

Efecto de la temperatura de la superficie del mar en la determinación de la salinidad

R. Niclòs, V. Caselles, C. Coll y E. Valor

Correo electrónico: Raquel.Niclos@uv.es

Departament de Termodinàmica. Facultat de Física. Universitat de València. 46100 Burjassot

RESUMEN

La determinación de la salinidad del mar, uno de los dos objetivos básicos de la Misión SMOS (*Soil Moisture and Ocean Salinity*) de la Agencia Espacial Europea, requiere una precisión de $\pm 0,1$ psu. En este estudio, analizamos las ecuaciones que relacionan la salinidad con la temperatura termométrica a través de la emisividad en banda L, concluyendo que la precisión mínima con que debemos determinar la temperatura de la superficie del mar es de $\pm 0,3$ K para obtener la salinidad con la precisión requerida.

PALABRAS CLAVE: temperatura de la superficie del mar, salinidad, emisividad en banda L, misión SMOS.

ABSTRACT

Sea Salinity determination, basic objective of the SMOS (*Soil Moisture and Ocean Salinity*) Mission of the European Space Agency, requires a precision of ± 0.1 psu. In this study, the equations that connect the salinity with the thermometric temperature through the L-band emissivity are analysed, concluding that we must determine the sea surface temperature with a precision of ± 0.3 K to obtain the salinity with the required precision.

KEY WORDS: sea surface temperature, salinity, L-band emissivity, SMOS mission.

INTRODUCCIÓN

La obtención de la salinidad del mar, junto con la humedad del suelo, es una de las metas de la Misión SMOS (*Soil Moisture and Ocean Salinity*), que constituye una de las dos *Earth Explorer Missions* de la Agencia Espacial Europea (ESA).

La importancia de la determinación de la salinidad radica en el valor que tiene el conocimiento de la distribución global de sal en el océano, y su variabilidad anual e interanual, para entender el papel del océano en el sistema climático.

Para determinar dicha magnitud mediante teledetección, tendremos en cuenta que la emisividad de la superficie del mar en microondas es función de la salinidad y la temperatura, y de la velocidad del viento superficial como parámetro secundario, y, además, que la mejor sensibilidad a la salinidad oceánica se obtiene a 1,4 GHz, en banda L.

Por tanto, la salinidad se puede obtener a partir de la emisividad de la superficie del mar, que en banda L se relaciona de forma directa con la temperatura de brillo y la temperatura termométrica. En defini-

tiva tenemos tres magnitudes conectadas: la temperatura de brillo medida en banda L, la salinidad y la temperatura termométrica.

La resolución necesaria para cumplir con el objetivo fijado por la misión SMOS respecto a la determinación de la salinidad, en base a los datos radiométricos en banda L, fue fijada por el GODAE (*Global Ocean Data Assimilation Experiment*) como de $\pm 0,1$ psu. Esto supone conocer la temperatura de la superficie del mar con elevada precisión como requisito de partida, y para ello se planteó la necesidad del uso de un sensor secundario, el cual determinara con precisión dicha temperatura superficial (Martín-Neira et al, 2000).

Esta premisa se tuvo presente en las campañas WISE (*Wind and Salinity Experiment*) 2000 y WISE 2001, desarrolladas dentro de la Misión SMOS con el objetivo de obtener una base experimental que permitiera mejorar las formulaciones existentes del efecto del estado del mar sobre la emisión en banda L. Los experimentos consistieron en la realización de medidas con un radiómetro polarimétrico en banda L, acompañadas de la determinación de distintas variables ambienta-

les (Camps et al, 2002), entre las que se encontraba la temperatura de la superficie del mar, que obtuvimos con el uso de un radiómetro con bandas en la región del infrarrojo térmico (Niclòs et al, 2002).

En el presente trabajo, introducimos las ecuaciones que relacionan la salinidad con la temperatura de brillo en banda L y la temperatura termométrica de la superficie del mar, a la vez que analizamos el efecto de la temperatura termométrica sobre la precisión en la determinación de la salinidad. Así, en este estudio previo a las campañas WISE, determinamos cual es la precisión requerida en la temperatura de la superficie del mar para posibilitar la determinación de la salinidad con una precisión de $\pm 0,1$ psu.

LA EMISIVIDAD DE LA SUPERFICIE DEL MAR EN BANDA L

Con el uso de microondas pasivas en banda L se puede medir la salinidad de la superficie del mar. En esta banda, se obtiene un máximo en la sensibilidad de las temperaturas de brillo a la salinidad, tanto en polarización horizontal y vertical, y la atmósfera resulta prácticamente transparente (Lagerloef et al, 1995). La banda L, en el intervalo de frecuencia de 1,400 a 1,427 GHz, es la seleccionada tradicionalmente para la medida de la salinidad (Swift y McIntosh, 1983), ya que resulta ser una banda protegida por la FCC (*Federal Communications Commission*), evitando la aparición de ruido en la medida.

La intensidad de la radiación emitida por un cuerpo en microondas es proporcional a su temperatura, ya que la baja frecuencia en este intervalo espectral permite simplificar la ley de Planck a través de la aproximación de Rayleigh-Jeans, resultando:

$$E(\nu, Tb) = \frac{2\pi K\nu^2}{c^2} Tb \quad (1)$$

donde K es la constante de Boltzman, $1,38 \cdot 10^{-23}$ W s / K; c la velocidad de la luz, $3 \cdot 10^8$ m/s; y n la frecuencia de la radiación emitida por un cuerpo negro a la temperatura Tb .

Por tanto, podemos considerar en primera aproximación la relación directa entre la temperatura de brillo y la temperatura termométrica a través de la emisividad, de la forma:

$$Tb_{H, V}(\theta, T, S) = \epsilon_{H, V}(\theta, T, S) T \quad (2)$$

donde Tb_H y Tb_V son las temperaturas de brillo en polarización horizontal y vertical, respectivamente; θ es el ángulo de observación; S es la salinidad; y T es la temperatura termométrica de la superficie del mar. Para simplificar el análisis, dejamos de lado la posible influencia sobre la temperatura de brillo en banda L de otras magnitudes secundarias, como el viento superficial, por ejemplo.

Si suponemos que la superficie oceánica está en equilibrio térmico, de forma que la emisividad es igual a la absorptividad, y además aceptamos que el mar se comporta como una superficie plana, tenemos que la emisividad se define simplemente como:

$$\epsilon_{H, V}(\theta, T, S) = 1 - \rho_{H, V}(\theta, T, S) \quad (3)$$

donde son los coeficientes de reflexión de Fresnel, de forma que las emisividades en ambas polarizaciones vienen dadas por:

$$\epsilon_H(\theta, T, S) = 1 - \frac{\cos\theta - \sqrt{e(T, S)}}{\cos\theta + \sqrt{e(T, S)}} \quad (4.a)$$

$$\epsilon_V(\theta, T, S) = 1 - \frac{e(T, S)\cos\theta - \sqrt{e(T, S)}}{e(T, S)\cos\theta + \sqrt{e(T, S)}} \quad (4.b)$$

donde $e(T, S)$ es la constante dieléctrica compleja de la superficie del mar, dada por la ecuación de Debye como:

$$\epsilon(T, S) = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_0(T, S) - \epsilon_\infty}{1 + j2\pi\nu\tau(T, S)} - j \frac{\sigma(T, S)}{2\pi\nu} \quad (5)$$

que separada en parte real, e' , e imaginaria, e'' , resulta ser:

$$e'(T, S) = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_0(T, S) - \epsilon_\infty}{1 + [2\pi\nu\tau(T, S)]^2} \quad (6.a)$$

$$e''(T, S) = \frac{2\pi\nu\tau[\epsilon_0(T, S) - \epsilon_\infty]}{1 + [2\pi\nu\tau(T, S)]^2} + \frac{\sigma(T, S)}{2\pi\nu} \quad (6.b)$$

donde ϵ_∞ es el límite de elevada frecuencia de la constante dieléctrica y toma un valor adimensional de 4,9; n es la frecuencia en Hz; $\epsilon_0(T, S)$ es la constante dieléctrica estática; $\tau(T, S)$ es el tiempo de relajación (s); $\sigma(T, S)$ es la conductividad iónica de la solución salina (S/m); y p es

la permitividad del espacio libre, con un valor de $8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m.

La relación de $\epsilon_0(T,S)$, $\tau(T,S)$ y $\sigma(T,S)$ con la temperatura termométrica, T , y la salinidad, S , fue deducida por Klein y Swift (1977) en base a medidas experimentales. Existe otro modelo que trata esta relación (Ellison et al, 1998) pero se consigue mejor ajuste a partir del modelo de Klein y Swift (1977) para la banda L, ya que el primero es únicamente una extrapolación desde la región de 6 – 89 GHz, frecuencias para las que se realizaron medidas experimentales. Klein y Swift (1977) nos proporcionaron las expresiones que relacionan la constante dieléctrica con la salinidad y la temperatura de la superficie para las bandas L ($\nu = 1,43$ GHz) y S ($\nu = 2,65$ GHz):

$$\epsilon_0(T,S) = \epsilon_0(T,0) A(T,S) \quad (7.a)$$

$$\epsilon_0(T,0) = 87,134 - 1,949 \cdot 10^{-1} T - 1,276 \cdot 10^{-2} T^2 + 2,491 \cdot 10^{-4} T^3 \quad (7.b)$$

$$A(T,S) = 1,0 + 1,613 \cdot 10^{-5} T S - 3,656 \cdot 10^{-3} S + 3,210 \cdot 10^{-5} S^2 - 4,232 \cdot 10^{-7} S^3 \quad (7.c)$$

$$\tau(T,S) = \tau(T,0) B(T,S) \quad (8.a)$$

$$\tau(T,0) = (1,1109 \cdot 10^{-10} - 3,824 \cdot 10^{-12} T + 6,938 \cdot 10^{-14} T^2 - 5,096 \cdot 10^{-16} T^3) / 2\pi \quad (8.b)$$

$$B(T,S) = 1,0 + 2,282 \cdot 10^{-5} T S - 7,638 \cdot 10^{-4} S - 7,760 \cdot 10^{-6} S^2 + 1,105 \cdot 10^{-8} S^3 \quad (8.c)$$

$$\sigma(T,S) = \sigma(25,S) e^{-\phi} \quad (9.a)$$

$$\sigma(25,S) = S (0,18252 - 1,4619 \cdot 10^{-3} S + 2,093 \cdot 10^{-5} S^2 - 1,282 \cdot 10^{-7} S^3) \quad (9.b)$$

$$\phi = \Delta (2,033 \cdot 10^{-2} + 1,266 \cdot 10^{-4} \Delta + 2,464 \cdot 10^{-6} \Delta^2 - S (1,849 \cdot 10^{-5} - 2,551 \cdot 10^{-7} \Delta + 2,551 \cdot 10^{-8} \Delta^2)) \quad (9.c)$$

donde $\epsilon_0(T,0)$ y $\tau(T,0)$ son la constante dieléctrica estática y el tiempo de relajación para agua pura, siendo $S = 0$ psu; $\sigma(25,S)$ es la conductividad iónica de la solución salina para una temperatura de 25°C; $\Delta = 25 - T$; y la salinidad, S , y la temperatura termométrica, T , vienen expresadas en psu y °C, respectivamente.

La Figura 1 presenta los resultados de aplicar este modelo en el cálculo de la temperatura de brillo en banda L, considerando observación nadir, para la cual se obtiene idéntico valor en ambas polarizaciones.

De esta manera, ya disponemos de las ecuaciones necesarias para obtener la salinidad a través de la medida de la temperatura de brillo en banda L y la determinación de la temperatura termométrica en el térmico.

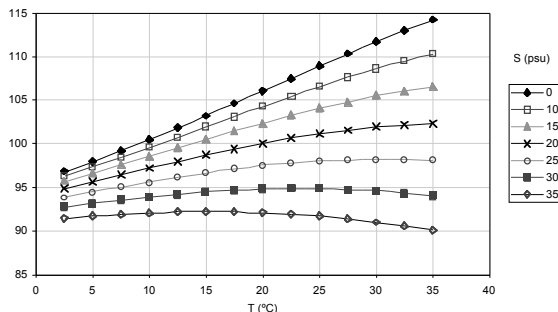


Figura 1. Temperatura de brillo de la superficie del mar en banda L, con ángulo de observación nadir, en función de la temperatura oceánica y para diferentes valores de la salinidad. El cálculo de la temperatura de brillo considera el modelo de Klein y Swift (1977) para la constante dieléctrica del agua del mar.

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

En este punto, nos disponemos a analizar la precisión requerida en nuestra medida de la temperatura termométrica, sabiendo que los estudios climatológicos, meteorológicos y oceanográficos requieren la determinación de la salinidad con una precisión de $\pm 0,1$ psu.

Con el objetivo de examinar el efecto de la temperatura termométrica sobre la salinidad, optimizamos la temperatura de brillo, es decir, hacemos que $dTb = (\partial Tb / \partial S)_T dS + (\partial Tb / \partial S)_S dT = 0$. De esta manera, determinamos dS / dT a través del resultado de derivar las ecuaciones de ajuste de la Tb en función de T para un valor de S fijo y de la Tb en función de S para una T constante, donde el cálculo de la temperatura de brillo se realiza en todo caso a partir de las ecuaciones (2) a (6) y con el uso del modelo de Klein y Swift (1977) para la constante dieléctrica. En la Figura 2 se muestra dS / dT en función de la temperatura termométrica de la superficie del mar, considerando como partida un ángulo de observación de 0° para el cual se obtiene igual temperatura de brillo en ambas polarizaciones. De su observación se deduce la gran dependencia térmica de la salinidad para valores de temperatura extremos, comprobando la necesidad de la medida de la temperatura termométrica de forma precisa y exacta. Si

para estos casos calculamos el error de la temperatura, como el producto del módulo de la parcial de ésta respecto de la salinidad por el error de salinidad requerido, obtenemos valores mínimos de $\pm 0,3$ K para una precisión en la salinidad de $\pm 0,1$ psu.

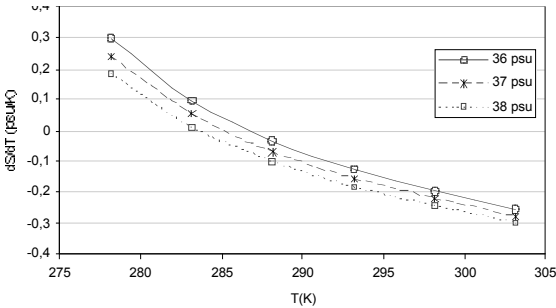


Figura 2. Dependencia de la salinidad con la temperatura termométrica de la superficie en función de la dicha temperatura termométrica, donde se considera el caso de observación nadir y valores de salinidad habituales durante las campañas WISE.

Si realizamos el mismo proceso matemático para las temperaturas de brillo provenientes de considerar un ángulo de observación no nulo, los resultados obtenidos para ambas polarizaciones son diferentes. Tomando ángulos de 0° , 25° y 55° , comprobamos que para temperaturas bajas, próximas a cero grados Celsius, tenemos:

$$\left| \frac{dS}{dT} \right|_{V,55^\circ} > \left| \frac{dS}{dT} \right|_{V,25^\circ} > \left| \frac{dS}{dT} \right|_{V=H,0^\circ} > \left| \frac{dS}{dT} \right|_{H,25^\circ} > \left| \frac{dS}{dT} \right|_{H,55^\circ}$$

de forma que el posible error en la temperatura termométrica:

$$E(T)_{V,55^\circ} < E(T)_{V,25^\circ} < E(T)_{V=H,0^\circ} < E(T)_{H,25^\circ} < E(T)_{H,55^\circ}$$

mientras que para temperaturas más elevadas, sobre los 30°C , estas relaciones son a la inversa.

La Figura 3 muestra los valores resultantes de considerar una salinidad de 36 psu y temperaturas de 278,15 K y 301,15 K para ángulos de observación de 0° , 25° y 55° , obteniéndose gráficos similares para valores de salinidad diferentes. En (a) se observa la dependencia de la salinidad con la temperatura termométrica y en (b) se estudia el error en la temperatura termométrica que conllevaría la obtención de la salinidad con una precisión de $\pm 0,1$ psu.

La salinidad, para el intervalo angular entre 0° y 55° , ofrece una variación respecto de la temperatura entre $0,2$ psu / K y $0,5$ psu / K, en valor absoluto, lo que comporta la necesidad de medir la temperatura termométrica con errores de $\pm 0,2$ K a \pm

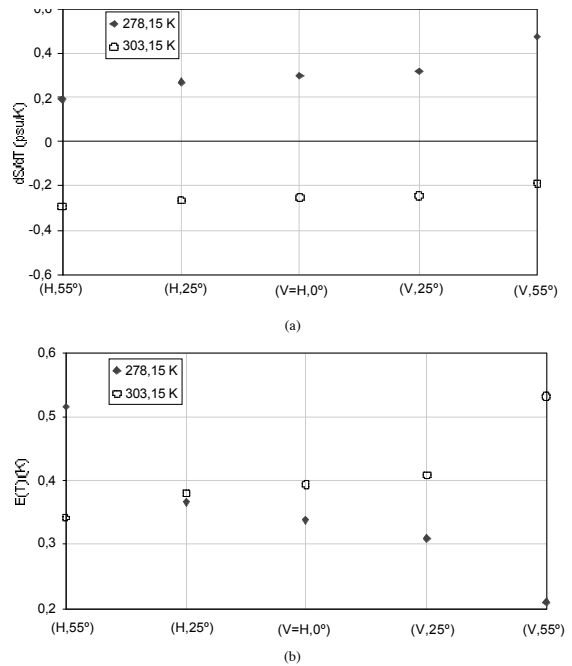


Figura 3. (a) Dependencia de la salinidad con la temperatura termométrica; y (b) error en la temperatura termométrica que conllevaría la obtención de la salinidad con una precisión en la salinidad de $\pm 0,1$ psu. Valores resultantes de considerar una salinidad de 36 psu y temperaturas de 278,15 K y 301,15 K para ángulos de observación de 0° , 25° y 55° , denotados mediante el par (polarización H o V, ángulo de observación).

$0,5$ K para la determinación de la salinidad dentro de una precisión de $\pm 0,1$ psu.

En cualquier caso, una estimación de la precisión requerida en la temperatura termométrica puede tomarse como la resultante de un término $\left| \frac{dS}{dT} \right| = 0,3$

psu / K medio para los valores mostrados en la Figura 3.a. Esta precisión media es de $\pm 0,3$ K, aunque el mínimo error se obtendrá para ángulos de observación mayores a 55° y bajas temperaturas de la superficie del mar, siendo éste menor a $\pm 0,2$ K.

En este sentido, Niclòs et al (2002) han comprobado que esta precisión es posible en base a las medidas realizadas durante las campañas WISE 2000 y WISE 2001, donde se usó un radiómetro multispectral trabajando dentro de la región espectral del infrarrojo térmico. Desarrollando una metodología de medida radiométrica y procesado posterior, se alcanzó una precisión de $\pm 0,13$ K en la temperatura termométrica de la superficie del mar. Como ejemplo de ello, la Figura 4 muestra un detalle de la comparación realizada entre la temperatura de la superficie del mar

obtenida mediante esta metodología, T_m , con sus correspondientes barras de error, y la temperatura del mar medida por boyas oceanográficas, T_{boya} . La diferencia promedio encontrada entre ambas temperaturas para el conjunto de datos tomados durante las campañas WISE fue de $0,0 \pm 0,2$ K, confirmando la exactitud de la metodología propuesta, y las posibles discrepancias entre ellas se deben a la diferente profundidad de toma de datos entre el radiómetro (de unos pocos micrómetros) y el termómetro de contacto usado en las boyas (de 20 cm), observándose el efecto del ciclo diario, ya que $T_{boya} < T_m$ alrededor del mediodía solar, mientras que $T_{boya} > T_m$ durante la noche y primeras horas de la mañana.

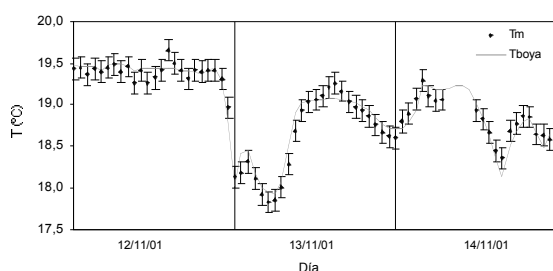


Figura 4. Detalle de la comparación entre la temperatura del mar registrada por boyas oceanográficas, T_{boya} , y la determinada mediante la metodología propuesta por Niclòs et al (2002) a partir de los datos radiométricos tomados durante las campañas WISE, T_m .

CONCLUSIONES

La intención de determinar la salinidad con una precisión de $\pm 0,1$ psu, requerimiento impuesto por la Misión SMOS de la Agencia Espacial Europea, nos plantea un nuevo reto en la medida de la temperatura de la superficie del mar en cuanto a precisión y exactitud.

En este trabajo se analizan las ecuaciones que relacionan la salinidad con la temperatura de brillo en banda L y la temperatura termométrica de la superficie del mar, calculando la constante dieléctrica compleja de la superficie del mar con el modelo de Klein y Swift (1977).

El resultado del estudio demuestra que la precisión mínima requerida en la temperatura termométrica de la superficie del mar, que posibilite una precisión en la salinidad de $\pm 0,1$ psu, es de $\pm 0,3$ K. Niclòs et al (2002) han comprobado que esta precisión es posible en base a las medidas realizadas durante las campañas WISE 2000 y WISE 2001,

obteniendo finalmente un error en la temperatura termométrica de $\pm 0,13$ K.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su gratitud a la Agencia Espacial Europea, por la financiación proporcionada a las campañas WISE 2000 y WISE 2001 dentro de las cuales se enmarca el estudio aquí presentado (ESTEC Contrato No. 14188/00/NL/DC), al Ministerio de Ciencia y Tecnología a través del proyecto REN2001-3116/CLI, y a la Comisión Europea (Fondos FEDER).

REFERENCIAS

- CAMPS, A., FONT, J., ETCHETO, J., RUBIO, E., WEILL, A., CORBELLA, I., VALL-LLOSSERA, M., DUFFO, N., TORRES, F., VILLARINO, R., ENRIQUE, L., JULIÀ, A., GABARRÓ, C., BOUTIN, J., CASELLES, V., REISING, S.C., WURSTEISEN, P., y MARTÍN-NEIRA, M. 2002. Sea Surface Emissivity Observations at L-band: First Results of the Wind and Salinity Experiment WISE-2000. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. (en prensa).
- ELLISON, W., BALANA, A., DELBOS, G., LAMKAOUCHI, K., EYMARD, L., GUILLOU, C., y PRIGENT, C. 1998. New permittivity measurements of sea water. *Radio Science*. 33: 639-648.
- KLEIN, L. A. y SWIFT, C.T. 1977. An improved model for the dielectric constant of sea water at microwave frequencies. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1: 104-111.
- LAGERLOEF, G., SWIFT, C.T., y LE VINE, D.M. 1995. Sea surface salinity: The next remote sensing challenge. *Oceanography*. 8: 44-50.
- MARTÍN-NEIRA, M., FONT, J., SROKOZ, M., CORBELLA, L., y CAMPS, A. 2000. Ocean salinity observations with SMOS Mission. *Proceedings IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS 2000*, Hawaii, Jul. 24-28. paper 00.1394_TH07.1120.
- NICLÒS, R., CASELLES, V., RUBIO, E., COLL, C. y VALOR, E. 2002. High-accuracy sea surface temperature retrieval. *Journal of Applied Meteorology* (enviado).
- SWIFT, C. T. y MCINTOSH, R. E. 1983. Considerations for microwave remote sensing of ocean surface salinity. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 21: 480-491.

NOTICIAS

Socios numerarios y correspondientes estudiantes

El artículo 15º de los estatutos de la Asociación Española de Teledetección (A.E.T.) contempla la posibilidad de que los socios numerarios (residentes en territorio español) y correspondientes (no residentes en territorio español), estudiantes de Facultades, Escuelas Técnicas y Universitarias, gocen de un 50% de bonificación en sus cuotas.

Animamos a todos los estudiantes, con interés en conocer las investigaciones y técnicas de teledetección, para que se integren como socios de la Asociación Española de Teledetección (A.E.T.) por una cuota anual de 18 euros.