

Gómez Enri, J.; Arribas Rodríguez, B.; Tejedor Álvarez, B.; Álvarez Esteban, Ó.; González Mejías, C.; Vignudelli, S. Análisis de la exactitud del nivel del mar obtenido con el satélite SWOT, usando medidas in-situ

Análisis de la exactitud del nivel del mar obtenido con el satélite SWOT, usando medidas in-situ

Gómez Enri, Jesús¹ **Arribas Rodríguez, Bárbara**¹ **Tejedor Álvarez, Begoña**¹ **Álvarez Esteban, Óscar**¹ **González Mejías, Carlos José**² **Vignudelli, Stefano**³

¹ Universidad de Cádiz, España

² Instituto Hidrográfico de la Marina

³ Instituto de Biofísica

ORCID: Gómez Enri 0000-0001-6053-5160 Arribas Rodríguez 0009-0006-1672-5745 Tejedor Álvarez 0000-0002-3022-8095 Álvarez Esteban 0000-0001-9141-0029 González Mejías 0000-0001-6834-676X Vignudelli 0000-0002-9038-5914

Correspondencia: jesus.gomez@uca.es barbara.arribasrodriguez@alum.uca.es begonia.tejedor@uca.es oscar.alvarez@uca.es carlosjose.gonzalez@uca.es stefano.vignudelli@ibf.cnr.it

RESUMEN

en este trabajo se ha analizado la exactitud de las series temporales del nivel del mar del altímetro interferométrico en banda Ka (KaRIn) a bordo del satélite franco-estadounidense SWOT. La principal innovación de esta misión con respecto a las misiones altimétricas anteriores es la observación bidimensional de la superficie terrestre. El objetivo de este trabajo fue validar las series temporales del nivel del mar obtenidas con el altímetro KaRIn, con los niveles del mar de un mareógrafo ubicado en Huelva. Para ello, se ha estimado la desviación estándar de las diferencias (SDD) entre los datos del altímetro y del mareógrafo. Esto permite cuantificar la exactitud de las medidas altimétricas. De las opciones disponibles para calcular la anomalía del nivel del mar a partir de SWOT, se ha probado la corrección troposférica húmeda (WTC, por sus siglas en inglés), la superficie media del mar (MSS) y el modelo de marea. Las comparaciones con los mareógrafos revelaron que el modelo ECMWF para el WTC proporcionó un mayor número de datos válidos y el mismo nivel de exactitud que usando la corrección derivada del instrumento Radiómetro Avanzado de Microondas. Además, se ha observado la misma exactitud independientemente de la superficie media marina utilizada (Centre National d'Études Spatiales: CNES y Danmarks Tekniske Universitet: DTU). Finalmente, el modelo de mareas FES (Finite Element Solution) mejoró la exactitud en las estimas del nivel del mar con respecto al modelo DTU. La SDD promedio de SWOT KaRIn en la zona de estudio es de 8,3 cm (traza descendente) y 8,2 cm (traza ascendente). La distribución espacial de la SDD en las proximidades de la ubicación del mareógrafo (considerando un radio de 100 km) es considerablemente uniforme, independientemente del segmento de traza analizado.





Palabras clave: *Altimetría swath, exactitud, anomalía del nivel del mar*

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


Análisis de la exactitud del nivel del mar obtenido con el satélite SWOT, usando medidas in-situ

Gómez Enri, Jesús ⁽¹⁾, Arribas Rodríguez, Bárbara ⁽¹⁾, Tejedor Álvarez, Begoña ⁽¹⁾, Álvarez Esteban, Óscar ⁽¹⁾, González Mejías, Carlos José ⁽²⁾, Vignudelli, Stefano ⁽³⁾


⁽¹⁾ Universidad de Cádiz, España.

 0000-0001-6053-5160, jesus.gomez@uca.es ;  0009-0006-1672-5745, barbara.arribasrodriguez@alum.uca.es.
 0000-0002-3022-8095, begonia.tejedor@uca.es ;  0000-0001-9141-0029, oscar.alvarez@uca.es.

⁽²⁾ Instituto Hidrográfico de la Marina

 0000-0001-6834-676X, carlosjose.gonzalez@uca.es.

⁽³⁾ Instituto de Biofísica.

 0000-0002-9038-5914, stefano.vignudelli@ibf.cnr.it.

Resumen: en este trabajo se ha analizado la exactitud de las series temporales del nivel del mar del altímetro interferométrico en banda Ka (KaRIn) a bordo del satélite franco-estadounidense SWOT. La principal innovación de esta misión con respecto a las misiones altimétricas anteriores es la observación bidimensional de la superficie terrestre. El objetivo de este trabajo fue validar las series temporales del nivel del mar obtenidas con el altímetro KaRIn, con los niveles del mar de un mareógrafo ubicado en Huelva. Para ello, se ha estimado la desviación estándar de las diferencias (SDD) entre los datos del altímetro y del mareógrafo. Esto permite cuantificar la exactitud de las medidas altimétricas. De las opciones disponibles para calcular la anomalía del nivel del mar a partir de SWOT, se ha probado la corrección troposférica húmeda (WTC, por sus siglas en inglés), la superficie media del mar (MSS) y el modelo de marea. Las comparaciones con los mareógrafos revelaron que el modelo ECMWF para el WTC proporcionó un mayor número de datos válidos y el mismo nivel de exactitud que usando la corrección derivada del instrumento Radiómetro Avanzado de Microondas. Además, se ha observado la misma exactitud independientemente de la superficie media marina utilizada (Centre National d'Études Spatiales: CNES y Danmarks Tekniske Universitet: DTU). Finalmente, el modelo de mareas FES (Finite Element Solution) mejoró la exactitud en las estimas del nivel del mar con respecto al modelo DTU. La SDD promedio de SWOT KaRIn en la zona de estudio es de 8,3 cm (traza descendente) y 8,2 cm (traza ascendente). La distribución espacial de la SDD en las proximidades de la ubicación del mareógrafo (considerando un radio de 100 km) es considerablemente uniforme, independientemente del segmento de traza analizado.

Palabras clave: Altimetría swath, exactitud, nivel del mar.

Accuracy assessment of the sea level from the SWOT satellite using in-situ measurements

Abstract: *In this work we analyzed the accuracy of time series of sea level from the Ka-band interferometric altimeter (KaRIn) on-board the U.S-French SWOT satellite. The main innovation of this mission respect to previous satellite altimeter missions is its two-dimensional view of the earth surface. The objective of this work was to validate time series of sea level derived from swath KaRIn with the water levels from a tide gauge located at Huelva. To do this, we estimated the standard deviation of the differences (SDD) between the altimeter and the tide gauge data. From the options available to compute the sea level anomaly from SWOT, we tested the wet tropospheric correction (WTC), the mean sea surface (MSS), and the tidal model. The comparisons with the tide gauges revealed that the ECMWF model for the WTC gave a higher number of valid data and the same level of accuracy as the correction derived from the Advanced Microwave Radiometer instrument. The same accuracy was observed regardless of the MSS used (CNES and DTU). Finally, the FES tidal model improved the accuracy with respect to the DTU model. The average SDD of SWOT KaRIn is 8.3 cm (descending track) and 8.2 cm (ascending track). The spatial distribution of the SDD in the vicinity of the location of the tide gauge (considering a radius of 100 km) is quite uniform regardless the track segment analyzed. Our analysis excluded the area affected by the nadir looking altimeter Poseidon-3C on board the*

SWOT satellite.

Keywords: Swath altimetry, accuracy, sea level.

1. INTRODUCCIÓN

El satélite SWOT (*Surface Water and Ocean Topography*) se lanzó el 16 de diciembre de 2022 (Rodríguez *et al.*, 2017; Desai *et al.*, 2018). Se trata de una misión conjunta entre la NASA (National Aeronautics and Space Administration) y el CNES (Centre National d'Études Spatiales). El satélite transporta un instrumento de radar de apertura sintética (SAR) con interferómetro de franja de doble visión y trayectoria transversal que opera en banda de microondas Ka (KaRIn) y un altímetro convencional de clase Jason-3 de doble frecuencia (bandas Ku/C) de observación nadir (Poseidon-3C). El interferómetro SAR KaRIn es único con respecto a las misiones altimétricas anteriores, ya que proporciona mediciones en una franja de 120 km con dos subfranjas de 50 km desde 10 a 60 km a cada lado de la trayectoria terrestre del nadir, cubierta por el altímetro nadir. Es decir, por primera vez, es posible obtener observaciones en dos dimensiones de variables como el nivel del mar.

El objetivo principal de la misión SWOT es proporcionar con alta precisión y exactitud una visión bidimensional no sólo del nivel del mar, sino también de las aguas superficiales terrestres (Fu *et al.*, 2024). Algunos autores han demostrado que las medidas de KaRIn pueden resolver procesos oceánicos de pequeña escala con longitudes de onda de hasta 5 km, mucho más bajas que la resolución de 50 km de misiones altimétricas anteriores, e incluso mejores que la resolución esperada para SWOT (15 km) (Fu *et al.*, 2024, Archer *et al.*, 2020).

El objetivo de este trabajo es mostrar los resultados de la validación de las series temporales obtenidas con KaRIn, a bordo del satélite SWOT. Las series se han comparado con las obtenidas por un mareógrafo situado en Huelva, gestionado por Puertos del Estado.

2. ZONA DE ESTUDIO

El trabajo se centra en la sub-cuenca este del golfo de Cádiz (Figura 1). Esta zona ya se ha utilizado previamente para la validación de datos de diversas misiones altimétricas (Gómez-Enri *et al.*, 2018; Aldarias *et al.*, 2020). Esta sub-cuenca está limitada en su parte oeste por el cabo de Santa María y por la este por el estrecho de Gibraltar. Cuenta con una plataforma continental amplia (~50 km), limitada por la isóbata de 100 m. Como parte del golfo de Cádiz, se trata de un área compleja en la que se mezclan aguas del océano Atlántico y del mar Mediterráneo, así como aguas procedentes de las desembocaduras del río Guadalquivir, sistema Tinto-Odiel y río Guadiana. Se caracteriza por un régimen meso-mareal con un rango de marea que oscila entre 3,5 m (parte noroeste) y 2,5 m (estrecho de Gibraltar). Toda la zona está dominada por el giro anti-ciclónico de la corriente del golfo de Cádiz (GCC por sus singlas en inglés). También hay que destacar la existencia de una contracorriente costera

(CCC) que fluye hacia el oeste muy cerca de la costa (15-20 km de la costa), aunque el mecanismo que desencadena esta CCC está aún bajo estudio.

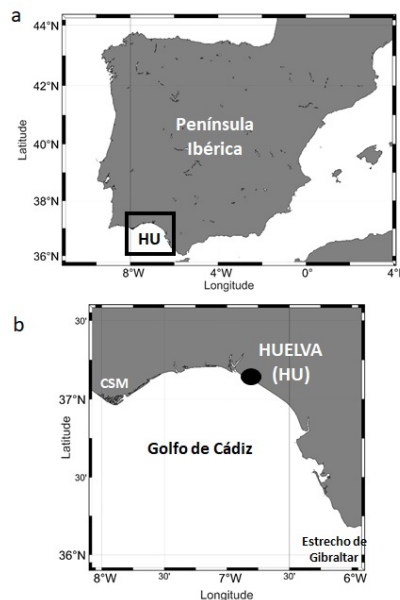


Figura 1. Zona de estudio. a) Ubicación en la península Ibérica. b) Sub-cuenca este del golfo de Cádiz, entre el cabo de San Vicente (CSM) y estrecho de Gibraltar. El punto negro indica la posición del mareógrafo de Huelva.

3. MATERIAL Y MÉTODOS

3.1. SWOT

Los datos SWOT se obtuvieron de la herramienta de alto nivel para la extracción interactiva de datos (HiTIDE) disponible en: <https://hitide.podaac.earthdatacloud.nasa.gov/> (doi: 10.5067/SWOT-SSH-2.0). Del conjunto de productos disponibles, se seleccionó el 'Expert', versión C de Nivel 2 de KaRIn Low Rate (LR). La versión D, que posee diversas actualizaciones que prevé mejorar la calidad del dato SWOT aún no está disponible en el periodo objeto de estudio. Los datos abarcaron 1,5 años (28 ciclos con resolución temporal de 21 días) desde el comienzo de la misión científica, es decir, desde julio de 2023 hasta febrero de 2025. El producto está disponible en una cuadrícula regular de 2 km × 2 km. Se utilizaron las dos trazas (*tracks*) más cercanas al área de estudio, una ascendente (#447) y otra descendente (#154).

3.2. Datos in-situ

La validación de los datos altimétricos de SWOT LR-2D se realizó usando un mareógrafo radar con datos disponibles gratuitamente a través de Puertos del Estado (<https://www.puertos.es/servicios/oceanografia>). Se utilizó el producto de nivel del mar con frecuencia de muestreo de 5 minutos para asegurar las mediciones más cercanas en tiempo a las mediciones SWOT. El

radar Miros cuenta con una precisión de 1 mm, operando a una frecuencia de 2 Hz formando parte del Servicio Permanente del Nivel Medio del Mar y del Sistema Mundial de Observación del Nivel del Mar, por lo que los datos se someten a un estricto control de calidad y mantenimiento (Pérez *et al.*, 2013) para garantizar su continuidad y trazabilidad.

3.3. Corrección Atmosférica Dinámica (DAC)

Los datos in-situ no se corrigen por los efectos atmosféricos (corrección DAC). Para comparar los datos del mareógrafo y del altímetro KaRIn, se debe aplicar la denominada Corrección Atmosférica Dinámica (DAC) a ambos instrumentos. Esta corrección está disponible globalmente en una cuadrícula regular de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ con una resolución temporal de 6 horas. El producto, accesible vía FTP, se genera de manera rutinaria por el *Collecte Localisation Satellites* utilizando el modelo Mog2D (Lynch y Gray, 1979) de Legos y distribuido por Aviso+, con el apoyo del CNES en: <https://www.aviso.altimetry.fr/>. (doi: 10.24400/527896/a01-2022.001).

3.4. Metodología

3.4.1. Series temporales de Anomalía del Nivel del Mar (SLA) de SWOT

Se estimó la Anomalía del Nivel del Mar (SLA por sus siglas en inglés) en cada una de las celdas con datos disponibles de SWOT, siguiendo (Eq. 1).

$$SLA_{SWOT} = ssha_{karin} + height_{cor_xover} \quad (1)$$

donde *ssha_karin* es la SLA obtenida con el producto utilizado al que se le han aplicado todas las correcciones necesarias, *height_cor_xover* es una corrección a la altura a partir de la calibración cruzada entre los datos KaRIn/KaRIn y las mediciones KaRIn/Poseidon-3C en diferentes pasadas y considerando una ventana temporal que rodea la medición de la altura de la superficie del mar. A modo de ejemplo, se muestra la SLA antes (Figura 2.a) y después (Figura 2.b) aplicando la corrección *height_cor_xover*. Se seleccionó el ciclo 1 (26/07/2023) de la traza descendente #154. El efecto de esta corrección sobre la SLA se aprecia claramente, ya que la Figura 2.b muestra una imagen más realista de la variabilidad espacial del nivel del mar en la zona.

3.4.2. Series temporales de Anomalía del Nivel del Mar (SLA) de los datos in-situ

La SLA se estimó siguiendo (Eq. 2).

$$SLA_{MAR} = NM - predicción\ marea - DAC \quad (2)$$

donde *NM* es el nivel del mar medido por el mareógrafo, *predicción marea* elimina las mareas usando un análisis armónico estándar y *DAC* se obtiene interpolando en tiempo y espacio a partir de los mapas de 6 horas de DAC.

3.4.3. Exactitud de los datos SWOT

La exactitud de la SLA procedente de SWOT se estimó utilizando la desviación estándar de las diferencias (SDD). Debido a que ambos conjuntos de datos no están referenciados al mismo cero, antes de estimar la SDD, se restó la media temporal correspondiente a cada una de las series temporales (*SLA_SWOT*, y *SLA_MAR*). La

SDD indica cuánto varía la observación (la diferencia entre el altímetro y el TG) con respecto a su media. El cálculo de la SDD se realizó en cada celda de la malla de posiciones con datos de SWOT. Sólo se tuvieron en cuenta aquellas posiciones que estuviesen a una distancia de 100 km de la ubicación del mareógrafo.

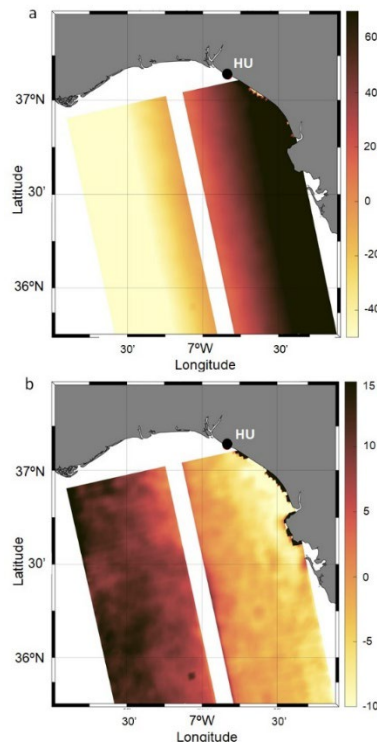


Figura 2. SLA según la trayectoria descendente #154 para el ciclo 1 (26/07/2023) antes (a) y después (b) de aplicar la corrección *height_cor_xover*. El punto negro muestra la posición del mareógrafo (HU).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En un primer análisis (resultados no mostrados en este trabajo), se determinó qué conjunto de correcciones eran las más adecuadas para estimar *SLA_SWOT*. Basándonos en la comparación con los datos in-situ, el mejor conjunto de correcciones es: ECMWF_WTC (que usa la corrección troposférica húmeda del modelo del ECMWF), MSS_CNES (correspondiente a la superficie media marina del CNES) y tidal_FES (modelo de marea FES2014b).

La Figura 3 muestra la variabilidad espacial de *SDD_SWOT* para las trazas seleccionadas: #154 y #447 (Figuras 3.a y 3.b, respectivamente). Se muestra la variabilidad espacial del *SDD_SWOT* para todos los puntos de cuadrícula válidos considerando una distancia máxima de 100 km al mareógrafo. Se observa una precisión que oscila entre 5 y 12 cm en ambas trazas, con una moderada variabilidad espacial. La Figura 3 muestra también la ubicación de las trazas más cercanas al mareógrafo del satélite Sentinel-3A. La exactitud (SDD) de los datos de SLA de esta misión ha sido analizada en un estudio previo (Aldarias *et al.*, 2020). En un trabajo que se encuentra en su segunda revisión, los autores han comparado la SDD de ambas misiones

durante el periodo de tiempo con datos de SWOT. Los resultados indican que SWOT muestra valores de SDD ligeramente más altos a los estimados con Sentinel-3A, lo cual estaría indicando una ligera mejor calidad de este último en nuestra zona de estudio. Aún existen pocos trabajos enfocados en la validación de SWOT. En un trabajo reciente, Zhu *et al.* (2025) encontraron errores cuadráticos medios (estadístico equiparable al SDD) similares a los obtenidos en nuestra zona de estudio.

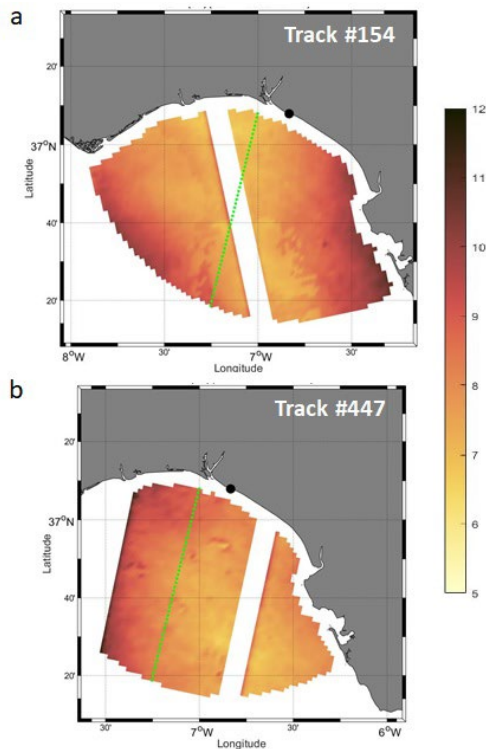


Figura 3. Distribución espacial del SDD de SLA_SWOT para la traza #154 (a) y #447 (b) en cada una de las celdas que componen la malla de datos. El hueco en blanco indica la zona de influencia de las medidas nadir del radar altimétrico Poseidon-3C a bordo de SWOT.

5. CONCLUSIONES

Del análisis de los resultados obtenidos en este trabajo, se deducen las siguientes conclusiones.

La exactitud de SWOT KaRIn es considerablemente uniforme a lo largo del área utilizada en este estudio, con independencia de la traza utilizada. Esto demuestra que no existen diferencias entre trazas ascendentes y descendentes. El valor promedio de la SDD es 8,3 cm (#154) y 8,2 cm (#447). No obstante, el periodo de tiempo utilizado (1,5 años: 28 ciclos), no es lo suficientemente extenso como para asegurar la robustez de los resultados obtenidos. Además, en un futuro estudio se utilizarán los datos SWOT en su versión D, que prevé una mejora significativa en la calidad y consistencia de las mediciones de KaRIn (refinamiento de calibración y algoritmos, actualización de modelos geofísicos, etc.), respecto de la versión C usada en este trabajo.

6. AGRADECIMIENTOS

Este estudio se realizó utilizando datos de nivel del mar de PO.DAAC (Jet Propulsion Laboratory) SWOT KaRIn (doi: 10.5067/SWOT-SSH-2.0). Los autores también agradecen a Puertos del Estado por proporcionar datos de nivel del mar in-situ. La corrección atmosférica dinámica fue proporcionada por Aviso (doi: 10.24400/527896/a01-2022.001).

7. REFERENCIAS

- Aldarias, A., Gómez-Enri, J., Laiz, I., Tejedor, B., Vignudelli, S., & Cipollini, P. Validation of Sentinel-3A SRAL Coastal Sea Level Data at High Posting Rate: 80 Hz. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 1–13, 2020, <https://doi.org/10.1109/tgrs.2019.2957649>.
- Archer, M. R., Li, Z., & Fu, L. L. Increasing the space–time resolution of mapped sea surface height from altimetry. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 124, e2019JC015878, 2020, <https://doi.org/10.1029/2019JC015878>.
- Desai, S., Fu, L. L., Cherchali, S., & Vaze, P. Surface Water and Ocean Topography Mission (SWOT) Project science requirements document. Technical Report JPL D-61923., Jet Propulsion Laboratory, National Aeronautics and Space Administration, Pasadena, 2018.
- Fu, L. L., Pavelsky, T., Cretaux, J. F., Morrow, R., Farrar, J. T., Vaze, P., et al., The Surface Water and Ocean Topography Mission: A breakthrough in radar remote sensing of the ocean and land surface water,” *Geophysical Research Letters*, 51, e2023GL107652, 2024, <https://doi.org/10.1029/2023GL107652>.
- Gómez-Enri, J., Vignudelli, S., Cipollini, P., Coca, J. & González, C. J. Validation of CryoSat-2 SIRAL sea level data in the eastern continental shelf of the Gulf of Cadiz (Spain). *Advances in Space Research*, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.10.042>.
- Lynch, D. R. & Gray, W. G. A wave equation model for finite element tidal computations. *Computers and Fluids*, 7 (3), 207–228, 1979, [https://doi.org/10.1016/0045-7930\(79\)90037-9](https://doi.org/10.1016/0045-7930(79)90037-9).
- Pérez, B., Álvarez, F. E., Pérez, S., de Alfonso, M., & Vela, J. Use of tide gauge data in operational oceanography and sea level hazard warning systems”. *Journal of Operational Oceanography*, 6, (2), 1–18, 2013, <https://doi.org/10.1080/1755876X.2013.11020147>.
- Rodríguez, E., Esteban Fernandez, D., Peral, E., Chen, C. W., De Bleser, J. W., & Williams, B. Wide-swath altimetry,” In *Satellite altimetry over oceans and land surfaces*, 1st ed. D. Stammer and A. Cazenave (Eds.), Taylor & Francis, CRC Press, 2017, pp. 71–112. <https://doi.org/10.1201/9781315151779-2>.
- Zhu H, Peng F, & Shen Y. Validation of Sea Level Anomalies from the SWOT Altimetry Mission Around the Coastal Regions of East Asia and the US West Coast. *Water*. 2025 17(21): 3066. <https://doi.org/10.3390/w17213066>.