

La misión SMOS de la ESA medirá a partir de 2007 la salinidad superficial del océano

J. Font* y A. Camps**
jfont@icm.csic.es, camps@tsc.upc.edu

* *Institut de ciències del Mar (CMIMA/CSIC). Barcelona*

** *Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). Dpto. de Teoria del Senyal i Comunicacions. Barcelona*

RESUMEN

La misión SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity, Humedad del Suelo y Salinidad de los Océanos) de la Agencia Espacial Europea tiene el objetivo de obtener mapas globales de ambas variables desde el espacio para estudios climáticos y de gran escala. Usa un radiómetro interferométrico en la banda L de microondas (MIRAS) para medir la temperatura de brillo (T_b) emitida por la superficie terrestre, y a partir de ella calcula las dos variables geofísicas. La salinidad se obtiene mediante un proceso complejo de los datos radiométricos que requiere información sobre otros parámetros ambientales como temperatura y rugosidad de la superficie del mar.

PALABRAS CLAVE: salinidad, circulación oceánica global, radiometría interferométrica, microondas, ESA.

ABSTRACT

The European Space Agency SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) mission aims at obtaining global maps of both variables from space for large scale and climatic studies. It uses an L-band microwave interferometric radiometer with aperture synthesis (MIRAS) to measure the brightness temperature (T_b) emitted by the Earth's surface and then computes from it the two geophysical parameters. The retrieval of salinity is a complex process that requires the knowledge of other environmental information, as sea surface temperature and roughness, and an accurate processing of the radiometer measurements.

KEY WORDS: salinity, global ocean circulation, interferometric radiometry, microwaves, ESA.

INTRODUCCIÓN

La humedad del suelo y la salinidad superficial de los océanos son variables claves para describir el ciclo del agua en nuestro planeta y entender su relación con la circulación oceánica y la variabilidad del clima a distintas escalas temporales. Aunque ambas son usadas en modelos de predicción atmosféricos, oceanográficos e hidrológicos, hasta ahora no ha sido posible medirlas de forma global y con una resolución y cobertura adecuadas. El motivo es que, a pesar de que las medidas in situ son escasas, especialmente en extensas regiones remotas, no se había intentado ninguna misión espacial para obtenerlas a causa de su complejidad tecnológica. La misión SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity, Humedad del Suelo y Salinidad de los Océanos), la segunda de las misiones de oportunidad de exploración de la Tierra de la Agencia Espacial Europea, pretende llenar por primera vez

este hueco mediante un satélite capaz de proporcionar esta información de forma global, frecuente y sistemática (Silvestrin *et al.*, 2001). En el caso de la salinidad será un complemento ideal de los perfiles verticales, con baja resolución horizontal, obtenidos mediante el sistema ARGO de flotadores derivantes que se está actualmente desplegando y espera llegar a cubrir todos los océanos del mundo con unos 3000 elementos a partir de 2007. Hay que tener en cuenta que sólo hace una década en el 30% de la superficie oceánica del planeta (considerando una retícula de $1^\circ \times 1^\circ$) no se había jamás tomado una sola medida de salinidad (Lagerloef *et al.*, 2005).

La posibilidad de medir tanto salinidad del mar como humedad del suelo desde el espacio, y por tanto ser útil tanto si el satélite está sobrevolando los océanos como los continentes, es debida a que ambas variables están relacionadas con las propiedades eléctricas del medio (Swift y McIntosh,

La misión SMOS de la ESA medirá a partir de 2007 la salinidad superficial del océano

1983). La forma más efectiva de obtener salinidad y humedad es por medio de sistemas radiométricos que operen en la banda L de las microondas (longitud de onda = 21 cm, 1.4 GHz). Midiendo la temperatura de brillo (T_b) se obtiene información sobre la emisividad de la superficie, que depende explícitamente de la humedad y de la salinidad del medio emisor.

Colocar en un satélite una antena que capte radiación a esta frecuencia con la resolución necesaria implica un problema tecnológico enorme por las grandes dimensiones que debería tener. Gracias al desarrollo reciente de la llamada radiometría interferométrica por síntesis de apertura es posible conseguir las mismas prestaciones con un instrumento de menor tamaño. La radiometría por síntesis de apertura está inspirada en el concepto de radioastronomía mediante interferometría de gran línea de base (VLA, very large baseline antenna). La idea consiste en colocar en una estructura desplegable un conjunto de pequeños receptores (69 en el caso de SMOS), para después reconstruir la temperatura de brillo de la escena con una resolución comparable a la de una antena de radio cuyo tamaño fuese igual a la separación entre los receptores más alejados. Esta idea fue propuesta inicialmente por D. M. LeVine (NASA Goddard) en los años 80 con el proyecto ESTAR (Electrically Steered Thinned Array Radiometer) y validado con un sistema aerotransportado desarrollado en la Universidad de Massachusetts en Amherst. Este sistema obtenía resolución angular en una dirección mediante apertura real (antenas tipo bastón), y en la otra dirección mediante síntesis de apertura. En Europa, un concepto mejorado del mismo fue estudiado por la Agencia Espacial Europea (Martín-Neira y Goutoule, 1997). El radiómetro interferométrico MIRAS (Microwave Interferometric Radiometer by Aperture Synthesis) permite medir T_b con muchos ángulos de incidencia y en dos polarizaciones (vertical y horizontal, o paralela y perpendicular al plano de incidencia). Además, el instrumento mide una escena completa en sólo 1.2 s, lo que corresponde a un emborronamiento de la imagen de unos 8 km, aproximadamente un 25% del tamaño de píxel. A medida que el satélite avanza, cada píxel se ve bajo diferentes ángulos de incidencia en cada una de las sucesivas imágenes (medidas independientes), lo que permite recuperar parámetros de la superficie con mucha mayor precisión (Camps y Swift, 2002).



*Figura 1. Visión artística del satélite SMOS, con los tres brazos desplegados en forma de Y que contienen los 69 elementos de la antena del radiómetro interferométrico (realizada por ESA Medialab).

Con esta perspectiva SMOS fue propuesta por un amplio grupo de científicos y tecnólogos europeos a la primera convocatoria de misiones de oportunidad de exploración de la Tierra de la ESA en 1998. Es una misión con unos objetivos científicos amplios y ambiciosos, a la vez que puede considerarse como un demostrador para allanar el camino de futuros sistemas que utilicen estas mismas técnicas. Una vez seleccionada SMOS la preparación se inició en 2000, con una contribución económica, científica e industrial adicional específica por parte de Francia y España, y está previsto que el satélite se lance en septiembre de 2007. SMOS es la primera misión espacial europea con liderazgo español, ya que a la co-responsabilidad científica (J. Font, investigador principal para salinidad) se une el papel de contratista principal para la construcción del radiómetro (EADS CASA) y el hecho que el centro de producción de datos vaya a establecerse en la estación espacial de Villafranca del Castillo (Madrid), además del fuerte protagonismo mantenido por la Universitat Politècnica de Catalunya en el desarrollo del concepto y caracterización del instrumento (Camps, 1996).

SALINIDAD DESDE EL ESPACIO

El conocimiento de la distribución de sal en los océanos y su variabilidad anual e interanual es crucial para entender el papel del océano en el sistema climático. La circulación oceánica está fundamental-

Todas las figuras precedidas de asterisco se incluyen en el cuadernillo anexo de color

mente condicionada por los flujos de cantidad de movimiento y calor a través de la interfase atmósfera-oceano, pero la salinidad es también fundamental para determinar la densidad oceánica, y por tanto la circulación termohalina. En algunas regiones, como el Ártico, la salinidad es la variable más importante en esta determinación, y controla procesos como la formación de agua profunda, un componente esencial en la circulación termohalina de océano.

Los sistemas de predicción estacional, que incluyen modelos acoplados océano-atmósfera, utilizan observaciones superficiales y subsuperficiales de temperatura como condiciones iniciales, pero para la salinidad no pueden usar más que relajaciones a valores climatológicos al no disponer de medidas realistas. Esta situación empieza a mejorar en los últimos años con el despliegue progresivo del sistema ARGO de flotadores derivantes (iniciativa internacional propuesta durante el WOCE, World Ocean Circulation Experiment, 1990-1997, componente del WCRP, World Climate Research Programme) que proporcionan perfiles verticales de salinidad hasta 5 m por debajo del nivel del mar. Actualmente los modelos asimilan únicamente temperatura y/o nivel del mar obtenido mediante altimetría. La ausencia de un tratamiento específico de la salinidad puede acarrear errores significativos en un modelo oceánico, como por ejemplo ignorar diferencias de más de 5 centímetros dinámicos en la topografía superficial asociadas a variaciones interanuales de la salinidad (Maes *et al.*, 2000).

El problema puede reducirse mediante correcciones en los valores de salinidad basados en propiedades de conservación de las relaciones temperatura-salinidad, por ejemplo estimando perfiles de salinidad a partir de perfiles de temperatura, alturas altimétricas y salinidad superficial, utilizando funciones ortogonales empíricas. En general las relaciones temperatura-salinidad no se conservan en la capa superficial de mezcla, a causa de los diferentes efectos de los flujos de calor y agua a través de la superficie. Por lo tanto son necesarias medidas de salinidad superficial para reducir el error en estos perfiles estimados. En caso contrario, todos los intentos de inicializar modelos de predicción climática con datos altimétricos serán erróneos y darán predicciones degradadas.

La influencia de estos factores es especialmente relevante en el Pacífico ecuatorial occidental, donde hay una fuerte señal de salinidad en la capa superficial relacionada con el mecanismo de El Niño – Oscilación del sur, ENSO.

En 1998 un grupo internacional de expertos (Salinity and Sea Ice Working Group) definió los siguientes objetivos para la observación de salinidad desde el espacio:

- Mejora de las predicciones climáticas a escalas de estacional a interanual. Esto implica el uso de datos de salinidad oceánica para inicializar y mejorar los modelos acoplados, y para estudiar el papel de los flujos de agua dulce en la formación de capas de barrera y balance de calor en la capa de mezcla tropical.
- Mejora de las estimaciones de pluviosidad sobre el océano, y por lo tanto de los balances hidrológicos globales. Midiendo las variaciones de salinidad superficial, juntamente con campos de velocidades y modelos adecuados de la capa de mezcla, se podrán reducir las incertidumbres en los cálculos de flujos de agua dulce a escalas temporales climáticas.
- Seguimiento de fenómenos de gran escala ligados a la salinidad. Esto incluye fusión de hielos, descargas potentes de ríos o efectos de los monzones. En particular, el seguimiento de las variaciones interanuales de salinidad en el Ártico y mares adyacentes es vital para las predicciones climáticas a largo plazo.
- Mejora del seguimiento de la variabilidad de la salinidad superficial para comprender y caracterizar mejor la distribución de los parámetros biogeoquímicos en la superficie del océano.

El objetivo de la misión SMOS es proporcionar una cobertura global del campo de salinidad superficial oceánica generando mapas de dicha variable a un ritmo, resolución espacial y con una precisión adecuados para estudios de tipo oceanográfico, climatológico e hidrológico.

DETERMINACIÓN DE SALINIDAD SUPERFICIAL CON SMOS

La medida de la salinidad superficial es uno de los desafíos principales para SMOS y para la observación remota del océano en el futuro próximo (Font *et al.*, 2004). Debido a la baja sensibilidad radiométrica (de 0.75 K a 0.25 K por psu, dependiendo de la temperatura física del mar), y la baja resolución espacial obtenible con un radiómetro interferométrico desde el espacio, no es de esperar que con SMOS puedan realizarse estudios regionales o de mesoescala. Sin embargo, varios fenómenos muy importantes desde el

La misión SMOS de la ESA medirá a partir de 2007 la salinidad superficial del océano

punto de vista climático o de gran escala pueden beneficiarse de esta tecnología: efectos de la capa de barrera en los flujos de calor del Pacífico tropical, ajuste halostérico del almacenamiento de calor a partir del nivel del mar, circulación termohalina en el Atlántico Norte, balance de flujos de agua dulce en la superficie, etc. Todos ellos requieren alcanzar una precisión en salinidad de 0.1-0.4 psu en 100-300 km y 10-30 días.

El Global Ocean Data Assimilation Experiment (GODAE), experimento propuesto por el Ocean Observations Panel for Climate, pretende demostrar la factibilidad y practicidad de los sistemas de modelización y asimilación globales del océano en tiempo real. Considerando la naturaleza exploratoria de SMOS, los requisitos de GODAE para salinidad en mar abierto (0.1 psu en promedios de intervalos de 10 días en cajas de 200 km x 200 km) representan una meta científica válida para la misión, aunque implican un desafío técnico considerable. Los errores en reconstrucción de la imagen (determinación de T_b en el campo de visión a partir de las medidas efectuadas por cada uno de los 69 receptores), actualmente no suficientemente conocidos, sus características de correlación, y la estabilidad de la calibración, implican una incertidumbre sobre la capacidad de SMOS de cumplir con estos requisitos, especialmente en latitudes elevadas (océanos fríos). Estos problemas se están analizando continuamente en los distintos aspectos y fases del desarrollo de la misión, utilizando demostradores del instrumento y un simulador numérico del sistema completo (Corbella et al, 2003). Actualmente se prevé que SMOS podrá proporcionar una precisión radiométrica no mejor de 1 K y una sensibilidad (desviación cuadrática media) del orden de 5 K. Sería suficiente entonces promediar datos en períodos de 30 días o más para muchos estudios climáticos, y reducir así el ruido aleatorio de las medidas. La resolución en períodos de 10 días será menos precisa, pero puede ser utilizada en ciertas aplicaciones operacionales relacionadas con GODAE. Promedios mensuales sobre cajas de 100 km de lado darían datos comparables con las climatologías actuales (Levitus et al., 1994), pero con la dependencia temporal que éstas no tienen. Una precisión menor en salinidad, pero mayor resolución espacial o temporal (típicamente 0.5 psu, 50 km, 3 días) podría usarse para el seguimiento de frentes de Salinidad en evolución en varias regiones del océano mundial.

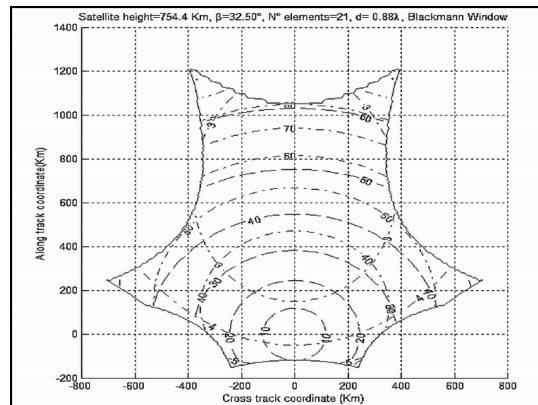


Figura 2. Campo de visión instantáneo de SMOS con los distintos ángulos de incidencia (0 a 65°), resolución espacial (32 a 100 km) y sensibilidad radiométrica (2.6 a 5 K) en función de la situación del píxel dentro de la imagen. La forma hexagonal irregular de la imagen reconstruida es debida a las réplicas del horizonte Tierra-cielo (fenómeno de *aliasing*) en la configuración elegida para el radiómetro (figura obtenida con el simulador de SMOS desarrollado por la UPC).

La rugosidad de la superficie del mar es la principal fuente de error geofísico en la determinación de la salinidad, ya que puede modificar la temperatura de brillo en varios Kelvin según el ángulo de incidencia (Yueh et al., 2001). Varios modelos teóricos y semi-empíricos consideran el efecto de la rugosidad parametrizada a través de la intensidad del viento u otras variables que pueden modificarla, y la validación y mejora de estos modelos son motivo de intensa investigación (Reul et al., 2006). Desde el año 2000 la ESA y los países participantes han financiado diversas campañas de campo, tanto aeroportadas como desde plataformas fijas, para analizar la emisión polarimétrica en banda L bajo ángulos de incidencia y azimut variables y en un rango amplio de estados de la mar, p.ej. WISE (Camps et al., 2004).

Otra misión espacial dedicada a la observación de la salinidad oceánica está prevista para ser lanzada en marzo de 2009. AQUARIUS-SAC/D, desarrollada por los Estados Unidos en cooperación con Argentina, llevará un radiómetro de apertura real en banda L más un radar difusómetro para corregir los efectos de la rugosidad superficial (Koblinsky et al., 2003). Se espera que pueda proporcionar datos con mejor precisión radiométrica pero peor cobertura espacial que SMOS. Existe una intensa colaboración entre ambas misiones, tanto en aspectos científicos como de calibración de los instrumentos, y se están planificando actividades conjuntas de validación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer el trabajo realizado por los miembros de todos los equipos científicos e industriales que han intervenido en estudios, desarrollos y campañas relacionados con SMOS. La participación española en SMOS ha sido posible gracias a la financiación del Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI) y el Programa Nacional del Espacio. Este artículo es una contribución al proyecto ESP2004-00671.

BIBLIOGRAFÍA

- CAMPS, A. 1996. *Application of interferometric radiometry to Earth observation*. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 328 pp.
- CAMPS, A. y SWIFT, C. T. 2002. New Techniques in Microwave Radiometry for Earth Remote Sensing, en *Review of Radio Science 1999-2002*, IEEE-Press and Wiley-Interscience, pp. 499-518.
- CAMPS, A., FONT, J., VALL-LLOSSERA, M. y 21 autores más. 2004. The WISE 2000 and 2001 field experiments in support of the SMOS mission: Sea surface L-band brightness temperature observations and their application to Sea Surface Salinity retrieval. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 42: 804-823.
- CORBELLA, I., CAMPS, A., ZAPATA, M., MARCOS, F., MARTÍNEZ, F., VALL-LLOSSERA, M., DUFFO, N. y BARÁ, J. 2003. End-to-end simulator of 2D interferometric radiometry. *Radio Sci.* 38: 8058.
- FONT, J., LAGERLOEF, G. S. E., LEVINE, D. M., CAMPS, A. y ZANIFÉ, O. Z. 2004. The determination of surface salinity with the European SMOS space mission. *IEEE T. Geosci. Rem.* 42: 2196-2205.
- KOBLINSKY, C. J. HILDEBRAND, P., LEVINE, D. M., PELLERANO, F., CHAO, Y., WILSON, W. YUEH, S. H. y LAGERLOEF, G. S. E. 2003. Sea surface salinity from space: Science goals and measurement approach. *Radio Sci.* 38: 8064.
- LAGERLOEF, G. S. E., SWIFT, C. T. y LEVINE, D. M. 1995. Sea surface salinity: the next remote sensing challenge. *Oceanogr.* 8: 44-50.
- LEVITUS, S., BURGETT, R., y BOYER, P. T. 1994. World Ocean Atlas 1994: Salinity. *NOAA NESDIS* 3.
- MAES, C., BEHRINGER, D., REYNOLDS, R. y JI, M. 2000. Retrospective analysis of the salinity variability in the western tropical Pacific Ocean using an indirect minimization approach. *J. Atmos. Oceanic Technol.* 17: 512-524.
- MARTÍN-NEIRA, M. y GOUTOULE, J. M. 1997. A Two-Dimensional Aperture-Synthesis Radiometer for Soil Moisture and Ocean Salinity Observations. *ESA Bulletin*, 92: 95-104.
- REUL, N. y 23 autores más. 2006. *Synergetic Aspects and Auxiliary Data Concepts for Sea Surface Salinity Measurements from Space*. ESA ESTEC Contract 18176/04/NL/CB, Final Report, 613 pp. ftp://ftp.estec.esa.nl/ftp/pub/vr/VRO/GS_Study_18176_FR.pdf
- SIVESTRIN, P., BERGER, M., KERR, Y. y FONT, J. 2001. ESA's Second Earth Explorer Opportunity Mission: The Soil Moisture and Ocean Salinity Mission. *IEEE Geosci. Remote Sens. Newsl.*, 118: 11-14.
- SWIFT, C. T. y MCINTOSH, R. E. 1983. Considerations for microwave remote sensing of ocean salinity. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 21: 480-481.
- YUEH, S. H., WEST, R., WILSON, W. J., LI, F. K., NJOKU, E. G. y RAHMAT-SAMII, Y. 2001. Error sources and feasibility for microwave remote sensing of ocean surface salinity. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 39: 1049-1060.