

Ruiz Sebastián, A.; Bergas, J.; González Gambau, V.; Turiel, A.; Onrubia, R.; Olmedo, E. Análisis de las propiedades dieléctricas del agua del mar en el espectro de microondas.

Análisis de las propiedades dieléctricas del agua del mar en el espectro de microondas.

Ruiz Sebastián, Arnau¹ **Bergas, Joan**¹ **González Gambau, Verónica**¹ **Turiel, Antonio**¹
Onrubia, Raul² **Olmedo, Estrella**¹

¹ Barcelona Expert Center (BEC) & Instituto de Ciencias del Mar (ICM), CSIC, España

² Zenithal Blue Technologies (ZBT), España

ORCID: Ruiz Sebastián 0009-0002-7596-9185 Bergas 0009-0006-3909-2266 González Gambau 0000-0002-6380-3754
Turiel 0000-0001-6103-224X Onrubia 0000-0001-6636-1587 Olmedo 0000-0002-3178-1554

Correspondencia: arnauruiz@icm.csic.es jbergas@icm.csic.es vgonzalez@icm.csic.es turiel@icm.csic.es
onrubia@zenithalblue.com olmedo@icm.csic.es

RESUMEN

La estimación de la salinidad superficial del océano mediante teledetección en microondas constituye un desafío debido a su carácter indirecto y a la dependencia de modelos físicos intermedios. En este trabajo se analiza la validez de los modelos existentes de constante dieléctrica del agua de mar en el rango de frecuencias de 0.4 a 2 GHz, con especial interés en su aplicabilidad en el contexto de la futura misión CRYORAD. Se estudia la dispersión entre distintos modelos ampliamente utilizados (Klein & Swift, Meissner & Wentz, BVZ, entre otros) a partir de su formulación basada en el modelo de un tiempo de relajación de Debye. Los resultados muestran que la variabilidad entre modelos es débilmente dependiente de la frecuencia en la parte real de la constante dieléctrica, mientras que en la parte imaginaria presenta una mayor sensibilidad, especialmente a bajas frecuencias. No obstante, la dispersión global se mantiene acotada, lo que sugiere que los modelos actuales son razonablemente robustos en el rango de estudio.



Palabras clave: Constante dieléctrica, radiometría de microondas de banda ancha, salinidad superficial del mar, CryoRad



Fecha de recepción: 17 febrero 2026 · Fecha de aceptación: 22 febrero 2026


Análisis de las propiedades dieléctricas del agua del mar en el espectro de microondas

Ruiz Sebastián, Arnau ⁽¹⁾, Bergas, Joan ⁽¹⁾, González Gambau, Verónica ⁽¹⁾, Turiel, Antonio ⁽¹⁾, Onrubia, Raul ⁽²⁾, Olmedo, Estrella ⁽¹⁾


⁽¹⁾ Barcelona Expert Center (BEC) & Instituto de Ciencias del Mar (ICM), CSIC, España.

 0009-0002-7596-9185, arnau@icm.csic.es ;  0009-0006-3909-2266, jbergas@icm.csic.es

 0000-0002-6380-3754, vgonzalez@icm.csic.es ;  0000-0001-6103-224X, turriel@icm.csic.es

 0000-0002-3178-1554, olmedo@icm.csic.es

⁽²⁾ Zenithal Blue Technologies (ZBT), España.

 0000-0001-6636-1587, onrubia@zenithalblue.com.

Resumen: La estimación de la salinidad superficial del océano mediante teledetección en microondas constituye un desafío debido a su carácter indirecto y a la dependencia de modelos físicos intermedios. En este trabajo se analiza la validez de los modelos existentes de constante dieléctrica del agua de mar en el rango de frecuencias de 0.4 a 2 GHz, con especial interés en su aplicabilidad en el contexto de la futura misión CRYORAD. Se estudia la dispersión entre distintos modelos ampliamente utilizados (Klein & Swift, Meissner & Wentz, BVZ, entre otros) a partir de su formulación basada en el modelo de un tiempo de relajación de Debye. Los resultados muestran que la variabilidad entre modelos es débilmente dependiente de la frecuencia en la parte real de la constante dieléctrica, mientras que en la parte imaginaria presenta una mayor sensibilidad, especialmente a bajas frecuencias. No obstante, la dispersión global se mantiene acotada, lo que sugiere que los modelos actuales son razonablemente robustos en el rango de estudio.

Palabras clave: Constante dieléctrica, radiometría de microondas de banda ancha, salinidad superficial del mar, CryoRad

Analysis of the dielectric properties of sea water in the microwave spectrum

Abstract: *The estimation of ocean surface salinity by means of microwave remote sensing constitutes a challenge due to its indirect nature and its dependence on intermediate physical models. In this work, the validity of existing models of the dielectric constant of seawater in the frequency range from 0.4 to 2 GHz is analysed, with special interest to their applicability in the context of the future CRYORAD mission. The dispersion among different widely used models (Klein & Swift, Meissner & Wentz, BVZ, among others) is studied based on their formulation derived from the Debye single time relaxation model. The results show that the variability among models is weakly dependent on frequency in the real part of the dielectric constant, whereas in the imaginary part it exhibits greater sensitivity, especially at low frequencies. Nevertheless, the overall dispersion remains bounded, which suggests that current models are reasonably robust within the studied range.*

Keywords: *Dielectric constant, low-frequency wideband microwave radiometry, sea surface salinity, dielectric constant, microwave radiometry, sea surface salinity, CryoRad*

1. INTRODUCCIÓN

La observación por satélite de variables como la salinidad del mar presenta importantes desafíos, ya que se trata de magnitudes que no son directamente observables y cuya estimación requiere técnicas complejas y el uso de información auxiliar. No obstante, en la actualidad se dispone de más de 16 años de observaciones continuadas que, junto con los avances en teledetección tanto a nivel instrumental como en los

métodos de procesamiento, permiten analizar su variabilidad y evolución con un grado de precisión cada vez mayor.

Las primeras misiones satelitales que han dado acceso a las variables del ciclo del agua con radiometría de microondas. En concreto, explotando la frecuencia de 1.413 GHz de la banda L de microondas, como es el caso de las misiones de la Agencia Espacial Europea SMOS (2009-), de la NASA Aquarius (2011-2015) y SMAP (2015-), y recientemente la misión china COSM (2024-). Todas estas misiones embarcan radiómetros en banda L

que permiten medir tanto variables oceánicas (salinidad, grosor del hielo marino) como terrestres (humedad del suelo). Cada una de estas misiones tiene diferentes tecnologías instrumentales y por tanto características y problemáticas diferentes. SMOS es un radiómetro interferométrico en dos dimensiones que genera una imagen de síntesis con una resolución nominal en el centro del campo de visión de 35-50 km. Aquarius tenía tres radiómetros de apertura real con resoluciones de entre 90 y 150 km con tres ángulos de incidencia diferentes. SMAP tiene un radiómetro de apertura real que realiza un barrido circular sobre la superficie reflectante, una resolución nominal de 9 km y con un ángulo de incidencia fijo de 40°. Finalmente el instrumento MICAP a bordo de COSM es un radiómetro interferométrico en una dimensión y una resolución de 30 km. Se espera que entre 2029 y 2030 se lance la misión CIMR dentro del programa Copernicus, la cual vendrá dotada de radiómetros de apertura real a diversas frecuencias, incluyendo la banda L.

En cuanto a misiones futuras, la misión CRYORAD es una misión candidata del programa Earth Explorer 12 de la Agencia Espacial Europea, en la que se propone la adquisición de datos en el rango de frecuencias de microondas 0.4-2 GHz de manera continua. Las frecuencias por debajo de la banda L tienen una mayor sensibilidad a cambios de salinidad, con lo que se espera una mejora de la calidad de la recuperación de esta variable. Por otro lado, en este rango de frecuencias solo la banda L está protegida para la observación de la Tierra y, por lo tanto, en el resto de frecuencias se espera un mayor impacto de las interferencias.

El presente trabajo se centra en el análisis de los diferentes modelos existentes para la caracterización de la constante dieléctrica, magnitud que relaciona las variaciones de temperatura de brillo medidas por el instrumento con los cambios en la salinidad y la temperatura superficial del mar. El objetivo principal es evaluar la dispersión de los modelos actuales de la constante dieléctrica del agua de mar, dentro del rango de frecuencias de 0.4 a 2 GHz, y determinar su idoneidad para su aplicación en la misión CRYORAD.

2. BASE TEÓRICA

Existe una extensa literatura sobre modelos de la constante dieléctrica del agua de mar, especialmente en banda L y frecuencias más altas. Entre los más utilizados destacan los modelos de Klein & Swift (1977), Meissner & Wentz (2012), George Washington (2020) y el modelo BVZ (Boutin, Vergely & Zhou, 2023). Sin embargo, el desarrollo de modelos en banda P es relativamente reciente y aún limitado. De hecho, el único modelo ajustado con medidas de laboratorio en banda P es el modelo de Le Vine (2025).

La mayoría de estos modelos se fundamentan en el modelo de un solo tiempo de relajación de Debye (1934), que describe la dependencia de la constante dieléctrica con la frecuencia, la salinidad y la temperatura:

$$\varepsilon(\omega, S, T) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s(S, T) - \varepsilon_\infty}{1 + j\omega\tau(S, T)} - j \frac{\sigma(S, T)}{\omega\varepsilon_0} \quad (1)$$

Donde $\varepsilon(\omega, S, T)$ es la constante dieléctrica, ε_∞ es la permitividad a frecuencias muy altas, $\varepsilon_s(S, T)$ es la constante dieléctrica estática, $\tau(S, T)$ es el tiempo de relajación, $\sigma(S, T)$ es la conductividad iónica, ε_0 es la permitividad en el espacio libre y $\omega = 2\pi f$ donde f es la frecuencia (Hz). Separando la parte real e imaginaria de la constante dieléctrica, se obtiene:

$$\Re(\varepsilon) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + (\omega\tau)^2} \quad (2)$$

$$\Im(\varepsilon) = -\frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)\omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2} - \frac{\sigma}{(\omega\varepsilon_0)} \quad (3)$$

Dado que los parámetros ε_s , τ y σ no dependen de la frecuencia, las ecuaciones (2) y (3) nos permiten caracterizar directamente la influencia del término f respecto al valor de la parte real e imaginaria de la constante dieléctrica. Por otro lado, la comparativa directa de ε_s , τ y σ permite evaluar las diferencias entre los modelos y determinar en qué rango de salinidades y temperaturas estas diferencias son más significativas.

3. DISCUSIÓN Y RESULTADOS

Como se indicó en la sección anterior, para cada frecuencia f la diferencia entre los modelos viene dada por la diferencia de los parámetros ε_s , τ y σ que dependen únicamente de la salinidad y de la temperatura. Estos parámetros se ajustan según las distintas mediciones y métodos considerados en cada modelo. En las Figuras 1 y 2 se presentan la media y el porcentaje de desviación estándar de los parámetros ε_s , τ y σ para los modelos Klein & Swift, Meissner & Wentz, George Washington (2020) y BVZ.

Retomando las ecuaciones (2) y (3), en la parte real la frecuencia aparece multiplicando al término τ del orden de 10^{-11} y el rango de frecuencias es del orden de 10^9 Hz. Por lo tanto, al elevar al cuadrado $\omega\tau$ se obtiene un valor del orden de 10^{-4} , lo que implica una variación pequeña en el denominador con respecto a la frecuencia.

Con respecto a la parte imaginaria, en el primer término $-\frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)\omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2}$ la variación de la frecuencia también se ve atenuada por τ , lo que hace que el término dominante sea el segundo, $-\frac{\sigma}{(\omega\varepsilon_0)}$, que es inversamente proporcional a f .

En consecuencia, la dispersión entre modelos para $f \in [0.4, 2.0]$ GHz será prácticamente constante con respecto a la frecuencia para la parte real de la constante dieléctrica. Mientras que, para la parte imaginaria, crecerá a medida que el valor de f disminuya. No obstante, la Figura 3 muestra que la parte real presenta una variación limitada (≈ 2), mientras que la parte imaginaria se extiende sobre un rango significativamente mayor (≈ 100). En este sentido, aunque la parte imaginaria muestra una mayor variación absoluta respecto a la frecuencia, la dispersión relativa es poco significativa.

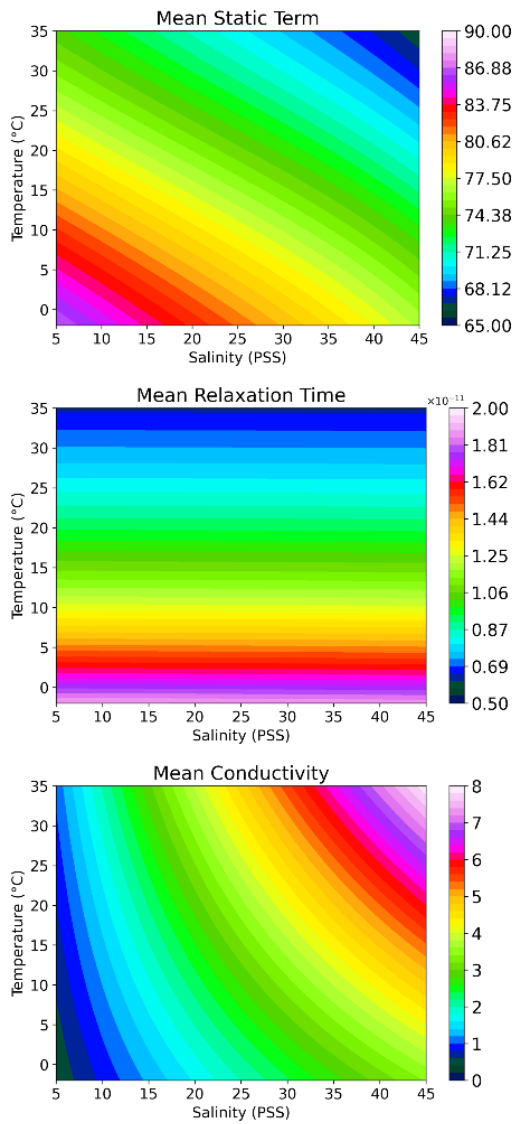


Figura 1. Media entre los modelos analizados de la constante dieléctrica estática (panel superior), el tiempo de relajación (panel central) y la conductividad iónica (panel inferior), respecto a la temperatura (°C) y a la salinidad (PSS, Practical Salinity Scale).

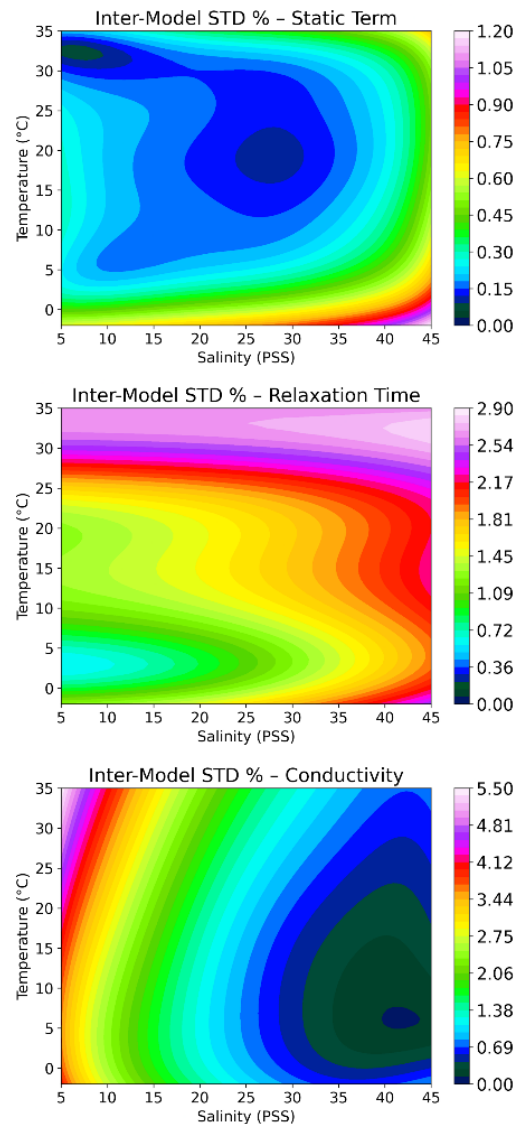


Figura 2. Porcentaje de desviación estándar entre los modelos analizados de la constante dieléctrica estática (panel superior), el tiempo de relajación (panel central) y la conductividad iónica (panel inferior), respecto a la temperatura (°C) y a la salinidad (PSS, Practical Salinity Scale).

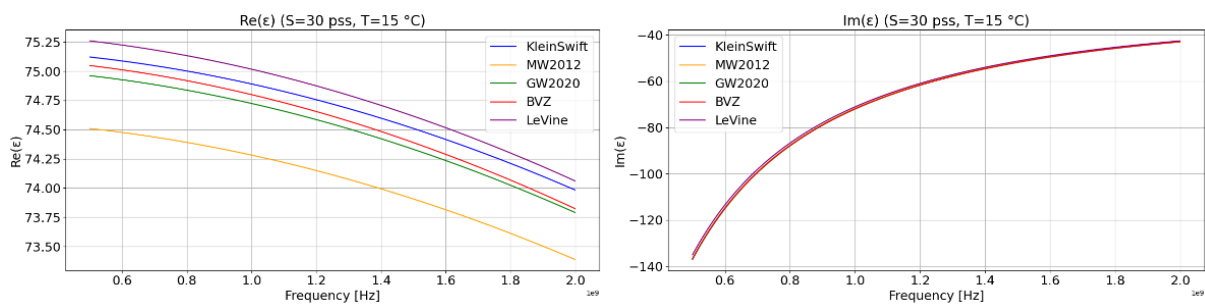


Figura 3. Parte real (panel superior) e imaginaria (panel inferior) de la constante dieléctrica en función de la frecuencia (GHz) para valores fijos de salinidad (30 PSS) y temperatura (15 °C).

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos indican que los modelos actuales de constante dieléctrica presentan, en términos generales, una buena consistencia en el rango de frecuencias comprendido entre 0.4 y 2 GHz. Esta concordancia es especialmente notable en la parte real, cuya dependencia con la frecuencia es débil, lo que se refleja en una baja dispersión entre modelos a lo largo de todo el rango.

Por el contrario, la parte imaginaria muestra una mayor sensibilidad a la frecuencia, particularmente en el extremo inferior del espectro, correspondiente a la banda P. Este comportamiento está dominado por el término asociado a la conductividad, que genera una dependencia inversamente proporcional a la frecuencia. A pesar de esta mayor variabilidad, la dispersión entre los distintos modelos analizados se mantiene dentro de márgenes relativamente acotados, lo que respalda su aplicabilidad en el rango de frecuencias analizado.

En conjunto, estos resultados sugieren que los modelos actuales son, en general, adecuados para su uso en el marco de la misión CRYORAD. Además, la comparativa entre modelos en banda L es aplicable también a la banda P dado el escaso efecto de la frecuencia en dichos rangos. No obstante, la limitada disponibilidad de validación experimental en banda P introduce incertidumbres adicionales, lo que evidencia la necesidad de profundizar el estudio de la constante dieléctrica a bajas frecuencias con el fin de mejorar la precisión en la estimación de la salinidad superficial del océano.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el proyecto de la Agencia Espacial Europea End-to-End Performance Simulator for CryoRad, con referencia 4000150528-1. Parte de los autores forman parte del Instituto de Ciencias del Mar, acreditado como Centro de Excelencia "Severo Ochoa" CEX-2024-001494-S por la Agencia Estatal de Investigación.

6. REFERENCIAS

Boutin, J., Vergely, J.-L., Bonjean, F., Perrot, X., Zhou, Y., Dinnat, E.P., Lang, R.H., Le Vine, D.M., and Sabia, R. (2023). New Seawater Dielectric Constant Parametrization and Application to SMOS Retrieved Salinity. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing* 61, 2000813.

Debye, P. (1934). Part I. Dielectric constant. Energy absorption in dielectrics with polar molecules. *Transactions of the Faraday Society*, 30, 679-684.

Entekhabi, D., Njoku, E. G., O'Neill, P. E., Kellogg, K. H., Crow, W. T., Edelstein, W. N., Entin, J. K., Goodman, S. D., Jackson, T. J., Johnson, J., Kimball, J., Piepmeier, J. R., Koster, R. D., Martin, N., McDonald, K. C., Moghaddam, M., Moran, S., Reichle, R., Shi, J.-C., Spencer, M. W., Thurman, S. W., Tsang, L., & Van Zyl, J. (2010). "The Soil Moisture Active Passive (SMAP) Mission." *Proceedings of the IEEE*, 98(5), 704–716.

Kilic, L., Prigent, C., Jiménez, C., Donlon, C., *et al.* (2018). "Expected Performance of the Copernicus Imaging Microwave Radiometer (CIMR) Mission." *Remote Sensing*, 10(12), 1963.

Klein, L.A., and Swift, C.T. (1977). An Improved Model for the Dielectric Constant of Sea Water at Microwave Frequencies. *IEEE Transactions on antennas and propagation* 25, 104–111.

D. M. Le Vine, G. S. E. Lagerloef and S. E. Torrusio, "Aquarius and Remote Sensing of Sea Surface Salinity from Space," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 98, no. 5, pp. 688-703, May 2010, doi: 10.1109/JPROC.2010.2040550.

D. M. Le Vine, R. H. Lang, M. Li, E. P. Dinnat, J. Boutin, and Y. Zhou, "The Dielectric Constant of Sea Water at P-Band for Salinity From 0 to 150 pss," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 63, pp. 1–11, 2025, doi: 10.1109/tgrs.2025.3532180.

Y. Li, X. Yin, W. Zhou, M. Lin, Y. Li and H. Liu, "First Assessment of Salinity Retrieval for Airborne COSM Data," *IGARSS 2024 - 2024 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Athens, Greece, 2024, pp. 5851-5854, doi: 10.1109/IGARSS53475.2024.10642724.

Meissner, T., and Wentz, F.J. (2012). The emissivity of the ocean surface between 6 and 90 GHz over a large range of wind speeds and earth incidence angles. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing* 50, 3004–3026.

R. Sabia, A. Camps, C. Gommenginger and M. Srokosz, "Retrieved sea surface salinity spatial variability using high resolution data within the soil moisture and ocean salinity (SMOS) mission," *2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Barcelona, Spain, 2007, pp. 1330-1333, doi: 10.1109/IGARSS.2007.4423051.

Y. Zhou, R. H. Lang, E. P. Dinnat and D. M. Le Vine, "Seawater Debye Model Function at L-Band and Its Impact on Salinity Retrieval From Aquarius Satellite Data," in *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 59, no. 10, pp. 8103-8116, Oct. 2021, doi: 10.1109/TGRS.2020.3045771