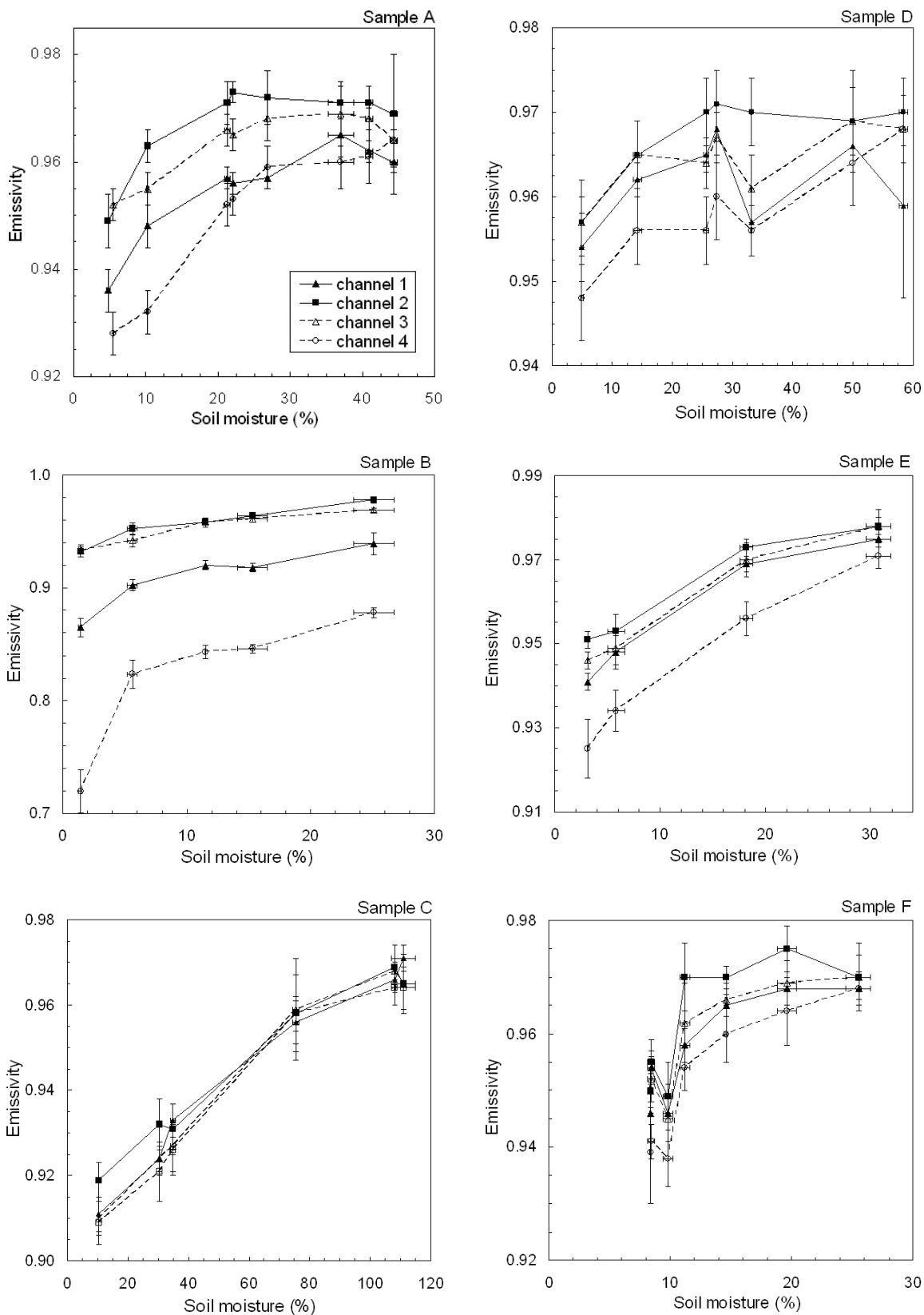
verse en la Figura 3. Los valores del punto de saturación se obtuvieron en el laboratorio (Porta, 1986) siguiendo el método gravimétrico, con el objetivo de comprobar esta relación. Se trata de un resultado consistente ya que la matriz del suelo retiene el agua a través de dos mecanismos: primero, el agua puede ser absorbida en las superficies de la partícula (especialmente las partículas arcillosas debido a su zona reactiva de ancha superficie); y en segundo lugar, el agua puede ser retenida en poros de suelo por capilaridad. El agua es retenida de un modo más estrecho en poros pequeños que en poros grandes. Por lo tanto, los suelos argilosos retienen más agua y durante más tiempo que los suelos arenosos.

Los resultados experimentales de la dependencia de la emisividad de la TIR en la HS para cada canal espectral de CE 312 se muestran en la Figura 4. En todos los casos se observa un aumento de la emisividad con la HS. La Tabla 4 compara el aumento de la emisividad con los errores de medida, con el resultado que el aumento es mucho mayor que la incertidumbre experimental. Según los valores de la Tabla 4, el error medio de emisividad es aproximadamente de  $\pm 0.5\%$ . Hay que recalcar que el error de emisividad procede de la desviación estándar de la serie de 30 medidas de emisividad realizadas cada vez.

La variación más grande de emisividad con la humedad

del suelo se observa en los 8.2-9.2  $\mu\text{m}$  en el canal 4, seguida de variaciones en el canal 1 (8-13  $\mu\text{m}$ ), en el canal 2 (11.5-12.5  $\mu\text{m}$ ) y finalmente en el canal 3 (10.5-11.5  $\mu\text{m}$ ). Esta variabilidad es más evidente en el arenosol albico, muestra B ( $\Delta\varepsilon_4 \sim 16\%$ ), y menos marcada en el calcisol lúvico, muestra A ( $\Delta\varepsilon_3 \sim 1.7\%$ ).

En la Figura 4 se observa generalmente un aumento marcado de la emisividad para poco contenido de agua, y casi no se observan cambios a partir de un cierto valor de HS. Según datos experimentales extraídos de Israelsen y Hansen (1962), este determinado valor de HS podría coincidir con el punto de capacidad del campo (CC), el valor del cual depende del tipo de suelo. Un suelo se encuentra en CC cuando, después de la saturación, se ha drenado todo el agua de los macroporos por la gravedad. Entonces, los microporos pueden retener el agua contra la fuerza de la gravedad gracias a las fuerzas capilares. Este argumento nos permite entender el comportamiento de la emisividad de la TIR en relación a la humedad del suelo ya que cuando el suelo está saturado, o incluso con una HS más alta que su punto CC, su valor de emisividad térmica no es sólo casi constante sino casi igual a uno que sea la emisividad del agua. Sin embargo, por debajo del punto CC, el agua es retenida en microporos, permitiendo valores de emisividad más bajos así como variación de emisividad con contenido



**Figura 4.** Emisividad medida de suelos muestreados en los canales espectrales de un radiómetro infrarrojo térmico CE 312 para varios contenidos de humedad.

de HS.

Se ha deducido una regresión de ajuste cuadrático de la emisividad con el contenido de agua del suelo para cada canal de CE 312 y para cada muestra para realizarlas en futuros algoritmos atmosféricos y de emisividad. En la Tabla 5, la serie de coeficientes así como el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y el error estándar ajustado ( $\sigma_f$ ) se muestran para cada caso. Estas curvas de ajuste son aceptables ya que su coeficiente de determinación media es de aproximadamente 0.90 y el error estándar ajustado alcanza un valor aproximado de  $\pm 0.5\%$ . Es importante destacar que la muestra D es la que presenta el peor ajuste, tal como muestran sus coeficientes de baja determinación. Creemos que esto es debido a la textura compacta que adquirió a lo largo del experimento y la consecuente rudeza conseguida. Mientras tanto, la muestra E muestra el mejor ajuste ya que su valor medio de  $R^2$  es el más alto y su valor  $\sigma_f$  es el más bajo.

#### 4 Conclusiones

Este documento pone el acento en la importancia de una determinación precisa de la variación de emisividad con el contenido de agua del suelo para permitir recuperaciones adecuadas de temperatura, sobre todo para suelos arenosos.

En primer lugar, se han utilizado seis minerales como base de estudio de la dependencia de la emisividad de la TIR en la HS, a partir de medidas de laboratorio. Cada suelo tiene una textura de suelo distinta y por lo tanto se han observado distintos comportamientos de emisividad. Sin embargo, se observa una tendencia general común a aumentar la emisividad con el contenido de agua del suelo para cada suelo estudiado. Los resultados muestran que la variación de emisividad es mayor sobre todo en el rango 8.2-9.2  $\mu\text{m}$  y más baja en el rango 10.3-11.3  $\mu\text{m}$ , siguiendo la secuencia  $\Delta\epsilon_4$  (8.2-9.2  $\mu\text{m}$ )  $>$   $\Delta\epsilon_1$  (8-13  $\mu\text{m}$ )  $>$   $\Delta\epsilon_2$  (11.5-12.5  $\mu\text{m}$ )  $\sim$   $\Delta\epsilon_3$  (10.5-11.5  $\mu\text{m}$ ). Además, el contraste espectral disminuye cuando la HS aumenta. Mientras tanto, en el caso de los clásicos canales de “split window”, este contraste es casi constante. La variación de emisividad es obvia para el arenosol albico (muestra B) con un aumento aproximado de 16% (que provoca un error sistemático de 8°C en la temperatura) porque es el suelo con un contenido de arena más alto. La variación antes mencionada es importante ya que es claramente mayor que la incertidumbre experimental ( $\delta_\epsilon \sim \pm 0.5\%$ ), hecho que puede implicar un importante impacto en los métodos actuales de estimación de la temperatura a partir de datos radiométricos.

En segundo lugar, se ha deducido una regresión de ajuste cuadrático de la emisividad en función del contenido de agua del suelo para cada canal y muestra para implementarlas en futuros algoritmos de corrección atmosféricos y de la emisividad. Para resumir, este estudio prueba que la variación de la emisividad con la HS se tendría que considerar en algoritmos de corrección atmosférica y de la emisividad para evitar importantes errores sistemáticos de la temperatura de la superficie del suelo.

**Agradecimientos.** Este trabajo ha recibido el apoyo del Ministerio de Educación y Ciencia (proyectos CGL2004-06099-C03C01/CLI y CGL2004-0166-E) y de la Generalitat Valenciana (proyecto GV2004-B-084). Los autores agradecen los útiles comentarios del Prof. C. Coll (Departamento de Ciencias de la Tierra y Termodinámica), de los Prof. J. Bastida y P. Pardo (Departamento de Geología) así como de los Drs. L. Roca y F. Perobelli (Departamento de Biología Vegetal), todos de la Universitat de València. Finalmente, querríamos expresar nuestra gratitud por la ayuda esencial de toda la gente implicada en las medidas de emisividad (Alberto Almendros, Joan Miquel Galve, Juan Manuel Sánchez, Dra. Raquel Niclòs, Anaís Barella, Jesús Muñoz, Maite Rodríguez, Mari Carmen Campo, África Barreto, Cecilia Narbón).

#### Referencias

- Alex, Z. C. y Behari, J., 1998: *Laboratory evaluation of emissivity of soils*, Int. J. Remote Sens., **19**, 1335–1340.
- Burke, E. J. y Simmonds, L. P., 2003: *Effects of sub-pixel heterogeneity on the retrieval of soil moisture from passive microwave radiometry*, Int. J. Remote Sens., **24**, 2085–2104.
- Chen, J. M., Yang, B. J., y Zhang, R. H., 1989: *Soil thermal emissivity as affected by its water content and surface treatment*, Soil Sci., **148**, 433.
- Day, P. R.: *Methods of soil analysis, part I. Physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling*, pp. 545–567, num. 9 en the Agronomy Series, American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, 1965.
- FAO-ISRIC-SICS, 1999: *World Reference Base for Soil Resources*, FAO, Rome, Italy, 99 pp.
- Galantowicz, J. F., Entekhabi, D., y Njoku, E. G., 2000: *Estimation of soil-type heterogeneity effects in the retrieval of soil moisture from radiobrightness*, IEEE T. Geosci. Remote, **38**, 312–316.
- ISO: *Soil quality. Determination of particle size distribution in mineral soil material. Method by sieving and sedimentation (ISO 11277:1998/TC190)*, International Organization for Standardization, 30 pp, 2002.
- Israelsen, O. W. y Hansen, E. V.: *Basic Soil Water Relations. Irrigation principles and practices*, cap. 7, third edn., 1962.
- Jackson, T. J., Le Vine, D. M., Hsu, A. Y., Oldark, A., Starks, P. J., Swift, C. T., Isham, J. D., y Haken, M., 1999: *Soil moisture mapping at regional scales using microwave radiometry: the southern great plains hydrology experiment*, IEEE T. Geosci. Remote, **37**, 2136–2151.
- Legrand, M., Pietras, C., Brogniez, G., Haeffelin, M., Abuhassan, N. K., y Sicard, M., 2000: *A high-accuracy multiwavelength radiometer for in situ measurements in the thermal infrared: Part I. Characterization of the instrument*, J. Atmos. Ocean. Tech., **17**, 1203–1214.
- Martín-Neira, M. y Goutoule, J. M., 1997: *MIRAS-A two dimensional aperture-synthesis radiometer for soil-moisture and ocean-salinity observations*, ESA Bulletin, **92**, 95–104.
- Ogawa, K., Schmugge, T., y Rokugawa, S., 2006: *Observations of the dependence of the thermal infrared emissivity on soil moisture*, Geophysical Research Abstracts, **8**, 04 996.
- Porta, J., 1986: *Técnicas y experimentos en Edafología*, Col·legi Oficial d'Enginyers Agrònoms de Catalunya, Barcelona, Spain, 282 pp.
- Rubio, E., Caselles, V., y Badenas, C., 1997: *Emissivity measurements of several soils and vegetation types in the 8-14  $\mu\text{m}$  wave*

- band: analysis of two field methods*, Remote Sens. Environ., **59**, 490–521.
- Salisbury, J. W. y D’Aria, D. M., 1992: *Emissivity of terrestrial materials in the 8-14  $\mu\text{m}$  atmospheric window*, Remote Sens. Environ., **42**, 83–106.
- Sobrino, J. A. y Caselles, V., 1989: *Medida mediante el método de la caja de la emisividad en la banda espectral de los 8-14  $\mu\text{m}$  de algunos suelos agrícolas y de la vegetación*, An. Fis., **B85**, 220–227.
- Urai, M., Matsunaga, T., y Ishii, T., 1997: *Relationship between soil moisture content and thermal infrared emissivity of the sand sampled in Muus Desert, China*, Remote Sensing Society of Japan, **17**, 322–331.
- USDA, 1999: *Soil taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys*, 436, Natural Resources Conservation Service USDA, Soil Survey Staff, Washington, DC., 870 pp.
- Van Bavel, C. H. M. y Hillel, D., 1976: *Calculating potential and actual evaporation from a bare soil surface by simulation of concurrent flow of water and heat*, Agr. Meteorol., **76**, 453–476.
- Xiao, Q., Liu, Q. H., Li, X. W., Chen, L. F., Liu, Q., y Xin, X. Z., 2003: *A field measurement method of spectral emissivity and research on the feature of soil thermal infrared emissivity*, J. Infrared Millim. W., **22**, 373–378.