

Arribas Rodríguez, B.; Muleo Martínez, R.; Gómez Enri, J. Evaluación de la corriente geostrofica derivada del satélite SWOT mediante radar de alta frecuencia

# Evaluación de la corriente geostrofica derivada del satélite SWOT mediante radar de alta frecuencia

Arribas Rodríguez, Bárbara <sup>1</sup> Muleo Martínez, Roberto <sup>2</sup> Gómez Enri, Jesús <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad de Cádiz, España

<sup>2</sup> Servicios para energías renovables OWC

ORCID: Arribas Rodríguez [0009-0006-1672-5745](https://orcid.org/0009-0006-1672-5745) Muleo Martínez [0000-0002-1736-907X](https://orcid.org/0000-0002-1736-907X) Gómez Enri [0000-0001-6053-5160](https://orcid.org/0000-0001-6053-5160)

Correspondencia: [barbara.arribasrodriguez@alum.uca.es](mailto:barbara.arribasrodriguez@alum.uca.es) [roberto.mulero@uca.es](mailto:roberto.mulero@uca.es) [jesus.gomez@uca.es](mailto:jesus.gomez@uca.es)

## RESUMEN

El satélite *Surface Water and Ocean Topography* (SWOT), lanzado en diciembre de 2022, tiene como objetivo mejorar la comprensión de la dinámica oceánica mediante altimetría de alta resolución. En este estudio se validan las corrientes geostroficas derivadas de la anomalía del nivel del mar proporcionada por SWOT utilizando datos horarios de radares de alta frecuencia (HF) de la red de Puertos del Estado. El análisis se realiza para tres pases orbitales de SWOT sobre la subcuenca occidental del golfo de Cádiz, asociados a distintos regímenes atmosféricos característicos de la región: Levante, Poniente y calma. Los datos altimétricos se filtran mediante un método Loess para reducir el ruido, mientras que los datos de radar HF se procesan mediante un promedio horario. Asumiendo que en mar abierto la circulación superficial es mayoritariamente geostrofica, se comparan ambas corrientes sobre mallas espaciales coincidentes, evaluando su concordancia mediante el error cuadrático medio (RMSE). Los resultados muestran el mejor ajuste durante el evento de calma (RMSEmódulo = 4,5 cm/s), y valores mayores en Levante (RMSEmódulo = 10,1 cm/s) y Poniente (RMSEmódulo = 10,9 cm/s). A pesar del limitado número de validaciones disponibles, los resultados son coherentes con estudios previos en la región, lo que confirma la capacidad de SWOT para proporcionar datos de alta calidad y su potencial para el estudio de la circulación oceánica superficial. No obstante, se requiere más investigación para comprender la exactitud de las medidas de SWOT a frente a distintas forzantes atmosféricas y extender su validación a otras regiones y condiciones oceanográficas.

**Palabras clave:** SWOT, validación, anomalía del nivel del mar, golfo de Cádiz

Fecha de recepción: 13 febrero 2026 · Fecha de aceptación: 13 febrero 2026


# Evaluación de la corriente geostrófica derivada del satélite SWOT mediante radar de alta frecuencia

Arribas Rodríguez, Bárbara <sup>(1)</sup>, Muleo Martínez, Roberto <sup>(2)</sup>, Gómez Enri, Jesús <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Universidad de Cádiz, España.

 0009-0006-1672-5745, barbara.arribasrodriguez@alum.uca.es ;  0000-0001-6053-5160, jesus.gomez@uca.es.

<sup>(2)</sup> Servicios para energías renovables OWC.

 0000-0002-1736-907X, roberto.mulero@uca.es.

**Resumen:** El satélite *Surface Water and Ocean Topography* (SWOT), lanzado en diciembre de 2022, tiene como objetivo mejorar la comprensión de la dinámica oceánica mediante altimetría de alta resolución. En este estudio se validan las corrientes geostróficas derivadas de la anomalía del nivel del mar proporcionada por SWOT utilizando datos horarios de radares de alta frecuencia (HF) de la red de Puertos del Estado. El análisis se realiza para tres pases orbitales de SWOT sobre la subcuenca occidental del golfo de Cádiz, asociados a distintos regímenes atmosféricos característicos de la región: Levante, Poniente y calma. Los datos altimétricos se filtran mediante un método Loess para reducir el ruido, mientras que los datos de radar HF se procesan mediante un promedio horario. Asumiendo que en mar abierto la circulación superficial es mayoritariamente geostrófica, se comparan ambas corrientes sobre mallas espaciales coincidentes, evaluando su concordancia mediante el error cuadrático medio (RMSE). Los resultados muestran el mejor ajuste durante el evento de calma (RMSEmódulo = 4,5 cm/s), y valores mayores en Levante (RMSEmódulo = 10,1 cm/s) y Poniente (RMSEmódulo = 10,9 cm/s). A pesar del limitado número de validaciones disponibles, los resultados son coherentes con estudios previos en la región, lo que confirma la capacidad de SWOT para proporcionar datos de alta calidad y su potencial para el estudio de la circulación oceánica superficial. No obstante, se requiere más investigación para comprender la exactitud de las medidas de SWOT a frente a distintas forzantes atmosféricas y extender su validación a otras regiones y condiciones oceanográficas.

**Palabras clave:** SWOT, validación, anomalía del nivel del mar, golfo de Cádiz.

## Evaluation of the SWOT satellite using derived geostrophic currents

**Abstract:** *The Surface Water and Ocean Topography (SWOT) satellite, launched in December 2022, aims to improve the understanding of ocean dynamics through high-resolution altimetric measurements. This study validates geostrophic surface currents derived from sea surface height anomalies provided by SWOT using hourly high-frequency (HF) radar observations from the Puertos del Estado network. Three SWOT orbital passes over the western sub-basin of the Gulf of Cádiz are analysed, each corresponding to a characteristic atmospheric regime of the region: Levante, Poniente, and calm conditions. Altimetric data are filtered using a Loess method to reduce noise, while HF radar data are processed using hourly averages. Assuming that open-ocean surface circulation is predominantly geostrophic, SWOT-derived geostrophic currents are compared with total surface currents measured by HF radar. The comparison is performed on coincident spatial grids using a nearest-neighbour approach based on Euclidean distance, and accuracy is assessed through the root mean square error (RMSE). The best agreement is obtained under calm conditions (RMSEmodule = 4.5 cm/s), while higher errors are observed during Levante (RMSEmodule = 10.1 cm/s) and Poniente (RMSEmodule = 10.9 cm/s) events. Despite the limited number of existing SWOT validation studies, the results are consistent with previous validations conducted in the region using other observational platforms, supporting the robustness of the methodology and confirming SWOT's capability to provide high-quality surface current estimates. These findings highlight the potential of SWOT for studying ocean surface circulation, while emphasizing the need for further validation across diverse oceanic regions and environmental conditions. However, further research is needed to understand the accuracy of SWOT measurements under different atmospheric forcings and to extend their validation to other regions and oceanographic conditions.*

**Keywords:** SWOT, validation, sea surface height anomaly, gulf of Cadiz.

## 1. INTRODUCCIÓN

La teledetección se ha consolidado como una herramienta esencial para el estudio del medio marino, proporcionando observaciones sistemáticas con amplia cobertura espacial y temporal difícilmente alcanzable de forma *in situ*. Entre sus aplicaciones destaca la altimetría satelital, que permite medir la altura de la superficie del océano y variabilidad del nivel del mar. Sin embargo, la altimetría tradicional presenta limitaciones en áreas costeras, donde la circulación incluye procesos locales y ageostroficados, lo que dificulta la interpretación de los datos. El golfo de Cádiz (GDC) es un ejemplo de región costera compleja, condicionada por el intercambio entre aguas atlánticas y mediterráneas, el giro subtropical del Atlántico Norte y el sistema de afloramiento portugués (Laiz *et al.*, 2019).

En este contexto, la misión *Surface Water and Ocean Topography* (SWOT), lanzada en diciembre de 2022, supone un avance significativo. Su radar interferométrico KaRIn proporciona las primeras observaciones bidimensionales de alta resolución de la superficie oceánica. Aunque los estudios aún son limitados, los primeros resultados muestran que SWOT permite analizar procesos de circulación oceánica desde grandes escalas hasta aproximadamente 5 km, ampliando considerablemente el potencial de la altimetría satelital para comprender la dinámica costera y oceánica (Esselborn *et al.*, 2025; Fu *et al.*, 2024).

El objetivo principal de este estudio es validar la corriente geostrofica obtenida a partir de los datos del instrumento KaRIn a bordo del satélite SWOT, determinando previamente un procesamiento óptimo de los datos.

## 2. ZONA DE ESTUDIO

El GDC es una subcuena del Atlántico Norte que conecta con el Mar Mediterráneo a través del Estrecho de Gibraltar (EDG). Su circulación superficial está dominada por la corriente del GDC (GCC), alimentada por la corriente de las Azores y la corriente de Portugal, mientras que próxima a costa circula la corriente contracostera (CCC) asociada a la salida superficial del Mediterráneo. Este conjunto genera un patrón anticiclónico predominante en verano, alternando con una circulación ciclónica menos definida en invierno, y favorece la formación de lentes de agua mediterránea (meddies) cerca del Cabo de San Vicente (Criado-Aldeanueva *et al.*, 2009; Peliz *et al.*, 2009).

El presente estudio se centra en la zona occidental del GDC (Figura 1), entre el Cabo de San Vicente (CSV) y Santa María (CSM), limitada al sur por la latitud 36°N, que coincide con la órbita 460 del satélite SWOT y con la cobertura de los radares de alta frecuencia de la región.

## 3. MATERIAL Y MÉTODOS

### 3.1. SWOT

Los datos satelitales empleados provienen de la misión *Surface Water and Ocean Topography* (SWOT), desarrollada por NASA y CNES, operativa desde diciembre de 2022 con un ciclo orbital de 21 días. Se

utilizó el producto *SWOT\_L2\_LR\_SSH* (*Level 2 KaRIn Low Rate Sea Surface Height*), que proporciona la altura de la superficie del mar obtenida mediante el interferómetro KaRIn, cubriendo 120 km con dos subfranjas de 50 km desde 10 a 60 km a cada lado de la trayectoria terrestre del nadir a lo largo de la órbita del satélite, con una malla de 2 km × 2 km.

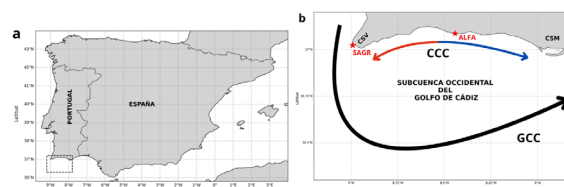


Figura 1. Zona de estudio. (a) Ubicación en la península Ibérica. (b) Subcuena occidental del golfo de Cádiz, corrientes principales y puntos de referencia (CCC: Corriente Contracostera; GCC: Corriente del Golfo de Cádiz; CSV: Cabo de San Vicente; CSM: Cabo de Santa María; SAGR: Radar HF de Sagres; ALFA: Radar de HF de Alanzina).

Los datos L2 están georreferenciados y corregidos de errores instrumentales y atmosféricos. Se empleó el conjunto Expert, que incluye información detallada del instrumento, correcciones ambientales y datos derivados del radiómetro y modelos geofísicos. Los archivos se descargaron en formato NetCDF-4 desde la plataforma HiTIDE: <https://hitide.podaac.earthdatacloud.nasa.gov/>.

### 3.2. Datos radar de alta frecuencia

Los datos empleados para la validación corresponden a las mediciones de velocidad superficial de la corriente recogidas por la red de radares de alta frecuencia (HF) de Puertos del Estado, concretamente del sistema operativo en el GDC, compuesto por las antenas de Sagres y Faro Alanzina. Estos radares operan a una frecuencia de 13,5 MHz y proporcionan datos horarios de corriente superficial con una resolución espacial de 1,5 km. Dichos datos han sido descargados en formato NetCDF desde su catálogo OpenDAP: [https://opendap.puertos.es/thredds/catalog/radar\\_local\\_huelva/catalog.html](https://opendap.puertos.es/thredds/catalog/radar_local_huelva/catalog.html).

La fiabilidad de los datos de radares HF está respaldada por numerosos estudios que los comparan con mediciones independientes en distintas condiciones oceánicas (Cosoli y Bolzon, 2015; Lorente *et al.*, 2015).

### 3.3. Viento

La zona de estudio está influenciada por regímenes de viento zonales que modifican las condiciones oceanográficas. Se consideran condiciones de Levante o Poniente cuando el módulo de la velocidad del viento supera los 5 m/s (Ortega *et al.*, 2022) durante al menos 6 horas (Ezzat *et al.*, 2018), entendiéndose los valores intermedios como eventos de calma. Los datos provienen del servicio *Copernicus Marine Data Service*, del producto de reanálisis *Global Ocean Hourly Reprocessed Sea Surface Wind and Stress from Scatterometer and Model*; con resolución de 0,125° × 0,125° y frecuencia horaria, obtenido a 10 m sobre la superficie del mar.

### 3.4. Procesamiento

Promedio temporal de los datos radar HF Para cada evento (Levante, Poniente y calma) se tomaron 72 horas de datos (hora posterior al paso de SWOT + 71 horas anteriores), calculando la media temporal de estos en cada punto de la malla del radar HF. Solo se incluyeron puntos con cobertura superior al 60%.

Con el objetivo de determinar si el promedio de 72 horas es adecuado en la zona de estudio, se prueba la validación del radar tanto para un único momento, más próximo a la pasada del satélite, como aplicando esta metodología para las últimas 6, 12, 24, 48 y 72 horas anteriores al paso del satélite.

#### 3.4.1. Correcciones de los datos SWOT

Se aplicó la corrección troposférica húmeda y la corrección *height\_cor\_xover* (Chen et al., 2025). Posteriormente, se analizó el indicador *quality\_flag*, seleccionando solo los valores clasificados como “bueno” y se eliminaron los valores no NaN al borde de la malla, así como de la franja nadir. Además, se suavizó la señal mediante un filtro Loess bidimensional, técnica de suavizado no paramétrica que funciona ajustando regresiones locales a subconjuntos de datos por el método de vecindarios. Se prueba un rango de suavizado definido por los puntos de [2 a 62] km (Mulero et al., 2024).

#### 3.4.2. Cálculo de la corriente geostrofica

A partir de la SLA corregida se calculó la topografía dinámica absoluta (ADT) (1) y su gradiente, obteniendo las componentes zonal y meridional de la corriente geostrofica mediante la ecuación geostrofica (2).

$$ADT = SSHA + MDT \quad (1)$$

$$\vec{Vg} = -gf\nabla h \quad (2)$$

Siendo  $\nabla h$  es el gradiente de la topografía dinámica obtenido del ADT.

Para asegurar la consistencia de los resultados se filtraron valores fuera del rango [-10, 10] m/s y que se desviaran de la media por más de tres veces la desviación estándar (std) (Lehmann, 2013).

#### 3.4.3. Comparación con radar HF

En mar abierto, la circulación superficial se encuentra dominada principalmente por los procesos geostrofos (Stewart, 2007), lo que justifica suponer iguales la corriente geostrofica (medida por el KaRIn) y la corriente total (medida por el radar HF).

Para comparar los datos del radar de alta frecuencia con los del satélite SWOT, ambos se interpolaron a la misma resolución asignando a cada punto de SWOT los valores de velocidad zonal y meridional del punto de radar más cercano, calculado mediante distancia euclídea.

Ambos conjuntos de datos (SWOT y radar) se enmascararon para conservar únicamente los puntos válidos en ambas fuentes (Figura 2).

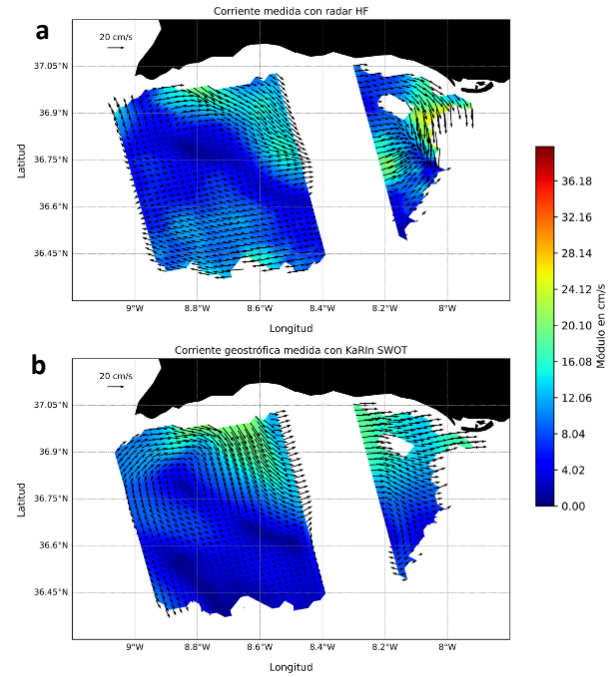


Figura 2. Corriente medida por (a) el radar (promedio de 72 h) y (b) el satélite (550 puntos suavizados con Loess) sobre la zona de estudio, correspondiente al evento de calma del 30/12/2023.

Se estudia el RMSE por componentes, zonal y meridional, para todos los casos, buscando la mayor exactitud combinando ambos filtros aplicados en el estudio: promedio temporal para el radar de alta frecuencia y Loess para el SWOT.

#### 3.4.4. Determinación de fenómenos de viento

El régimen de viento se caracterizó mediante la componente zonal, seleccionando tres fechas representativas coincidentes con los pasos de SWOT: el 30/12/2023 (media zonal de -1,00 m/s), el 10/02/2024 (5,48 m/s) y el 13/04/2024 (-7,26 m/s).

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Procesamiento de datos SWOT y radar HF

Los resultados indican en cuanto al filtro Loess un suavizado en los datos, evidenciado por la reducción de las anomalías en el conjunto (Figura 3).



Figura 3. Efecto del filtro Loess sobre una franja longitudinal para 550 puntos en el evento de calma (30/12/2023).

Respecto a los datos del radar de alta frecuencia, se observó que el promediado horario aumenta la cobertura y atenúa procesos de alta frecuencia.

## 4.2. Validación

Para los eventos de calma, Poniente y Levante, la aplicación del filtro Loess con máxima cobertura (550 puntos) produjo los valores más bajos de RMSE para las componentes zonal y meridional de la corriente. En el evento de calma, los mejores resultados del radar HF se obtuvieron considerando pocas horas de promediado mientras que en Poniente fue más efectivo usar únicamente la hora más cercana a la pasada del satélite. En el evento de Levante, en cambio, se logró un RMSE mínimo aplicando promediados de 6 horas (zonal) y 48 horas (meridional) (Tabla 1).

Los valores de RMSE obtenidos se encuentran en línea con estudios previos de referencia en el GDC bajo condiciones de viento similares (Mulero *et al.*, 2024).

**Tabla 1.** Valores de RMSE para las componentes zonal, meridional y módulo de la velocidad de corriente obtenidos para los parámetros considerados e indicados en cada caso, bajo un promediado Loess de 550 puntos para los datos SWOT.

Evento	RMSE v (cm/s)	RMSE u (cm/s)	RMSE Vg (cm/s)	Nº horas promediadas (datos HF)
Calma	5,3	6,1	4,5	12
Poniente	15,6	15,3	10,9	1
Levante	9,9	9,1	10,1	48

## 5. CONCLUSIONES

El análisis del tratamiento y validación de los datos del instrumento KaRIn a bordo del satélite SWOT pone de manifiesto varios hallazgos relevantes.

En primer lugar, el filtrado Loess aplicado a los datos de KaRIn mejora la calidad de las medidas al aumentar el radio de influencia, reduciendo el ruido sin comprometer la representación de la dinámica oceánica.

Por su parte, el promediado temporal de los datos del radar de alta frecuencia incrementa la cobertura espacial, aunque su uso eleva el RMSE, por lo que debe evaluarse con cautela.

La comparación entre los datos de SWOT y los del radar de alta frecuencia arroja valores de RMSE bajos y coherentes con estudios previos, aunque se observa menor concordancia bajo condiciones dinámicas. No obstante, el análisis se limita a un único pase de SWOT por evento (tres en total), lo que hace que los resultados sean ilustrativos, pero estadísticamente limitados. Aun así, evidencian el potencial de SWOT como un avance significativo en la observación altimétrica y subrayan la necesidad de continuar desarrollando metodologías específicas de procesamiento y validación, así como de ampliar el número de casos de estudio para consolidar el uso operativo de estos productos en futuras investigaciones oceanográficas.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a PO.DAAC (Jet Propulsion Laboratory) por proporcionar los datos del satélite SWOT, a Puertos del Estado por el suministro de los datos del radar de alta frecuencia (HF) y a Copernicus Marine Service por facilitar los datos de viento superficial.

## 7. REFERENCIAS

- Chen, A., Dubois, P., Chen, C., Bohé, A., Algermissen, S., & Germineaud, C. (2025). SWOT Product Description. Level 2 KaRIn Low Rate Sea Surface Height Product (L2\_LR\_SSH) (Revision C). Jet Propulsion Laboratory. D-56407.
- Criado-Aldeanueva, F., García-Lafuente, J., Navarro, G., y Ruiz, J. (2009). Seasonal and interannual variability of the surface circulation in the eastern Gulf of Cadiz (SW Iberia). *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 114(C1). <https://doi.org/10.1029/2008JC005069>
- Esselborn, S., Schöne, T., Dobsław, H., y Sulzbach, R. (2025). The 2023 Major Baltic Inflow Event Observed by Surface Water and Ocean Topography (SWOT) and Nadir Altimetry. *Remote Sensing*, 17(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/rs17071289>
- Ezzat, A.A., Jun, M., y Ding, Y. (2018). Spatio-temporal asymmetry of local wind fields and its impact on short-term wind forecasting. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 9, 1437–1447.
- Fu, L., Pavelsky, T., Cretaux, J., Morrow, R., Farrar, J., Vaze, P., Sengenès, P., Vinogradova-Shiffer, N., Sylvestre-Baron, A., Picot, N., y Gerald, D. (2024). The SWOT Mission: A Breakthrough in Radar Remote Sensing of the Ocean and Land Surface Water. *Geophysical Research Letters*, 51. <https://doi.org/10.1029/2023GL107652>
- Laiz, I., Plecha, S., Teles-Machado, A., González-Ortegón, E., Sánchez-Quiles, D., Cobelo-García, A., Roque, D., Peliz, A., Sánchez-Leal, R. F., y Tovar-Sánchez, A. (2019). The role of the Gulf of Cadiz circulation in the redistribution of trace metals between the Atlantic Ocean and the Mediterranean Sea. *Science of the Total Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134964>
- Lehmann, R. (2013). 3sigma-Rule for Outlier Detection from the Viewpoint of Geodetic Adjustment. *Journal of Surveying Engineering*, 139, 157–165. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000112](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000112)
- Mulero Martínez, R. (2024). Coastal surface circulation of the Gulf of Cadiz from satellite altimetry measurements [Doctoral thesis]. <https://rodin.uca.es/handle/10498/33790>
- Ortega, M., Sanchez, E., Gutiérrez, C., Molina, M. O., y López de la Franca Arema, N. (2022). Regional winds over the Iberian Peninsula (Cierzo, Levante and Poniente) from high-resolution COSMO-REA6 reanalysis. *International Journal of Climatology*, 43. <https://doi.org/10.1002/joc.7860>