

La medida de la salinidad de los océanos con la misión SMOS de la ESA

A. Camps⁽¹⁾, M. Vall-llossera⁽¹⁾, R. Sabia⁽¹⁾, J. Font⁽²⁾, N. Reul⁽³⁾

⁽¹⁾ Universitat Politècnica de Catalunya, Campus Nord, mòdulo D4, E-08034 Barcelona, España, camps@tsc.upc.es, merce@tsc.upc.edu, roberto.sabia@tsc.upc.edu.

⁽²⁾ Institut de Ciències del Mar, CMIMA – CSIC, Passeig Marítim, 37-49, E-08003 Barcelona, España, jfont@icm.csic.es.

⁽³⁾ IFREMER Dépt. d'Océanographie Physique et Spatiale, Centre de Brest -BP 70, F-29280 Plouzané, Francia, Nicolas.Reul@ifremer.fr.

Resumen

Se describe brevemente la misión SMOS de la Agencia Europea del Espacio, los principios básicos de funcionamiento de su carga útil: el instrumento MIRAS, el cual será el primer radiómetro por síntesis de apertura para observación de la tierra, y el estado actual de las técnicas de recuperación de salinidad de la superficie de los océanos a partir de las temperaturas de brillo multi-angulares que la misión SMOS proporcionará, así como la precisión que se espera poder conseguir de las mismas. Asimismo, se presentarán los resultados de la recuperación de salinidad: a) en los dos modos de operación del instrumento (modo de doble polarización o modo completamente polarimétrico), y b) sin incluir restricciones en los parámetros auxiliares (velocidad del viento y temperatura superficial) o incluyendo restricciones y utilizando diferentes conjuntos parámetros auxiliares con diferentes resoluciones espaciales y temporales, así como el resultado del promediado espacio-temporal.

1. Introducción

Recientemente, los resultados de varios grupos de trabajo concluyen que nuevos progresos en la predicción del tiempo, la monitorización del clima y la predicción de desastres naturales dependen en estos momentos de la disponibilidad de información global y periódica de la humedad del suelo (Soil Moisture, SM) y de la Salinidad del Océano (Ocean Salinity, OS).

Hoy en día es bien conocido que sobre la tierra, los flujos de agua y energía en la interfaz entre el suelo y la atmósfera dependen fuertemente de la SM. La evaporación, la infiltración y la escorrentía están regulados por la SM en la superficie, mientras que en la zona de las raíces regula la cantidad de agua que es capaz de absorber la vegetación. Por lo tanto, la variación espacio-temporal de la SM aparece como una variable clave en el ciclo hidrológico (Fig. 1), y en consecuencia, en los modelos climáticos, de predicción del tiempo y de monitorización de la vegetación.



Figura 1: El ciclo hidrológico.

En el océano, la OS juega un papel importante, por ejemplo, en la zona subpolar del Atlántico Norte, donde intrusiones de agua de mar de baja salinidad influyen la circulación termohalina profunda y el transporte de calor meridional. Las variaciones de la salinidad también afectan la dinámica superficial en los océanos tropicales, donde la lluvia modifica la densidad de la capa superficial y los flujos de calor en la interfaz entre la superficie del océano y la atmósfera. Las variaciones espacial y temporal (anual e interanual) de la OS son, pues, un indicador del ciclo del agua e imponen las condiciones de contorno en los modelos que rigen el acoplamiento entre el océano y la atmósfera.

Aunque tanto la SM como la OS se utilizan habitualmente en los modelos atmosféricos, oceanográficos e hidrológicos, hoy en día no existe la capacidad de medir directa y globalmente estas dos variables claves. Como la realización de medidas *in situ* dista mucho de ser global, la única solución es la de una misión espacial dedicada utilizando radiómetros de microondas en banda L ($f=1400-1427$ MHz, $\lambda=21$ cm).

Sin embargo, en los radiómetros clásicos, la resolución espacial viene dada por el ancho de haz de la antena que, al ser escaneada, forma la imagen de temperatura de brillo. Por ello, para alcanzar la resolución espacial deseada (30-50 km) desde un satélite en órbita baja, las antenas requeridas tienen

unas dimensiones demasiado grandes, de aproximadamente unos 10 metros de diámetro.

Desde mediados de los años 80, diversas Agencias Espaciales han prestado una especial atención a los llamados radiómetros interferométricos por síntesis de apertura. Estos instrumentos ofrecen por primera vez un salto cuantitativo importante en resolución espacial para monitorizar la superficie terrestre a frecuencias bajas de microondas (banda L). En esta banda de frecuencias (1.4 GHz) existe la máxima sensibilidad de la temperatura de brillo tanto a la humedad del terreno, como a la salinidad del océano.

Durante los años 90, la Agencia Europea del Espacio (ESA) llevó a cabo una serie de estudios tecnológicos con vistas a desarrollar un radiómetro por síntesis de apertura bidimensional en banda L. A este proyecto se le llamó **MIRAS** (Microwave Imaging Radiometer by Aperture Synthesis). En Noviembre de 1998, la misión **SMOS** (Soil Moisture and Ocean Salinity) basada en el concepto derivado de los estudios del proyecto MIRAS, fue propuesto como respuesta a un anuncio de "Misiones de Oportunidad Earth Explorer" lanzado por la ESA [1]. En Mayo de 1999, después de un proceso de selección de 27 propuestas, la ESA aprobó en segundo lugar la misión SMOS para una fase A extendida, y en la actualidad se encuentra en fase C/D, contando por vez primera con un consorcio industrial liderado por una empresa española (EADS-CASA Espacio).

2. MIRAS, el primer radiómetro por síntesis de apertura en dos dimensiones: principios de funcionamiento

A diferencia de los radiómetros de apertura real, donde la medida de la potencia a la salida del detector, está directamente relacionada con la temperatura de antena en la dirección del máximo de radiación de la antena, en un radiómetro por síntesis de apertura se miden las correlaciones cruzadas complejas ($V(u, v) = V(x_2 - x_1/\lambda, y_2 - y_1/\lambda)$) entre cada par de señales captadas por las antenas de la agrupación, situadas sobre el plano XY en coordenadas (x_n, y_n) . En el caso ideal en el que los diagramas de radiación de las antenas ($t(\xi, \eta)$) y los receptores sean idénticos y que los efectos de decorrelación espacial sean despreciables, la imagen de la temperatura de brillo de la escena ($T_b(\xi, \eta)$) es formada en el dominio de cosenos directores $(\xi, \eta) = (\sin \theta \cos \phi, \sin \theta \sin \phi)$ por síntesis de Fourier:

$$V(u, v) \propto \frac{1}{2} \langle b_1(t) b_2^*(t) \rangle = \frac{1}{\Omega} F \left[\frac{T_b(\xi, \eta) - T_r}{\sqrt{1 - \xi^2 - \eta^2}} t(\xi, \eta) \right], \quad (1)$$

donde Ω es el ángulo sólido de las antenas y T_r es la temperatura de ruido de los receptores.

MIRAS consta de 69 antenas equiespaciadas una distancia $d=0.875 \lambda$, y dispuestas en tres brazos separados 120° (Fig. 2) [2]. Esta disposición de antenas produce un muestreo hexagonal de puntos (u, v) sobre el plano de frecuencias espaciales tales que, al obtener la imagen de temperatura de brillo por síntesis de Fourier, aparecen 6 réplicas (alias) de la misma. Al no respetarse el criterio de muestreo de Nyquist ($d=0.875 \lambda > 0.577 \lambda$), estas réplicas se solapan con la imagen original delimitando el campo de visión libre de alias (Fig. 3) [3].

En el **modo de doble polarización**, un conmutador situado entre las antenas y el receptor alterna entre las polarizaciones "Y" (alineada con el vector velocidad) y "X" (perpendicular a "Y", en el plano de la agrupación) de cada antena cada 1.2 s, obteniendo imágenes de temperatura de brillo en el campo de visión libre de alias (Fig. 4) en las polarizaciones "Y" y "X" de la antena. En el **modo polarimétrico** la secuencia de conmutación es más compleja, y al cabo de 2.4 s se consigue formar un conjunto de imágenes de temperatura de brillo en polarizaciones "Y", "X" y en polarización cruzada "YX" [4]. La ventaja de este segundo modo es que permite obtener las temperaturas de brillo sobre la superficie de la tierra sin las singularidades que aparecen en la transformación del marco de referencia de la antena a la Tierra en el modo de doble polarización. Sin embargo, al haber tenido que compartir el tiempo entre más medidas, éstas son algo más ruidosas.

La Fig. 3 muestra igualmente los círculos que corresponden a ángulo de incidencia constante. A medida que avanza el satélite, los píxeles de la parte superior de la imagen de temperatura de brillo que eran vistos bajo un ángulo de incidencia en torno a 60° , descienden en imágenes consecutivas por las líneas de ground-track constante, pasándose a ver bajo ángulos de incidencia menores. Así, para cada píxel se obtiene un conjunto de medidas a distintos ángulos de incidencia.

La Fig. 4 muestra esquemáticamente el concepto de este procesado multi-angular. Para que los resultados sean precisos es necesario conocer con gran precisión, no sólo la dependencia de la temperatura de brillo con la salinidad, sino también con otros factores perturbadores.



Figura 2: Visión artística de la misión SMOS (cortesía de EADS-CASA Espacio, Madrid, España).

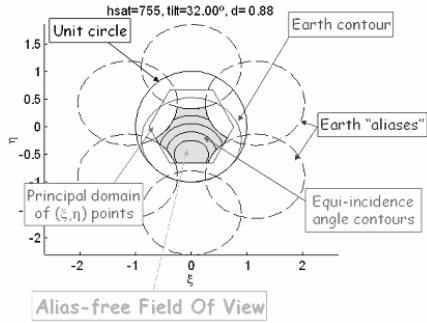


Figura 3: Campo de visión (FOV) libre de alias del instrumento MIRAS. El semi-espacio frontal se mapea en el círculo unidad en coordenadas (ξ, η) . La región libre de alias del Field Of View (FOV), en gris, viene delimitada por las réplicas de la imagen de la Tierra.

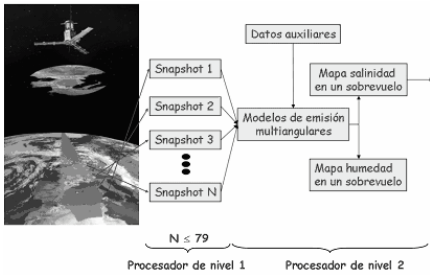


Figura 4: Recuperación de parámetros geofísicos utilizando medidas multi-angulares de T_B .

3. La temperatura de brillo del mar

La salinidad se relaciona con la temperatura de brillo a través de la dependencia de la constante dieléctrica con las mismas (Fig. 5). Además de la dependencia de la temperatura de brillo del mar con el ángulo de incidencia, existen otros factores, como la rugosidad inducida por el viento y la espuma que producen una variación incluso mayor que con la salinidad, por lo que es fundamental poder corregirlas con precisión.

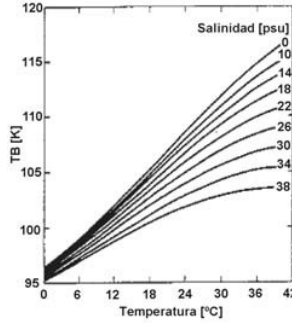


Figura 5: Temperatura de brillo del agua para incidencia normal en función de la temperatura física y de la salinidad [5].

La dependencia con el viento y la espuma se pueden resumir como [6,7]:

$$T_{B,p}^{Total} = F(U_{10}) \cdot T_{B,p}^{Foam} + [1 - F(U_{10})] \cdot T_{B,p}^{Sea} = T_{B,p}^{Sea} + F(U_{10}) [T_{B,p}^{Foam} - T_{B,p}^{Sea}], \quad (2)$$

donde $F(U_{10})$ es la fracción de mar cubierto por espuma en función U_{10} , la intensidad de viento a 10 m de altura, $T_{B,p}^{Sea}$ y $T_{B,p}^{Foam}$ son las temperaturas de brillo del mar sin espuma y de la espuma:

$$T_{B,p}^{Sea}(\theta) = [1 - \Gamma_p^{Fresnel}(\theta, \epsilon_r)] \cdot T_s + \Delta T_{B,p}(\theta, U_{10}), \quad (3)$$

$$\begin{cases} \Delta T_h \approx 0.25 \cdot (1 + \theta/94^\circ) \cdot U_{10}, \\ \Delta T_v \approx 0.24 \cdot (1 - \theta/81^\circ) \cdot U_{10}, \end{cases} \quad (4)$$

$\Gamma_p^{Fresnel}(\theta, \epsilon_r)$ es el coeficiente de reflexión de Fresnel (en potencia) y $\Delta T_p = T_{B,p}^{Foam} - T_{B,p}^{Sea}$ varía entre 16.1 K a 25° y 10.1 K a 50° en polarización horizontal, y entre 10.1 K a 25° y 20.2 K a 50° en polarización vertical. En [8] Font et al. describen las principales cuestiones pendientes de resolver en el tema de la recuperación de la salinidad con SMOS.

4. Recuperación de la Salinidad del Mar

Después de realizar las correcciones de los atmosféricas e ionosféricas, la recuperación de la

salinidad del mar se puede formular como el siguiente problema de minimización [9]:

$$\varepsilon = \frac{1}{N_{\text{observaciones}}} \sum_n \left[\left(\bar{F}^{\text{modelo}}(\theta_n, \hat{x}) - \bar{F}^{\text{datos}}(\theta_n, \bar{x}) \right)^T \left(\begin{matrix} \text{Tierra, pares(n)/impares(n)} \\ \text{Polarimetrico/Doble polariz.} \end{matrix} \right)^{-1} \left(\bar{F}^{\text{modelo}}(\theta_n, \hat{x}) - \bar{F}^{\text{datos}}(\theta_n, \bar{x}) \right) \right] \quad (5)$$

donde $N_{\text{observaciones}}$ es el número de observaciones de un mismo píxel en un sobrevuelo del satélite,

$\bar{C} = \begin{matrix} \text{Tierra, pares(n)/impares(n)} \\ \text{Polarimetrico/Doble polariz.} \end{matrix}$ es la matriz de covarianza del error y depende del modo operación de MIRAS y de si las temperaturas de brillo se expresan en el marco de referencia de la antena (T_x, T_y) o de la Tierra (T_h, T_v), y $\bar{F}^{\text{modelo/datos}}(\theta_n, \hat{x})$ es un vector que contiene los observables medidos y el modelo de temperatura de brillo que depende de una serie de parámetros \hat{x} , y puede ser:

- $\bar{F}^{\text{modelo/datos}}(\theta_n, \hat{x}) = [T_h(\theta_n, \hat{x}), T_v(\theta_n, \hat{x})]^T$,
- $\bar{F}^{\text{modelo/datos}}(\theta_n, \hat{x}) = [T_x(\theta_n, \hat{x}), T_y(\theta_n, \hat{x})]^T$, o
- $\bar{F}^{\text{modelo/datos}}(\theta_n, \hat{x}) = [I(\theta_n, \hat{x})]^T = [T_x(\theta_n, \hat{x}) + T_y(\theta_n, \hat{x})]^T$

si el problema se formula en términos del primer parámetro de Stokes (I).

En este último caso se tiene la ventaja de que se evitan los errores asociados a la corrección de la rotación de Faraday, aunque al sumar dos observables para obtener cada valor de I, se reduce el número de medidas en un factor 2.

4.1. Recuperación de salinidad en un sobrevuelo

La Fig. 6 [9] muestra un ejemplo de las prestaciones del algoritmo de recuperación de salinidad (ecuación 5) cuando no se usa ningún tipo de información auxiliar sobre viento o temperatura superficial del mar. Para aguas frías, el error cuadrático medio oscila entre 0.5 y 1 psu por sobrevuelo en el centro del swath, por lo que como el objetivo final es conseguir en un mes y en píxeles de 100 km x 100 km un error inferior a 0.1 psu, estos resultados se deberán promediar tanto en el tiempo, como en el espacio.

Por otra parte, en general, el uso de parámetros auxiliares mejora ligeramente la recuperación de salinidad, aunque puede forzar soluciones incorrectas cuando estos parámetros presentan errores importantes debido a una insuficiente resolución espacial y/o temporal.

Para calcular la mejora esperable por promediado espacio-temporal se ha estudiado la recuperación de la salinidad en una región de 10°x10° situada en el Atlántico Norte (Fig. 7) [10].

La recuperación de la salinidad se ha llevado a cabo siguiendo la misma técnica, pero introduciendo información de viento y temperatura superficial de diferentes fuentes:

- productos Quikscat/NCEP a 0.5° cada 6 h,
- productos ECMWF a 0.5° cada 6 h,
- productos Quikscat a 0.5° cada 24 h,
- temperatura SAF/OSI CMS a 0.1° cada 24 h, y
- temperatura NCEP Reynolds a 1° cada semana.

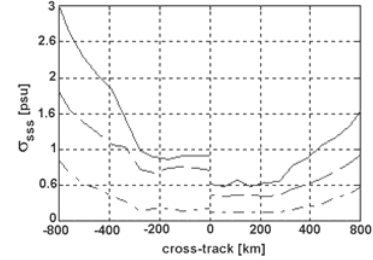


Figura 6: Error cuadrático medio en la recuperación de salinidad sin utilizar parámetros auxiliares en función de la distancia del píxel a la traza del satélite para $U_{10} = 0$ m/s, formulando el problema en función de I (izquierda) o de $[T_h, T_v]$ (derecha) para SST = 5 °C (línea continua), 15 °C (línea discontinua) y 25 °C (línea punteada).

A modo de ejemplo, la Fig. 8 el resultado de la recuperación de la salinidad utilizando $[T_h, T_v]$ medidos en modo completamente polarimétrico para diferentes combinaciones de parámetros auxiliares, para el 1 de Enero de 2003.

Los mejores resultados se han obtenido sistemáticamente con productos de viento híbridos Quikscat/NCEP y de temperatura SAF/OSI CMS, los cuales se utilizarán por defecto en adelante [10]. A pesar de ello, y como se observa en la Fig. 8, los valores de salinidad recuperados presentan un sesgo.

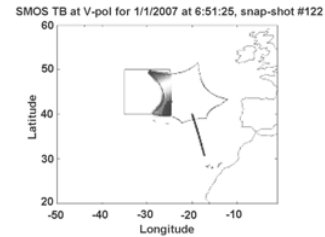


Figura 7: Región del Atlántico Norte bajo estudio. Se representa el campo de visión libre de alturas de SMOS y las temperaturas de brillo en polarización vertical que son observadas en un snap-shot.

4.2. Promediado temporal

El promediado temporal se ha realizado realizando la media de los valores de salinidad recuperados en cada sobrevuelo, separando trazas ascendentes y descendentes, con un peso igual al inverso de la desviación estándar del error de salinidad. Para calcularla, para cada escenario se han realizado 10 simulaciones de Monte-Carlo, obteniéndose valores similares a los mostrados en la Fig. 6.

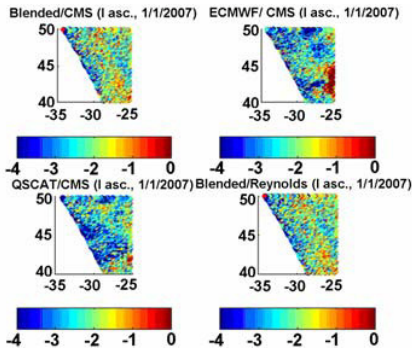


Figura 8: Error en la salinidad recuperada el 1 de Enero de 2003 con diferentes combinaciones de parámetros auxiliares.

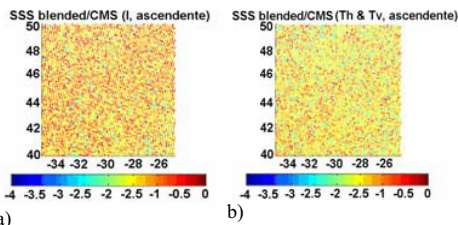


Figura 9: Promedios temporales del error en la salinidad recuperada en los pasos ascendentes con a) el primer parámetro de Stokes en modo de doble polarización, y b) T_h y T_v en modo polarimétrico.

La Fig. 9 muestra dos ejemplos del promediado temporal. Se observa de manera sistemática que los sesgos son menores en la recuperación usando el primer parámetro de Stokes (I), que utilizando T_h y T_v separadamente, aunque los valores de las desviaciones típicas sean algo superiores. La Tabla 1 presenta los sesgos y las desviaciones estándar del promedio temporal de los valores de salinidad recuperadas en diferentes configuraciones a lo largo de 1 mes.

Tabla 1: Sesgos y desviaciones estándar en la recuperación de salinidad en diferentes configuraciones (Datos auxiliares: Quikscat/NCEP-SAF/OFI CMS)

Modo Instrumento	Traza	Sesgo	RMS
Doble polariz. (Stokes I)	Asc.	1.267	0.371
Doble polariz. (Stokes I)	Desc.	1.311	0.382
Polarimétrico (T_h , T_v)	Asc.	1.447	0.337
Polarimétrico (T_h , T_v)	Desc.	1.462	0.331

4.3. Promediado espacial

El promediado espacial se ha realizado después del temporal promediando con igual peso los píxeles en cajas de $1^\circ \times 1^\circ$. La Fig. 10 muestra un ejemplo de promediado espacio-temporal. A pesar de que los sesgos se mantienen, podrán ser calibrados a partir de medidas *in situ* obtenidas mediante boyas ancladas o a la deriva, o incluso a partir de datos de otros sensores que volarán simultáneamente (misión Aquarius de NASA), aunque con peor resolución espacial. Para la configuración en doble polarización, usando el primer parámetro de Stokes, el valor de la desviación típica del error de la salinidad es 0.071 psu para los pases ascendentes, y 0.99 psu para los descendentes, y para el modo polarimétrico usando T_h y T_v , 0.055 psu para los pases ascendentes y 0.061 psu para los descendentes. Nótese que estos valores satisfacen con holgura los requerimientos en la medida de la salinidad [11]. Sin embargo, estos alentadores resultados, hay tomarlos con cierta cautela, ya que en este estudio se han supuesto todos los efectos atmosféricos conocidos, nulos sesgos en las temperaturas de brillo producidas por MIRAS.

Resultados muy similares, aunque ligeramente peores, se obtienen cuando se utilizan datos auxiliares de temperatura de Reynolds debido a la escasa sensibilidad de la temperatura de brillo con la temperatura superficial del agua. Sin embargo, al utilizar otros datos auxiliares de viento (ECMWF o Quikscat), los errores oscilan entre aproximadamente 0.2 y 0.3 psu

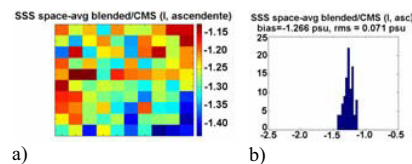


Figura 10: Mapas e histogramas del error en la salinidad recuperada después del promediado espacio-temporal para los pases ascendentes.

5. Conclusiones

Este trabajo presenta un estudio de la recuperación de la salinidad a partir de medidas radiométricas multi-angulares en banda L, simuladas para el sensor MIRAS a bordo de la misión SMOS de la ESA, en sus dos modos de funcionamiento: doble polarización y polarimétrico. Para evitar las singularidades asociadas al paso al marco de referencia de la Tierra, para modo de doble polarización se ha planteado la recuperación en términos del primer parámetro de Stokes, mientras que para el modo polarimétrico se ha planteado en términos de T_h y T_v sobre la Tierra. Se ha encontrado que:

1. En un pase el error cuadrático medio en la salinidad recuperada es del orden de 1 psu (dependiendo de los datos auxiliares que se utilicen) aumentando hasta 4 psu o más en los extremos del swath. Asimismo, existe un sesgo en la recuperación, que deberá ser corregido mediante medidas ground-truth.
2. A nivel de píxel, el error obtenido mediante promediado temporal en un mes oscila entre 0.33-0.55 psu, dependiendo de los datos auxiliares, obteniéndose los mejores resultados para productos híbridos de viento Quikscat/NCEP y datos CMS SAF/OSI de temperatura.
3. El promediado de pases ascendentes y descendentes debe ser cuidadoso, pues presentan sesgos diferentes.
4. El promediado espacio-temporal de la salinidad recuperada en bloques de 30 días y cajas de $1^\circ \times 1^\circ$ reducen el error residual en la recuperación entre 0.06 psu (mejores parámetros auxiliares) y 0.3 psu (peor combinación de parámetros auxiliares).

6. Agradecimientos

Los resultados presentados en este trabajo han sido realizados desde el año 2000 en el marco de diversos proyectos de financiación ESTEC Contract No 141888/00/NL/DC y CCN-1 y CCN-2; MCYT PNE-009/2001-C-02; MCYT TIC 99-1050-C03-01; MCYT TIC2002-04451-C02-01; y ESTEC ITT 1-4505/03/NL/Cb.

7. Referencias

- [1] Kerr et al., 1998, MIRAS on RAMSES: radiometry applied to soil moisture and salinity measurements, Full proposal, A.O. Earth Explorer Opportunity Missions, ESA, 1998. SMOS web site: <http://www-sv.cict.fr/cesbio/smos>
- [2] SMOS web site: <http://www.esa.int/export/esaLP/smos.html>

- [3] Camps, A., J. Bará, I. Corbella, F. Torres, *The Processing of Hexagonally Sampled Signals with Standard Rectangular Techniques: Application to 2D Large Aperture Synthesis Interferometric Radiometers*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, GRS-35, pp. 183-190, Enero 1997
- [4] M. Martín-Neira, S. Ribó, and A. J. Martín-Polegre, *Polarimetric Mode of MIRAS*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 40(8), pp. 1755-1768, Agosto 2002.
- [5] Ulaby, F., R.K. Moore, A.K. Fung, *Microwave Remote Sensing. Active and Passive*, Vol I: Microwave Remote Sensing Fundamentals and Radiometry, Addison-Wesley Publishing Company, 1981.
- [6] Camps, A., et al., *The WISE 2000 and 2001 campaigns in support of the SMOS Mission: Sea Surface L-Band Brightness Temperature Observations And Their Application to Multi-Angular Salinity Retrieval*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 42, No. 4, pp. 804-823, Abril 2004.
- [7] Camps, A., et al., *The Emissivity Of Foam-Covered Water Surface At L-Band: Theoretical Modeling And Experimental Results From The FROG 2003 Field Experiment*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol 43(5), pp. 925-937, Mayo 2005
- [8] Font, J.; et al., *The determination of surface salinity with the European SMOS space mission*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 42(10), pp. 2196 – 2205, Octubre 2004.
- [9] Camps, A., M. Vall-llossera, L. Batres, F. Torres, N. Duffo, I. Corbella, *Performance Of Sea Surface Salinity And Soil Moisture Retrieval Algorithms With Different Ancillary Data Sets In 2D L-Band Aperture Synthesis Interferometric Radiometers*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol 43(5), pp. 1189-1200, Mayo 2005.
- [10] Sabia, R., A. Camps, N. Reul, M. Vall-llossera, J. Miranda, “*WP 1400: Towards Best SSS Level 2 products*”, ESTEC CONTRACT ITT 1-4505/03/NL/Cb
- [11] Smith, N. , and M. Lefèbvre: *The Global Ocean Data Assimilation Experiment (GODAE)*; “Monitoring the Oceans in the 2000s: An integrated Approach”, International Symposium, Biarritz, France, October 15-17, 1997.