

# Emisividad de la superficie del mar para los sensores AVHRR-NOAA y MODIS-EOSAqua

R. Niclòs, V. Caselles, C. Coll, E. Valor, J.M. Sánchez y J.M. Galve

*Dep. Termodinámica. Universidad de Valencia. C/ Dr. Moliner 50, 46100 Burjassot, Valencia.*  
Raquel.Niclos@uv.es

## RESUMEN

La obtención de la Temperatura de la Superficie del Mar (TSM) mediante radiometría requiere una correcta determinación de la Emisividad de la Superficie del Mar (ESM) en el infrarrojo térmico. Niclòs et al. (2005b) mostraron la validez, pero también la complejidad matemática, del modelo teórico de Wu y Smith (1997) para reproducir dicha ESM para cualquier ángulo de observación y velocidad del viento en superficie, frente a la ineficiencia del modelo de Masuda et al. (1988) para ángulos superiores a 50°. Además, propusieron una parametrización para el cálculo de la ESM basada en el modelo de Wu y Smith (1997). En este trabajo justificamos en mayor medida la adecuación del modelo de Wu y Smith (1997), y comprobamos la eficiencia de nuestra parametrización, a la vez que la adaptamos a otros sensores actualmente a bordo de satélite: AVHRR/2 a bordo de NOAA-14, AVHRR/3 en NOAA-16, NOAA-17 y NOAA-18, y MODIS en EOSAqua. Esta ecuación simple permite la precisa obtención de valores de canal de la ESM para cualquier condición de rugosidad de la superficie, producida por el viento, y ángulo de observación. Su implementación en futuros algoritmos para la determinación de la TSM (de tipo monocanal, multicanal y multiangular) podría mejorar los resultados obtenidos hasta el momento.

**PALABRAS CLAVE:** emisividad de la superficie del mar, temperatura de la superficie del mar, infrarrojo térmico, variación angular.

## ABSTRACT

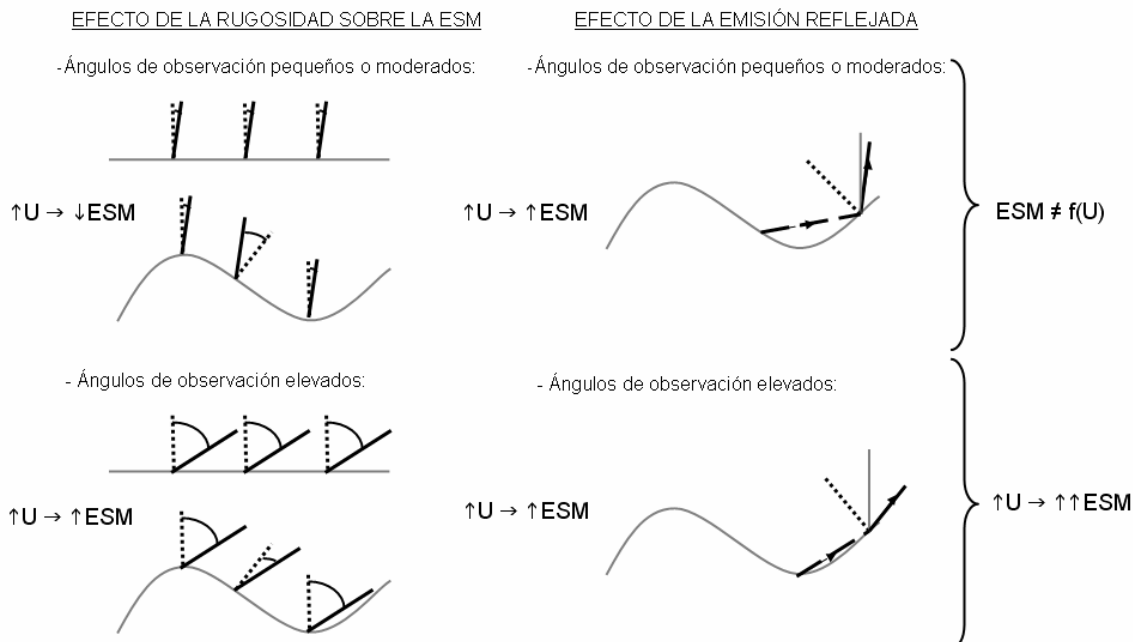
Sea Surface Temperature (SST) retrieval by means of thermal radiometry requires a correct determination of the Sea Surface Emissivity (SSE) in the thermal infrared region. Niclòs et al. (2005b) showed the soundness but the mathematical complexity of the model proposed by Wu and Smith (1997) to reproduce the aforementioned SSE for any observation angle and surface wind speed, opposite to the inefficiency of the model of Masuda et al. (1988) for angles larger than 50 degrees. Moreover, a parametrization was proposed for the SSE determination based in the model of Wu and Smith (1997). In this paper, the suitability of the model of Wu and Smith (1997) is more carefully justify, and the soundness of our parametrization is checked at the same time as it is adapted to other current sensors on board satellite, such as AVHRR/2 on board NOAA-14, AVHRR/3 on NOAA-16, NOAA-17 and NOAA-18, and MODIS on EOSAqua. This simple equation allows an accurate assessment of channel values of SSE for any surface roughness, consequence of surface wind, and observation angle. Its implementation in future algorithms for SST retrieval (monochannel, split-window and dual-angle) could improve the results obtained up to the moment.

**KEY WORDS:** sea surface emissivity, sea surface temperature, thermal infrared, angular variation.

## INTRODUCCIÓN

La obtención de la Temperatura de la Superficie del Mar (TSM) con una precisión de  $\pm 0,3$  K, valor fijado como mínimo necesario para estudios a nivel climático y oceanográfico por el programa internacional *Tropical Ocean Global Atmosphere* (Barton 1992), y también meta para las actuales misiones espaciales, requiere un error máximo en la Emisividad de la Superficie del Mar (ESM) de  $\pm 0,5\%$  (Wu y Smith 1997). Con el objetivo de determinar dicha

ESM necesaria para la determinación de la TSM mediante radiometría, y dada la escasez de valores experimentales precisos (Smith et al. 1996), se propusieron diferentes modelos de tipo teórico, tales como el modelo de Masuda et al. (1988), extensamente usado en la bibliografía, Watts et al. (1996) y Wu y Smith (1997), siendo este último el más completo. La validez de dichos modelos fue analizada en comparación con medidas de ESM realizadas con tal propósito en condiciones de mar abierto y un amplio intervalo de velocidades de viento en



**Figura 1.** Geometría de emisión y reflexión por parte del oleaje instantáneo de la superficie del mar. Esta figura muestra de modo gráfico los efectos combinados de emisión y reflexión sobre la ESM consecuencia de la rugosidad generada por la velocidad del viento en superficie ( $U$ ).

superficie y ángulos de observación (Nicolòs et al. 2005a), concluyendo que, mientras que el modelo de Masuda et al. (1988) subestima la ESM para ángulos superiores a  $50^\circ$ , el modelo de Wu y Smith (1997), tomando en consideración adicionalmente el efecto de reflexión de la radiancia emitida por la superficie del mar en ella misma, consigue reproducir con exactitud la ESM para cualquier geometría de observación y velocidad del viento en superficie, generadora de rugosidad. Este efecto, obviado en trabajos como el de Masuda et al. (1988), consigue explicar el hecho de que para ángulos reducidos la ESM no presente dependencia con la velocidad del viento en superficie, mientras que para ángulos de observación superiores a unos  $40^\circ$  dicha dependencia sea significativa y tienda a un aumento del valor de la ESM con la velocidad, al contrario de lo que predecía el modelo de Masuda et al. (1988). La Figura 1 pretende mostrar gráficamente el efecto adicional que supone la emisión reflejada.

Partimos de la idea de que una superficie de mar plana no se comporta como emisor lambertiano, sino que para ella la emisividad decrece con el ángulo de emisión respecto a su perpendicular. En la parte izquierda de la Figura 1 vemos la dependencia de la ESM respecto de la rugosidad, donde

se representa el ángulo formado entre la dirección de observación (línea continua) y la normal a la superficie (línea discontinua), tanto para el caso de una superficie de mar en calma como de una rugosa, distinguiendo además entre ángulos de observación pequeños o moderados (hasta unos  $50^\circ$ ) y elevados. Con una superficie de mar rugosa, tendremos un ángulo de emisión diferente para cada punto. Sobre crestas y valles no habrá diferencia respecto del caso de superficie plana, pero sí para los laterales del oleaje. Cuando el ángulo de observación sea pequeño tendremos un mayor ángulo formado entre ambas direcciones para los laterales, con lo que la emisividad será menor. Así, tendremos una disminución de la emisividad efectiva para la superficie del mar con la rugosidad, y por tanto con la velocidad del viento en superficie. Sin embargo, cuando disponemos de ángulos de observación elevados, tendremos el efecto contrario. La emisividad efectiva aumentará en este caso con la velocidad del viento en superficie.

Ahora bien, el efecto de reflexión de la radiancia emitida por la superficie del mar en ella misma, o emisión reflejada, representado en la parte derecha de la Figura 1, tiene mayor probabilidad de suceder cuando más acusada sea la rugosidad de la superfi-

cie, es decir, cuando mayor sea la velocidad del viento en superficie. Este efecto para cualquier ángulo tenderá a incrementar la señal recibida por el radiómetro, comportando un aumento en la emisividad efectiva de la superficie, ya que realmente la TSM será la misma. Por tanto, debido al efecto de la emisión reflejada, la emisividad aumentará con la velocidad del viento en superficie para cualquier ángulo de observación.

Finalmente, si consideramos a la vez ambos efectos la combinación se traduce en una reducción de la sensibilidad de la ESM a la rugosidad de la superficie para ángulos pequeños y un evidente aumento de la ESM con la velocidad del viento para ángulos elevados, comportamiento patente tanto en nuestros valores experimentales como en los resultados del modelo de Wu y Smith (1997), a diferencia de los del modelo de Masuda et al. (1988) (ver Figura 1 de Niclòs et al. 2005b).

## PARAMETRIZACIÓN DE LA ESM

La complejidad matemática del modelo de Wu y Smith (1997), mostrada en Niclòs et al. (2005b), nos planteó la necesidad de obtener una ecuación más simple, aunque igualmente precisa, para la determinación de la ESM. Dicha parametrización fue desarrollada a través de ajustes de los valores teóricos ofrecidos por el modelo de Wu y Smith (1997), seleccionado como óptimo. Primeramente se planteó una ecuación monocromática, válida para el intervalo espectral de 3 a 16 mm, que caracterizaba la dependencia angular con una función coseno suavizada mediante diversos parámetros. A continuación, se comprobó la bondad de esta ecuación con valores integrados dentro de los canales térmicos de diversos radiómetros actualmente a bordo de satélite, cuya expresión es la siguiente:

$$\varepsilon_i(\theta, U) = \varepsilon_i(0^\circ) [\cos(\theta^{a_i(U)})]^{b_i(U)} \quad (1)$$

donde  $\varepsilon_i(\theta, U)$  representa la ESM, función del ángulo de observación,  $\theta$  (radianes), y la velocidad del viento en superficie,  $U$  (m/s); mientras que  $\varepsilon_i(0^\circ)$  es el valor de la ESM en nadir (donde ésta no presenta dependencia apreciable respecto de  $U$ ). Ambas magnitudes son valores de ESM integrados dentro de una banda espectral  $i$ , y  $a_i(U)$  y  $b_i(U)$  los coeficientes de ajuste para dicha banda.

El análisis de los parámetros  $a_i(U)$  y  $b_i(U)$  obtenidos mostraba una mayor dependencia de  $a_i(U)$  con respecto a  $U$ , siendo relativamente independiente del canal considerado, mientras que  $b_i(U)$  presentaba una clara dependencia respecto del canal pero parecía no verse influenciado por la  $U$ . Además, tomando valores medios de  $a_i(U)$  dentro del infrarrojo térmico (IRT) para diferentes velocidades  $U$ , ya que su variación espectral resulta despreciable, se obtuvo un ajuste lineal  $a(U) = cU + d$ , con un error estándar de estimación de  $\pm 0,03$  y un coeficiente de determinación de 0,989 (ver Figura 2). La pendiente y ordenada en el origen obtenidas para la regresión lineal fueron  $c = -0,037 \pm 0,003$  s/m y  $d = 2,36 \pm 0,03$  respectivamente.

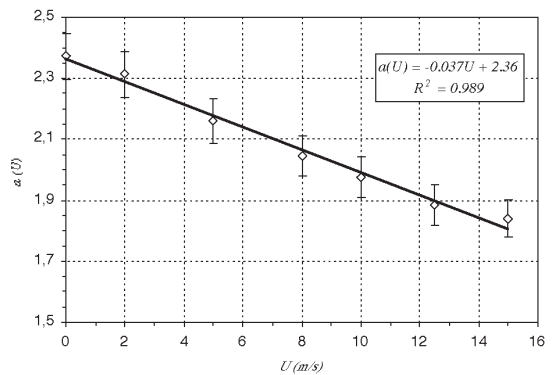


Figura 2. Ajuste lineal de los valores medios del parámetro  $a_i(U)$  de la ecuación (1) dentro del IRT en función de la velocidad del viento en superficie,  $U$ .

En consecuencia, la ecuación (1) finalmente se describió de la siguiente forma simplificada:

$$\varepsilon_i(\theta, U) = \varepsilon_i(0^\circ) [\cos(\theta^{cU+d})]^{b_i} \quad (2)$$

donde únicamente  $\varepsilon_i(q, U)$  y el coeficiente  $b_i$  son función de la banda espectral considerada, mientras que los coeficientes  $c$  y  $d$  (dados arriba) son constantes para cualquier canal y velocidad del viento.

El alto grado de ajuste existente entre los resultados de esta ecuación y los del modelo de Wu y Smith (1997) se deduce de obtener errores estándar de estimación,  $\sigma_{ajuste,i}$ , inferiores a  $\pm 0,1$  % y coeficientes de determinación,  $r_i^2$ , superiores a 0,9987 para las diversas bandas térmicas comprobadas,

demostrando la bondad de esta ecuación simple para determinar ESMs de canal. Como ejemplo, la Figura 3 presenta la dependencia angular de la ESM proporcionada por dicha ecuación para  $U$  de 0 m/s y 15 m/s y las bandas térmicas del radiómetro MODIS actualmente a bordo de EOS-Aqua. Cabe destacar que solamente se incluyen las bandas situadas dentro de las ventanas espectrales existentes en la región del IRT, donde tiene sentido una determinación de la ESM que permita la obtención posterior de la TSM.

## RESULTADOS

Niclòs et al. (2005b) proporcionaron los valores de los coeficientes  $b_i$  y de ESM en nadir  $\varepsilon_i(0^\circ)$  obtenidos para las bandas térmicas de tres radiómetros: AATSR a bordo de ENVISAT, MODIS en EOS-Terra, y SEVIRI en MSG.

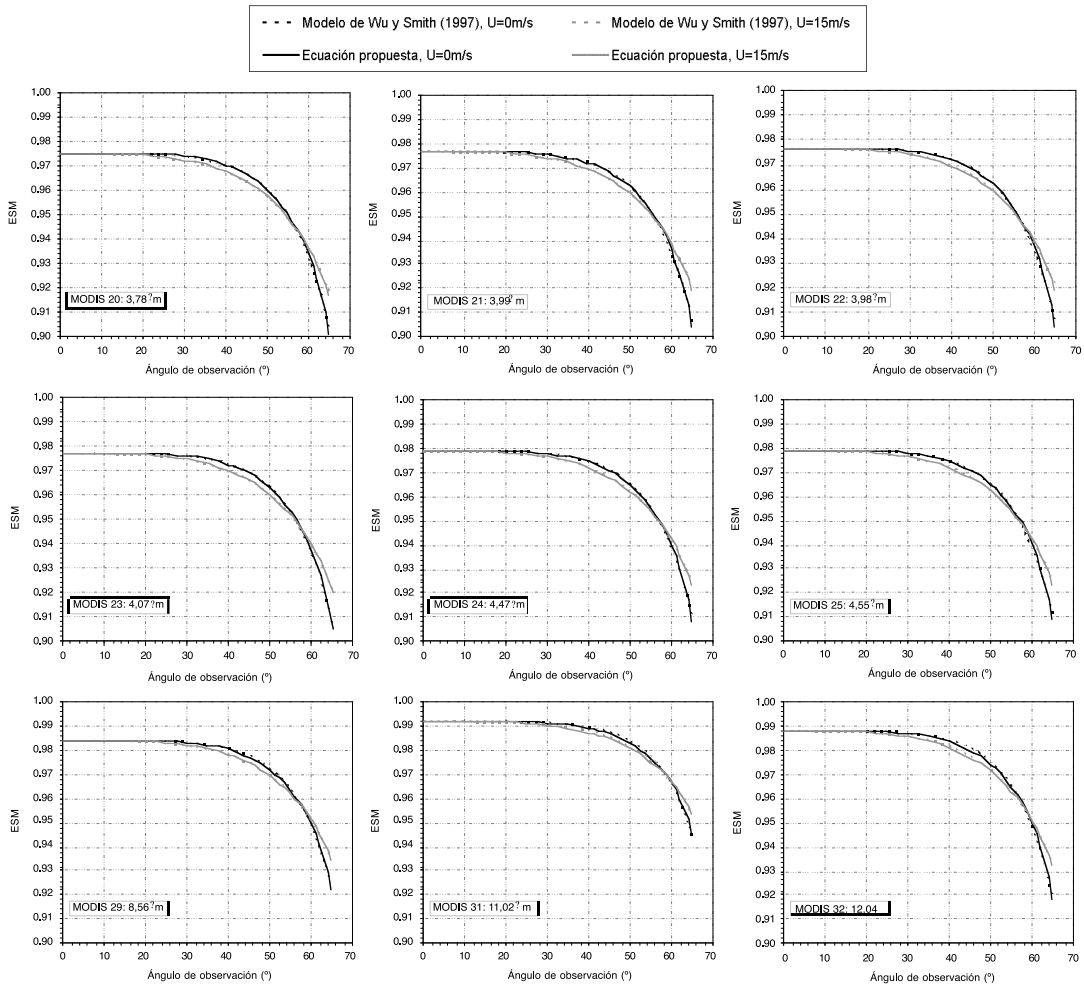
En el presente trabajo, ampliamos la tabla de coeficientes con los valores correspondientes a otros sensores actualmente a bordo de satélite: AVHRR/2 en NOAA-14; AVHRR/3 en NOAA-16, NOAA-17

y NOAA-18; y MODIS en EOS-Aqua. La Tabla 1 muestra dichos coeficientes, donde los errores asociados a éstos,  $\sigma(b_i)$ , son las desviaciones estándar de los coeficientes dentro del intervalo de velocidades de viento consideradas, siendo tales valores siempre superiores a los errores estándar de estimación obtenidos. Los valores de canal tabulados para la ESM en nadir,  $\varepsilon_i(0^\circ)$ , han sido determinados mediante la integración de las emisividades espectrales calculadas con el modelo de Wu y Smith (1997), pero en cualquier caso estos valores pueden obtenerse a partir de bases de emisividades espectrales (Salisbury y D’Aria 1992) o por medida directa, adecuándolos mejor a las propiedades de la superficie medida. Los errores asociados a esta magnitud que aparecen tabulados son de nuevo las desviaciones estándar de los valores determinados para diferentes velocidades del viento en superficie.

Finalmente, con el objetivo de comprobar la exactitud de la ecuación propuesta, determinamos la  $\varepsilon_i(q, U)$  para ángulos de observación entre  $0^\circ$  y  $65^\circ$  y  $U$  de 0 a 15 m/s utilizando para ello la ecuación (2) y los valores tabulados para  $b_i$  y  $\varepsilon_i(0^\circ)$ . Estos resultados fueron comparados con los valores calculados con el modelo

Radiómetro	Canal	$\lambda_{ef,i}(\mu m)$	$\varepsilon_i(0^\circ)$	$\alpha(\varepsilon_i(0^\circ))$	$b_i$	$\alpha(b_i)$	$\sigma_{ajuste,i}$	$r_i^2$
AVHRR/3 (NOAA 18)	3B	3,77	0,97494	0,00006	0,0549	0,0019	0,0010	0,997
	4	10,79	0,99187	0,00003	0,0344	0,0015	0,0008	0,996
	5	12,02	0,98807	0,00005	0,0503	0,0019	0,0009	0,997
AVHRR/3 (NOAA 17)	3B	3,76	0,97483	0,00006	0,0549	0,0019	0,0010	0,997
	4	10,81	0,99184	0,00003	0,0346	0,0015	0,0008	0,997
	5	11,93	0,98887	0,00004	0,0480	0,0018	0,0009	0,997
AVHRR/3 (NOAA 16)	3B	3,72	0,97440	0,00006	0,0553	0,0019	0,0010	0,997
	4	10,92	0,99192	0,00003	0,0348	0,0015	0,0008	0,996
	5	11,99	0,98835	0,00005	0,0493	0,0019	0,0009	0,997
AVHRR/2 (NOAA 14)	3	3,77	0,97495	0,00006	0,0548	0,0019	0,0010	0,997
	4	10,79	0,99174	0,00003	0,0347	0,0015	0,0008	0,996
	5	12,00	0,98823	0,00005	0,0498	0,0019	0,0009	0,997
MODIS (EOS AQUA)	20	3,78	0,97527	0,00006	0,0546	0,0019	0,0010	0,997
	21	3,99	0,97687	0,00006	0,0533	0,0019	0,0010	0,997
	22	3,98	0,97681	0,00006	0,0533	0,0019	0,0010	0,997
	23	4,07	0,97733	0,00006	0,0529	0,0018	0,0010	0,997
	24	4,47	0,97891	0,00006	0,0514	0,0018	0,0009	0,997
	25	4,55	0,97907	0,00006	0,0513	0,0018	0,0009	0,997
	29	8,56	0,98439	0,00005	0,0455	0,0017	0,0008	0,997
	31	11,02	0,99229	0,00003	0,0342	0,0015	0,0008	0,996
32	12,04	0,98813	0,00005	0,0508	0,0019	0,0009	0,997	

**Tabla 1.** Parámetros de la ecuación (2) asociados a las bandas térmicas de diversos sensores a bordo de satélite. Las bandas espectrales vienen definidas por su etiqueta y su longitud de onda efectiva,  $\lambda_{ef,i}$ .



**Figura 3.** Comparación entre los valores de ESM calculados con el modelo de Wu y Smith (1997) y los determinados mediante la ec. (2) con los coeficientes correspondientes a cada canal del MODIS-EOSAqua.

de Wu y Smith (1997), obteniéndose pequeños errores estándar de estimación y elevados coeficientes de determinación, muy próximos siempre a la unidad, mostrados en las dos últimas columnas de la Tabla 1.

Así, considerando como válido el modelo de Wu y Smith (1997) para la determinación de la ESM, vemos que el error de estimación comportado por la ecuación propuesta, ecuación (2), es menor a  $\pm 0,10\%$ , por debajo del  $\pm 0,5\%$  requerido como mínimo para posibilitar la determinación de la temperatura de la superficie del mar con un error de  $\pm 0,3\text{ K}$  (Wu y Smith 1997). Además, esta parametrización permite una simple pero exacta determinación de la ESM para cualquier ángulo de observación y velocidad del viento en superficie, siendo válida inclu-

so para la corrección de radiancias medidas bajo ángulos elevados (hasta de unos  $65^\circ$ ) por radiómetros térmicos a bordo de satélite.

## CONCLUSIONES

La aplicación de esta parametrización con el uso de imágenes de velocidad del viento en superficie, tomadas mediante radar en microondas, como el ASAR - ENVISAT (ESA) o QuikScat (NASA), permitiría la producción de mapas de ESM para cada banda térmica requerida. Además, los valores serían calculados píxel por píxel teniendo en cuenta así la posible variación del ángulo de observación

en las imágenes de radiancia a corregir con dicho mapa de ESM. Utilizando estas imágenes de ESM, la determinación de la TSM a partir de imágenes de radiancia en el IRT coincidentes temporal y espacialmente, resultaría mucho más precisa.

Por otra parte, esta parametrización podría implementarse en futuros algoritmos para la determinación de la TSM, tomando como base métodos monocanal, multicanal o multiangular. El motivo de la inclusión en los algoritmos multicanal de términos ( $\sec\theta - 1$ ) se asocia unas veces al aumento del espesor atmosférico con el ángulo de observación,  $\theta$ , y otras a su utilidad para corregir el descenso de la ESM con dicho ángulo. Si tomamos como cierta la segunda opción, podemos comprobar que, cuando ajustamos la dependencia angular de la emisividad a monomios ( $\sec\theta - 1$ ), los resultados mejoran cuando más términos consideramos, por tanto, se trataría de una serie de potencias con ( $\sec\theta - 1$ ). Sin embargo, el resultado de la suma de una serie como ésta sería equivalente al desarrollo de Mac-Laurin de una función coseno elevada a un exponente, semejante a la que proponemos en nuestro trabajo, simplemente observando las dependencias físicas presentadas por la ESM. Adicionalmente nuestra parametrización incluye el efecto de la velocidad del viento en superficie, importante para visiones bajo ángulos de observación elevados, con lo que consideramos que la inclusión de esta ecuación en los algoritmos multicanal podría llegar a mejorar los resultados obtenidos hasta el momento.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el MCyT (Acción Especial REN 2002-11605-E/CLI, Proyecto REN 2001-3116/CLI, y el Contrato de Investigación "Ramón y Cajal" del Dr. E. Valor), el MEC (Proyecto CGL2004-06099-C03-01/CLI, Acción Complementaria CGL2004-0166-E y el contrato como Técnico Superior de Investigación de R. Nicolòs), la Generalitat Valenciana (Proyecto GV2004-B-084) y la Universitat de València (Beca "V Segles" de J.M. Sánchez).

## BIBLIOGRAFIA

- BARTON, I. J. 1992. Satellite-derived sea surface temperatures - A comparison between operational, theoretical and experimental algorithms. *Journal of Applied Meteorology*. 31: 432-442.
- MASUDA, K., TAKASHIMA, T., y TAKAYAMA, Y. 1988. Emissivity of pure sea waters for the model sea surface in the infrared window regions. *Remote Sensing of Environment*. 48: 302-308.
- NICLÒS, R., VALOR, E., CASELLES, V., COLL, C., y SÁNCHEZ, J. M.. 2005a. In situ angular measurements of thermal infrared sea surface emissivity - Validation of models. *Remote Sensing of Environment*. 94(1): 83-93.
- NICLÒS, R., CASELLES, V., COLL, C., VALOR, E., SÁNCHEZ, J. M., y GALVE, J. M.. 2005b. Propuesta de un algoritmo simple para la determinación de la emisividad de la superficie del mar. *Revista de Teledetección*. 23: 81-87.
- SALISBURY, J.W., y D'ARIA, D.M. 1992. Emissivity of terrestrial materials in the 8-14 mm atmospheric window. *Remote Sensing of Environment*. 42: 83-106.
- SMITH, W. L., KNUTESON, R.O., REVERCOMB, H. E., FELTZ, W., HOWELL, H. B., MENZEL, W. P., NALLI, N. R., BROWN, O., BROWN, J., MINNETT, P., y MCKEOW, W. 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*. 77(1): 41-50.
- WATTS, P. D., ALLEN, M. R., Y NIGHTINGALE, T. J. 1996. Wind speed effects on sea surface emission and reflection for the along track scanning radiometer. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 13: 126-141.
- WU, X., y SMITH, W.L. 1997. Emissivity of rough sea surface for 8-13 mm: modelling and verification. *Applied Optics*. 36: 2609-2619.