

Estudio de la variación angular de la emisividad del crudo para la identificación de vertidos marinos en el infrarrojo térmico

R. Niclòs, C. Doña, M. Bisquert, E. Valor, y V. Caselles

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

Dr. Moliner, 50. 46100 Burjassot (Valencia)

Resumen

El propósito del trabajo fue la caracterización experimental de la variación espectral y angular de la emisividad de crudo y agua de mar en el infrarrojo térmico (TIR) con el fin de mejorar la capacidad de identificación de vertidos en mar a partir de imágenes TIR de satélite. Los resultados muestran que la emisividad del crudo es inferior a la del agua de mar, se comporta como un cuerpo gris entre 8-13 μm y decrece acusadamente con el ángulo de observación, incluso más que la del agua de mar. Los resultados experimentales fueron contrastados haciendo uso de la capacidad biangular del ENVISAT-AATSR.

Palabras clave: emisividad, infrarrojo térmico, crudo, agua de mar, vertido.

Abstract

The paper purpose was to carry out experimental measurements to characterize the spectral and angular variations of crude and seawater emissivities in the thermal infrared (TIR) region with the aim to improve the capability of crude oil slick identification from satellite TIR imagery. The results showed that crude emissivity is lower than seawater emissivity, behaves as a greybody in the 8-13 μm atmospheric window, and has a marked emissivity decrease with angle, even higher than that of seawater. The experimental results were checked by using the dual-angle viewing capability of the ENVISAT-AATSR.

Key words: emissivity, thermal infrared, crude, seawater, oil slick.

Introducción

Trabajos previos han demostrado que la emisividad del crudo es inferior a la del agua del mar en la región del infrarrojo térmico (TIR) (Salisbury *et al.*, 1993; Lammoglia & De Souza Filho, 2011), con lo que los vertidos de crudo tenderán a decrecer la emisividad térmica de la superficie afectada observada desde satélite. El presente trabajo tuvo como propósito el desarrollo de medidas experimentales con el fin de caracterizar la variación espectral y también angular de las emisividades de crudo y agua de mar en el TIR con el fin de mejorar

la capacidad de identificación de vertidos desde satélite. Para ello se midieron angularmente muestras de crudo y agua con radiómetros multicanales en la región de 8-13 μm . Los resultados experimentales fueron contrastados además mediante la capacidad biangular del radiómetro AATSR a bordo del ENVISAT durante un vertido marino reciente.

Muestras e instrumentación

Durante el experimento se midieron de forma alternativa muestras de crudo y agua

* Autor para la correspondencia: Raquel.Niclos@uv.es
Recibido: 20-05-13; Aceptado: 04-06-13.

de mar. El crudo, proporcionado por Repsol, S. A., en el marco de un convenio de colaboración con la Universidad de Valencia, estaba caracterizado por un °API=33,0 (donde °API ofrece una medida de como de pesado o ligero es el crudo comparado con el agua) y fracciones SARA de 64% m/m de hidrocarburos saturados, 18% m/m de hidrocarburos aromáticos, 11% m/m de resinas, 6% m/m de C5 asfaltenos, y 0.3% m/m de azufre. La viscosidad del crudo era de $19,0 \cdot 10^6 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ y $6,5 \cdot 10^6 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ para 20°C y 40°C respectivamente y el factor K Watson, como índice aproximado de parafinas, era de 12. Con ello, se trataba de un crudo relativamente ligero (debido al alto °API, baja viscosidad y alto porcentaje de hidrocarburos saturados) con tendencia parafínica. El agua de mar fue tomada del Mediterráneo, con una salinidad de 34 psu.

Las muestras se midieron con dos radiómetros CIMEL CE 312 con 6 bandas espectrales entre 8-13 μm : una ancha cubriendo toda la banda espectral y 5 estrechas entre 8,1-8,5 μm , 8,5-8,9 μm , 8,9-9,3 μm , 10,3-11,0 μm , y 11,0-11,7 μm (www.cimel.fr; Brogniez *et al.*, 2003). Los instrumentos fueron calibrados frente a una fuente cuerpo negro LANDCAL P80P para temperaturas de 5-35°C obteniendo ecuaciones de calibración lineales para cada banda con un error de estimación menor a $\pm 0,03\text{K}$ para todas ellas. Además, los radiómetros CIMEL participaron en una campaña de calibración frente a cuerpos negros de referencia organizada por el Committee on Earth Observation Satellites (CEOS), obteniendo un error máximo de $\pm 0,2 \text{ K}$ para todas las bandas entre 20-30°C (Theocharous *et al.*, 2010). La temperatura termodinámica de la superficie, necesaria para obtener la emisividad (ver en el apartado siguiente), se midió mediante termistores NTC, que fueron también calibrados previamente usando un baño térmico y una sonda de platino de alta precisión como referencia. El error asociado a los termistores tras la calibración fue inferior a $\pm 0,1 \text{ K}$. Adicionalmente se utilizó una cámara térmica TESTO 880 TIR, con una sensibilidad de $\pm 0,1 \text{ K}$, para comprobar la homogeneidad térmica a nivel espacial de las muestras.

Metodología experimental

La radiancia medida por la banda i de un radiómetro térmico observando una superficie cercana en una dirección (θ, ϕ) viene expresada por:

$$L_i(\theta, \phi) = \varepsilon_i(\theta, \phi)B_i(T) + L_i^{ref}(\theta, \phi) \quad [1]$$

donde $B_i(T)$ es la función de Planck promediada para la banda i a una temperatura T , $\varepsilon_i(\theta, \phi)$ es la emisividad superficial direccional, y $L_i^{ref}(\theta, \phi)$ es la reflexión de la radiancia atmosférica descendente en la superficie. Cuando la reflexión en la superficie puede considerarse especular, como por ejemplo para superficies de agua (Barton *et al.*, 1989), el término de reflexión puede aproximarse a:

$$L_i^{ref}(\theta, \phi) = [1 - \varepsilon_i(\theta, \phi)]L_i^{\downarrow atm}(\theta, \phi \pm \pi)$$

siendo $L_i^{\downarrow atm}(\theta, \phi \pm \pi)$ la radiancia atmosférica descendente en la dirección complementaria a la de observación de la superficie. Así, si se conoce la temperatura termodinámica de la superficie T , puede obtenerse su $\varepsilon_i(\theta, \phi)$ a partir de medidas radiométricas de $L_i(\theta, \phi)$ y $L_i^{\downarrow atm}(\theta, \phi \pm \pi)$ (Niclòs *et al.*, 2005):

$$\varepsilon_i(\theta, \phi) = \frac{L_i(\theta, \phi) - L_i^{\downarrow atm}(\theta, \phi \pm \pi)}{B_i(T) - L_i^{\downarrow atm}(\theta, \phi \pm \pi)} \quad [2]$$

Las medidas radiométricas se realizaron para ángulos cenitales θ de 15°, 30°, 45°, 50°, 55°, 60° y 65° con los radiómetros CE 312 montados en trípodes provistos de un sistema goniométrico y un inclinómetro con una precisión de $\pm 0,01^\circ$. El ángulo mínimo de 15° se seleccionó para evitar el efecto narciso. Cada serie de medidas angulares consistía, por tanto, en 7 medidas angulares de la superficie alternadas con 7 medidas atmosféricas con los mismos ángulos pero tomados desde zenit, utilizando siempre las 6 bandas espectrales, y tenía una duración de 10-12 minutos. En primer lugar se realizaba una serie angular sobre la muestra de agua de mar y luego sobre el crudo, repitiendo el proceso un mínimo de 6 veces. Estas medidas angulares se realizaron en una terraza elevada para asegurar la presencia de mínimos elementos circundantes. Además

se llevaron a cabo en condiciones de cielos despejados y baja velocidad de viento para evitar gradientes térmicos espaciales significativos que pudiesen afectar a la medida de la temperatura superficial. La homogeneidad espacial de las muestras se comprobó con la cámara TIR, observando desviaciones estándar de $\pm 0,2$ K en términos de temperatura de brillo para ambas muestras.

Resultados experimentales

Variación espectral

La **Figura 1** muestra las firmas espectrales de la emisividad de crudo y agua de mar medidas para 15° , junto con resultados previos para el caso del agua de mar. Los valores presentados son los obtenidos para las 5 bandas estrechas de los radiómetros CE 312 siguiendo la metodología descrita en la sección 3. Las barras de error en el eje de ordenadas muestran el error de medida de la emisividad, siendo el mayor entre la dispersión de las series de medida y el obtenido por propagación de errores instrumentales (descritos en la sección anterior) sobre la ecuación (2). Las barras en el eje de abscisas indican la anchura de las bandas espectrales. Las medidas de emisividad para el agua de mar coinciden con resultados de trabajos previos para ángulos similares (Salisbury & D'Aria, 1992; Niclòs

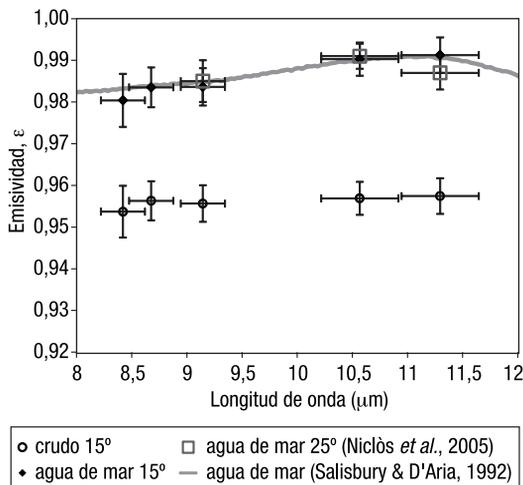


Figura 1. Signaturas espectrales de emisividad de crudo y agua de mar medidas para 15° , junto con resultados previos para el caso del agua de mar.

et al., 2005, 2007, 2009). La emisividad del crudo es inferior a la del agua de mar, tal y como se observó en trabajos previos (Salisbury *et al.*, 1993; Lammoglia & De Souza Filho, 2011). Salisbury *et al.* (1993) midió la reflectividad de diferentes crudos entre $8-13 \mu\text{m}$, siendo de 4,0-4,5% para todos ellos, con valores muy similares dentro del rango espectral. Lammoglia & De Souza Filho (2011) obtuvo emisividades de 0,94-0,97 entre $8-13 \mu\text{m}$ también para diversos crudos. Así, los valores mostrados en la Figura 1 están de acuerdo con los de estos trabajos. Además, el crudo presenta una firma espectral de cuerpo gris entre $8-13 \mu\text{m}$, tal y como también se observó en los trabajos previos para diferentes tipos de crudo y espesores medidos. Esto apunta la incapacidad de identificar diferentes tipos de crudo vertido en mar de forma cuantitativa mediante el uso de satélites con bandas TIR, incluso con el EOSTerra-ASTER con 5 bandas en esta región espectral.

Variación angular

La **Figura 2** muestra las firmas espectrales para 15° y 65° . La variación espectral es similar para ambos ángulos cenitales, sin embargo para ambas muestras se observa un descenso de la emisividad con el ángulo, siendo la diferencia entre la emisividad de agua y crudo mayor para 65° que para 15° . La variación angular del agua de mar es conocida (Smith *et al.*, 1996; Wu y Smith, 1997; Niclòs *et al.*,

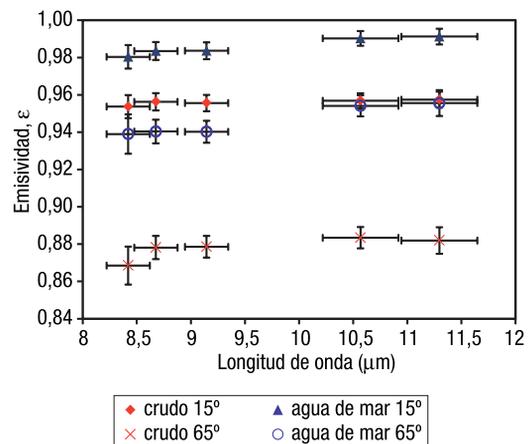


Figura 2. Signaturas espectrales de emisividades de crudo y agua de mar para 15° y 65° .

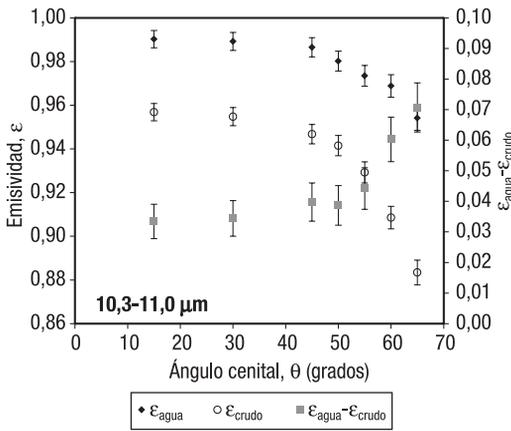


Figura 3. Variación angular de la emisividad de agua de mar y crudo, junto con la diferencia entre ellas.

2005, 2007, 2009), sin embargo no es así para el crudo.

La **Figura 3** muestra los valores de emisividad medidos con los 7 ángulos cenitales para una de las bandas estrechas del CE 312 a modo de ejemplo, obteniéndose resultados similares para el resto de bandas dada la baja variabilidad espectral encontrada. Además, esta figura incluye la diferencia entre la emisividad de agua de mar y crudo en función del ángulo. Las emisividades de ambas muestras decrecen gradualmente con el ángulo para todas las bandas espectrales, siendo más acusado el decrecimiento para el crudo que para el agua de mar. Así, la diferencia entre ellas es de $+0,030 \pm 0,007$ para 15° , y esta diferencia crece con el ángulo de observación, hasta llegar a una diferencia promedio, para las diferentes bandas, de $0,068 \pm 0,010$ para 65° . Así, este incremento podría ser de utilidad en la identificación de vertidos en mar desde satélite.

Análisis con imágenes de satélite

Los resultados experimentales fueron contrastados haciendo uso de la capacidad biangular del ENVISAT-AATSR, que tomó imágenes durante el vertido de la plataforma Deepwater Horizon (DH) de BP en el Golfo de Méjico en 2010. El AATSR dispone de dos visiones cuasi simultáneas de la misma zona: *forward* (*f*) con ángulos cenitales de 53° - 55° y *nadir* (*n*) de 0° - 22° .

La radiancia medida por la banda *i* de un radiómetro TIR a bordo de satélite observando la superficie es:

$$L_i(\theta, \phi) = L_{i,\text{sup}}(\theta, \phi) \tau_i(\theta, \phi) + L_i^{\uparrow \text{atm}}(\theta, \phi) \quad [3]$$

$$L_{i,\text{sup}}(\theta, \phi) = \varepsilon_i(\theta, \phi) B_i(T) + (1 - \varepsilon_i(\theta, \phi)) L_i^{\downarrow \text{atm}}(\theta, \phi \pm \pi) \quad [4]$$

siendo $L_i^{\downarrow \text{atm}}(\theta, \phi)$ la radiancia atmosférica ascendente y $\tau_i(\theta, \phi)$ la transmisividad atmosférica. La ecuación (3) debe ser aplicada a ambas visiones y a sus dos bandas TIR: banda 6 centrada en $10,86 \mu\text{m}$ (cubierta por los datos experimentales) y 7 en $12,05 \mu\text{m}$. Las ecuaciones (3)-(4) muestran como para calcular la emisividad a partir de la medida del satélite requerimos la temperatura *T* y viceversa. Necesitamos solucionar la indeterminación para analizar la diferencia de emisividades entre las visiones *n* y *f*. Para ello podemos estimar previamente la *T* y utilizar la ecuación (3) para cada visión (*v*) de la siguiente forma:

$$\varepsilon_{i,v} = \frac{A_{i,v}}{B_i(T) - L_{i,v}^{\downarrow \text{atm}}} \quad [5]$$

$$\text{donde } A_{i,v} = \frac{L_{i,v} - L_{i,v}^{\uparrow \text{atm}}}{\tau_{i,v}} - L_{i,v}^{\downarrow \text{atm}}.$$

La *T* fue determinada con la banda 13 ($10,66 \mu\text{m}$) del sensor EOSTerra-ASTER de alta resolución espacial, debido a que se trata de una banda sobre la que la atmósfera tiene relativamente baja influencia (Coll *et al.*, 2007). Para estudiar el efecto del citado vertido DH, que tuvo lugar a finales de abril de 2010, seleccionamos así imágenes AATSR (ATS_TOA) y ASTER (AST_L1B) coincidentes y libres de nubes del 24 de mayo de 2010 y escogimos sobre ellas dos zonas de estudio: el cuerpo principal del vertido y agua de mar limpia relativamente cercana. Para estas zonas se obtuvieron perfiles atmosféricos de temperatura y vapor de agua a partir del producto EOSTerra-MODIS MOD07 que, tras ser introducidos en el modelo de transferencia radiativa MODTRAN 5, nos permitieron simular para cada zona, banda espectral (ASTER 13 y AATSR 6) y ángulo de visión las variables $\tau_{i,v}$, $L_{i,v}^{\downarrow \text{atm}}$ y $L_{i,v}^{\uparrow \text{atm}}$. La **Tabla 1** muestra valores estadísticos de las emisividades *n* y *f* obtenidas para la banda 6 del

Tabla 1. Emisividades *nadir* (n) y *forward* (f) para la banda 6 del AATSR obtenidas mediante la ecuación (5).

	Agua de mar		Vertido	
	$\epsilon_{6,n}$	$\epsilon_{6,f}$	$\epsilon_{6,n}$	$\epsilon_{6,f}$
promedio	0,993	0,976	0,959	0,933
SD	0,002	0,004	0,006	0,011
mediana	0,993	0,976	0,959	0,931
RSD	0,003	0,004	0,005	0,011
referencia	0,992	0,975	0,957	0,929
mediana-referencia	0,001	0,001	0,002	0,002

AATSR mediante la ecuación (5). Estos son: promedio, desviación estándar (SD), mediana y desviación estándar robusta [RSD = mediana(| $\epsilon_{i,v}$ - mediana($\epsilon_{i,v}$)|) * 1,4826 (Wilrich, 2007)], siendo los dos últimos parámetros valores más significativos por minimizar el efecto de posibles datos extremos. La Tabla 1 muestra además valores de referencia para dichas emisividades obtenidos de Niclòs *et al.* (2009) para el agua de mar y de los datos experimentales medidos con 15° y 55° para el crudo, siendo insignificantes las diferencias entre las medianas y estos valores de referencia para ambas zonas.

Como método alternativo, asumimos la misma T para ambas visiones del AASTR. En este caso, la emisividad f puede obtenerse a partir de la n mediante:

$$\epsilon_{i,f} = \frac{A_{i,f}}{(A_{i,n} / \epsilon_{i,n}) + (L_{i,n}^{\downarrow am} - L_{i,f}^{\downarrow am})} \quad [6]$$

Asumiendo valores para las emisividades n de 0,957 para el vertido y 0,992 para el agua de mar obtuvimos las emisividades f que se expresan en la Tabla 2. Esta tabla muestra de nuevo un buen acuerdo entre los valores estimados y los valores de referencia.

Tabla 2. Emisividades *forward* (f) obtenidas para la banda 6 del AATSR mediante la ecuación (6).

$\epsilon_{6,f}$	Agua de mar	Vertido
promedio	0,975	0,930
SD	0,004	0,010
mediana	0,975	0,930
RSD	0,004	0,011
referencia	0,975	0,929
mediana-referencia	0,000	0,001

Conclusiones

Los datos experimentales muestran una variación espectral despreciable para la emisividad del crudo entre 8-13 μm y un acusado decrecimiento con el ángulo de observación (desde $0,956 \pm 0,005$ para 15° a $0,873 \pm 0,007$ para 65°), superior al del agua de mar. La emisividad del crudo es siempre inferior a la del agua y la diferencia de emisividades agua-crudo aumenta con el ángulo cenital, mostrando una diferencia promedio de $+0,030 \pm 0,007$ para observaciones nadir y de $0,068 \pm 0,010$ para 65° . Los datos experimentales se confirman haciendo uso de la visión biangular del AATSR. Así, se observan diferencias entre la emisividad obtenida para el vertido DH y el agua de mar de $-0,035$ y $-0,046$ para las visiones n y f respectivamente, y diferencias $n-f$ de $+0,028$ para el vertido y de $+0,017$ para el agua de mar, en concordancia con los resultados experimentales y también con trabajos previos para el agua (Niclòs *et al.*, 2005, 2009). Atendiendo a estas diferencias en emisividad, los vertidos de crudo son identificables mediante imágenes TIR de satélite, especialmente utilizando ángulos de observación elevados, dado el acusado decrecimiento angular observado para el crudo.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación (proyectos CGL2010-16364, CGL2010-17577, CGL2011-13579-E, CGL2011-30433 y Contrato de Investigación “Ramón y Cajal” de la Dr. Niclòs) y la Generalitat Valenciana (PROMETEO/2009/086). El

crudo fue proporcionado por Repsol S.A. en el marco de un convenio de colaboración establecido con la Universidad de Valencia.

Referencias

- BARTON, I. J., ZAVODY, A. M., O'BRIEN, D. M., CUTTEN, D. R., SAUNDERS, R. W., & LLEWELLING-JONES, D. T. 1989. Theoretical algorithms for satellite derived sea surface temperatures. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 94, 3365-3375.
- 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*, Vol. 20(7), 1023-1033.
- COLL, C., CASELLES, V., VALOR, E., NICLÒS, R., SÁNCHEZ, J. M., GALVE, J. M., & MIRA, M. 2007. Temperature and emissivity separation from ASTER data for low spectral contrast surfaces. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 110: 162-175.
- LAMMOGLIA, T., & DE SOUZA FILHO, C.R. 2011. Spectroscopic characterization of oils yielded from Brazilian offshore basins: Potential applications of remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 115, 2525-2535.
- NICLÒS, R., CASELLES, V., VALOR, E., COLL, C., & SANCHEZ, J. M. 2009. A simple equation for determining the sea surface emissivity in the 3-15 μm region. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 30, 1603-1619.
- NICLÒS, R., VALOR, E., CASELLES, V., COLL, C., & SÁNCHEZ, J. M. 2005. In situ angular measurements of thermal infrared sea surface emissivity - Validation of models. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 94, 83-93.
- NICLÒS, R., CASELLES, V., VALOR, E. & COLL, C. 2007. Foam effect on the sea surface emissivity in the 8-14 μm region. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 112, C12020.
- SALISBURY, J. W., & D'ARIA, D. M. 1992. Emissivity of terrestrial materials in the 8-14 μm atmospheric window. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 42, 83-106.
- SALISBURY, J. W., D'ARIA, D. M. & SABINS, F. F. 1993. Thermal infrared remote sensing of crude oil slicks. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 45, 225-231.
- SMITH, W. L., KNUTESON, R. O., REVERCOMB, H. E., FELTZ, W., HOWELL, H. B., MENZEL, W. P., *et al.* 1996. Observations of the infrared radiative properties of the ocean — implications for the measurement of sea surface temperature via satellite remote sensing. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 77, 41-51.
- THEOCHAROUS, E., USADI, E., & FOX, N. P. 2010. CEOS comparison of IR brightness temperature measurements in support of satellite validation. Part I: Laboratory and ocean surface temperature comparison of radiation thermometers. NPL REPORT OP3. Teddington, UK: National Physical Laboratory.
- WILRICH, P. T. 2007. Robust estimates of the theoretical standard deviation to be used in interlaboratory precision experiments. *Accreditation and Quality Assurance*, Vol. 12, 231-240.
- WU, X., & SMITH, W. L. 1997. Emissivity of rough sea surface for 8-13 μm : modelling and verification. *Applied Optics*, Vol. 36, 2609-2619.