

Millán Roldán, M.; Pellón de Pablo, E.; Gomes da Silva, P. El potencial del SAR para el análisis de cambios morfológicos en playas: tendencias actuales y nuevas fronteras

El potencial del SAR para el análisis de cambios morfológicos en playas: tendencias actuales y nuevas fronteras

Millán Roldán, María del Carmen ¹ Pellón de Pablo, Erica ¹ Gomes da Silva, Paula ¹

¹ IHCantabria - Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria, Santander, Spain, España

ORCID: Millán Roldán [0009-0006-1302-8442](https://orcid.org/0009-0006-1302-8442) Pellón de Pablo [0000-0002-5742-9225](https://orcid.org/0000-0002-5742-9225) Gomes da Silva [0000-0003-4766-8449](https://orcid.org/0000-0003-4766-8449)

Correspondencia: millanmc@unican.es pellone@unican.es gomesp@unican.es

RESUMEN

La monitorización continua de las zonas costeras es de gran relevancia por su naturaleza dinámica y su alta exposición a riesgos climáticos y presiones antrópicas. Ante la escasez de mediciones in situ, los datos satelitales han revolucionado el sector, con sensores SAR permitiendo adquisiciones independientes de la iluminación y la nubosidad. Sin embargo, la aplicación de SAR en entornos costeros sigue siendo limitada y fragmentada. Por ello, el objetivo de este trabajo es analizar el estado actual de la detección de líneas de costa y topografías intermareales mediante imágenes SAR e identificar los principales factores que condicionan su rendimiento y las futuras líneas de investigación necesarias para potenciar sus ventajas y favorecer una toma de decisiones más robusta. Para ello, se analizan estudios previos evaluando elecciones metodológicas recurrentes, incluyendo selección de banda y polarización, datos de referencia y entornos de estudio, complementada con un caso práctico utilizando imágenes Sentinel-1 en condiciones ambientales variadas. Se evidencia que el rendimiento de la extracción de líneas de costa con SAR depende fuertemente del contexto morfodinámico, la configuración del sensor y las decisiones de procesamiento, sin existir actualmente configuraciones óptimas universalmente válidas. La escasa intercomparación sistemática entre sitios y la fragmentación metodológica limitan la transferibilidad de los métodos. La principal barrera para su operatividad es la ausencia de datos de referencia homogéneos y fiables y la falta de conocimiento de las interacciones del radar con estos entornos dinámicos.

Palabras clave: SAR; Monitorización costera; Línea de costa; Topografía intermareal; Imágenes satelitales


Fecha de recepción: 16 febrero 2026 · Fecha de aceptación: 16 febrero 2026

El potencial del SAR para el análisis de cambios morfológicos en playas: tendencias actuales y nuevas fronteras

Millán Roldán, María del Carmen ⁽¹⁾, Pellón de Pablo, Erica ⁽¹⁾, Gomes da Silva, Paula ⁽¹⁾

⁽¹⁾ IHCantabria - Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria, Santander, Spain, España.

 0009-0006-1302-8442, millanmc@unican.es ;  0000-0002-5742-9225, pellone@unican.es

 0000-0003-4766-8449, gomesp@unican.es

Resumen: La monitorización continua de las zonas costeras es de gran relevancia por su naturaleza dinámica y su alta exposición a riesgos climáticos y presiones antrópicas. Ante la escasez de mediciones *in situ*, los datos satelitales han revolucionado el sector, con sensores SAR permitiendo adquisiciones independientes de la iluminación y la nubosidad. Sin embargo, la aplicación de SAR en entornos costeros sigue siendo limitada y fragmentada. Por ello, el objetivo de este trabajo es analizar el estado actual de la detección de líneas de costa y topografías intermareales mediante imágenes SAR e identificar los principales factores que condicionan su rendimiento y las futuras líneas de investigación necesarias para potenciar sus ventajas y favorecer una toma de decisiones más robusta. Para ello, se analizan estudios previos evaluando elecciones metodológicas recurrentes, incluyendo selección de banda y polarización, datos de referencia y entornos de estudio, complementada con un caso práctico utilizando imágenes Sentinel-1 en condiciones ambientales variadas. Se evidencia que el rendimiento de la extracción de líneas de costa con SAR depende fuertemente del contexto morfodinámico, la configuración del sensor y las decisiones de procesamiento, sin existir actualmente configuraciones óptimas universalmente válidas. La escasa intercomparación sistemática entre sitios y la fragmentación metodológica limitan la transferibilidad de los métodos. La principal barrera para su operatividad es la ausencia de datos de referencia homogéneos y fiables y la falta de conocimiento de las interacciones del radar con estos entornos dinámicos.

Palabras clave: SAR; Monitorización costera; Línea de costa; Topografía intermareal; Imágenes satelitales

SAR's potential for analyzing morphologic changes in beaches: current trends and new frontiers

Abstract: Continuous monitoring of coastal zones is highly relevant given their dynamic nature and strong exposure to climate-related hazards and anthropogenic pressures. In the absence of extensive *in situ* measurements, satellite data have revolutionized the field, with Synthetic Aperture Radar (SAR) sensors offering significant advantages by enabling day and night acquisitions under cloud-covered conditions. However, the application of SAR in coastal environments remains limited and fragmented. Therefore, the objective of this work is to analyze the current state of SAR-based shoreline and intertidal topography detection, identifying the main factors controlling method performance and the future research directions required to fully exploit its potential and promote more robust decision-making. To this end, a structured analysis of previous studies is conducted, assessing recurrent methodological choices including selection of band and polarization, ground truth and study site, complemented by a case study using Sentinel-1 imagery in varied environmental conditions. The results demonstrate that shoreline extraction performance strongly depends on the morphodynamic context, sensor configuration and processing decisions, with no universally optimal parameter settings currently identified. The limited systematic intercomparison between sites and methodological fragmentation constrain transferability. The main barrier to operational implementation is the lack of homogeneous and reliable reference data, together with insufficient understanding of radar interactions within these dynamic coastal environments.

Keywords: SAR; Coastal monitoring; Shoreline; Intertidal topography; Satellite imagery

1. INTRODUCCIÓN

Las zonas costeras son entornos altamente dinámicos, albergan una parte significativa de la población mundial y están expuestas a riesgos climáticos relevantes. Su monitorización, tradicionalmente limitada a un número reducido de playas, ha experimentado un notable avance con el desarrollo de la observación de la Tierra desde satélite, siendo la línea de costa un parámetro clave en estudios de evolución costera.

La detección de la línea de costa mediante sensores ópticos ha sido ampliamente utilizada gracias a la facilidad de interpretación de las imágenes y a su elevada resolución espacial y temporal, lo que ha permitido el desarrollo de herramientas semiautomáticas que constituyen el estado del arte, como *CoastSat* (Vos *et al.*, 2019). Asimismo, estos datos han posibilitado la estimación de topografías intermareales mediante el *Waterline Method*, mejorando la representación de procesos relevantes como la inundación costera (Mason *et al.*, 1995).

No obstante, los sensores ópticos presentan limitaciones significativas, ya que no permiten la adquisición de observaciones útiles en condiciones de nubosidad o durante la noche, lo que resulta especialmente restrictivo en regiones con climatología adversa y reduce de forma considerable la disponibilidad de datos. En este contexto, los sensores de Radar de Apertura Sintética (SAR) constituyen una alternativa prometedora, al operar de manera independiente de las condiciones meteorológicas y de iluminación, proporcionando un volumen de datos significativamente mayor en regiones persistentemente nubosas (Savastano *et al.*, 2024). Además, la señal radar aporta información sobre propiedades físicas de la superficie, como la rugosidad, la pendiente o la humedad. En particular, en la detección de la línea de costa, los sensores SAR permiten discriminar la frontera entre mar y tierra aprovechando el contraste de retrodispersión entre ambos medios, siendo la de tierra generalmente más elevada.

A pesar del reconocido potencial del SAR en diferentes ámbitos científicos, su aplicación en zonas costeras sigue siendo limitada. Esto se debe principalmente a la complejidad en la interpretación de las imágenes en zonas de transición tierra-agua. Entre los factores que dificultan su análisis se encuentran el ruido *speckle*, las distorsiones geométricas inherentes a la geometría radar y la elevada variabilidad de la morfología costera, influenciada por el rango mareal, la dinámica sedimentaria y las condiciones de oleaje. Estos factores pueden introducir ruido en la señal y afectan de forma variable en función de los parámetros de adquisición del sensor, como la polarización, la banda o la geometría orbital. Como consecuencia, existe un número reducido de metodologías consolidadas para la detección de la línea de costa mediante SAR, así como una notable fragmentación en los enfoques desarrollados.

En este contexto, el presente trabajo realiza un análisis crítico de estudios centrados en la detección de la línea de costa mediante datos SAR, con el objetivo de identificar patrones comunes, limitaciones y principales fuentes de incertidumbre. Como complemento, se

presenta un caso práctico comparativo que ilustra la sensibilidad de la digitalización de la línea de costa frente a distintos parámetros de adquisición y condiciones ambientales. Los resultados obtenidos permiten orientar futuros esfuerzos hacia la optimización de técnicas basadas en SAR y el desarrollo de metodologías adaptadas a diferentes tipologías de ambientes costeros.

2. METODOLOGÍA

2.1. Análisis del estado actual

Se realiza un análisis crítico de 30 estudios seleccionados utilizando las palabras clave “SAR”, “*coastline*”, “*coast*”, “*coastal bathymetry*” e “*intertidal*” en Scopus, considerando únicamente trabajos centrados en la extracción de líneas de costa y en la aplicación del *Waterline Method*.

Este conjunto permite identificar patrones comunes en la selección de parámetros de adquisición, incluyendo polarización, banda y geometría orbital, así como en los procedimientos de pre y posprocesado. Asimismo, se analiza la tipología de los ambientes costeros considerados en cada estudio con el objetivo de evaluar la generalidad de los métodos propuestos y sus limitaciones en función del contexto morfodinámico.

A partir de este análisis comparativo, se identifican vacíos de conocimiento y se plantean líneas de investigación orientadas a mejorar la robustez, transferibilidad y aplicabilidad operacional de las técnicas SAR en la monitorización costera.

2.2. Caso práctico

Con el objetivo de mostrar la influencia de distintos parámetros, se extraen líneas de costa en dos fechas próximas a la adquisición de una topobatimetría de alta resolución (14 de septiembre de 2021) en la playa de Salinas (Asturias, España), bajo condiciones de oleaje y nivel de marea contrastadas.

Se analizan imágenes de Sentinel-1 en modo de adquisición *Interferometric Wide Swath* y producto *Ground Range Detected*. La cadena de preprocesado incluye corrección orbital, eliminación de ruido térmico y de bordes, calibración radiométrica, aplanamiento de terreno, filtrado de *speckle* mediante filtro *Lee Sigma*, conversión a decibelios, corrección geométrica *Doppler* y recorte a subconjunto. Posteriormente, se aplican técnicas de mejora de imagen mediante descomposición *wavelet* y difusión anisotrópica. La segmentación se realiza mediante el método de *Otsu*, y la extracción de la línea de costa se lleva a cabo mediante el algoritmo *Marching Squares*.

Para cada fecha, se comparan las líneas obtenidas con las polarizaciones VV (transmisión y recepción con polarización vertical) y VH (transmisión en vertical y recepción en horizontal) frente al contorno del nivel del mar derivado de la topobatimetría en el instante de adquisición de las imágenes (línea de referencia). La comparación se realiza mediante transectos perpendiculares a la línea de costa. En aquellos casos en los que una misma línea presenta múltiples intersecciones con un transecto, se selecciona la intersección más tierra adentro.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Análisis del estado actual

El análisis de la literatura permite identificar los principales factores que condicionan la detección de la línea de costa mediante imágenes SAR. La configuración del sensor influye de manera determinante en la detectabilidad de la frontera tierra-agua. Las bandas de menor longitud de onda tienden a mejorar la detección (Angelini *et al.*, 2025), si bien su selección suele estar condicionada por la disponibilidad de datos. En cuanto a la polarización, no existe consenso sobre la configuración óptima, aunque Haarpaintner *et al.* (2021) sugiere un mejor rendimiento de VV en condiciones de marea baja y de VH en marea alta, lo que indica una fuerte dependencia de las condiciones locales para seleccionar la polarización. Asimismo, el uso de doble polarización ha mostrado mejores resultados que los canales individuales (Ferrentino *et al.*, 2021). La falta de experimentación sistemática e intercomparación limita la identificación de configuraciones óptimas.

El rendimiento de los métodos varía significativamente en función del entorno costero. La presencia de sedimentos gruesos favorece el contraste tierra-agua, mientras que se observan mayores errores en zonas con estructuras artificiales, barras arenosas, estuarios o lagunas (Angelini *et al.*, 2025; Tajima *et al.*, 2019). La orientación de la costa respecto a la geometría de adquisición también resulta relevante en presencia de relieve en la zona supramareal, como dunas, acantilados o edificaciones (Savastano *et al.*, 2024). Además, las condiciones de viento y oleaje incrementan la retrodispersión del agua, pudiendo desplazar la posición aparente de la línea de costa dependiente de la marea. Algunos estudios abordan este problema mediante la preselección de imágenes en función de estas condiciones (Tajima *et al.*, 2019).

La mayoría de los trabajos se centran en un único entorno, generalmente morfodinámicamente simples, lo que limita la generalización de los resultados. Las comparaciones entre múltiples sitios muestran que métodos eficaces en playas micromareales reducen su rendimiento en entornos más complejos, como llanuras macromareales o estuarios, lo que evidencia que el SAR detecta una frontera condicionada por la morfología local y los mecanismos de dispersión (Angelini *et al.*, 2025). En este contexto, los enfoques basados en aprendizaje automático requieren conjuntos de entrenamiento que abarquen una amplia diversidad de entornos para

garantizar su transferibilidad. Algunos estudios aplican posprocesados para eliminar *outliers* en función de la distancia a una referencia (Savastano *et al.*, 2024), aunque este enfoque puede omitir errores dentro de la zona intermareal o descartar eventos extremos reales.

Desde una perspectiva general, una de las principales limitaciones es la ausencia de datos de referencia homogéneos y fiables. La validación suele basarse en digitalizaciones manuales o en conjuntos de datos heterogéneos, lo que introduce incertidumbre y dificulta evaluar de forma robusta la influencia de los parámetros de adquisición y su interacción con la morfología costera. Además, la interpretación de imágenes SAR resulta menos intuitiva que la de datos ópticos, lo que puede dar lugar a discrepancias significativas en la digitalización manual (Zollini *et al.*, 2020).

Finalmente, la fragmentación de enfoques, la limitada disponibilidad de código, la ausencia de *benchmarks* abiertos y la dependencia de ajustes manuales dificultan la reproducibilidad y la continuidad entre estudios. Estos factores constituyen una barrera significativa para el desarrollo de aplicaciones operacionales basadas en series temporales largas y análisis a escala regional.

3.2. Caso práctico

La Figura 1 muestra las líneas de costa extraídas para ambas polarizaciones (VV y VH) en dos fechas con condiciones contrastadas de oleaje y nivel del mar (9 y 15 de septiembre), evidenciando la influencia de estos factores en el proceso de detección.

Las métricas presentadas en la Tabla 1 indican que, en las imágenes evaluadas de Salinas, la polarización VV proporciona mejores resultados en condiciones de oleaje calmado y niveles de mar elevados. En la mitad occidental de la playa, ambas polarizaciones generan líneas similares, en un entorno urbano con escaso ancho de playa seca que puede llegar a desaparecer en condiciones de marea alta, alcanzando el paseo marítimo. En contraste, en la mitad oriental, caracterizada por la presencia de un sistema dunar y mayores anchos de playa, se observan diferencias más marcadas. En este sector, la polarización VH tiende a detectar el pie de la duna o el inicio de la vegetación, mientras que VV se aproxima más a la interfaz agua-tierra.

En condiciones de oleaje más energético y niveles de mar más bajos, las líneas obtenidas presentan una mayor sinuosidad y errores significativamente superiores

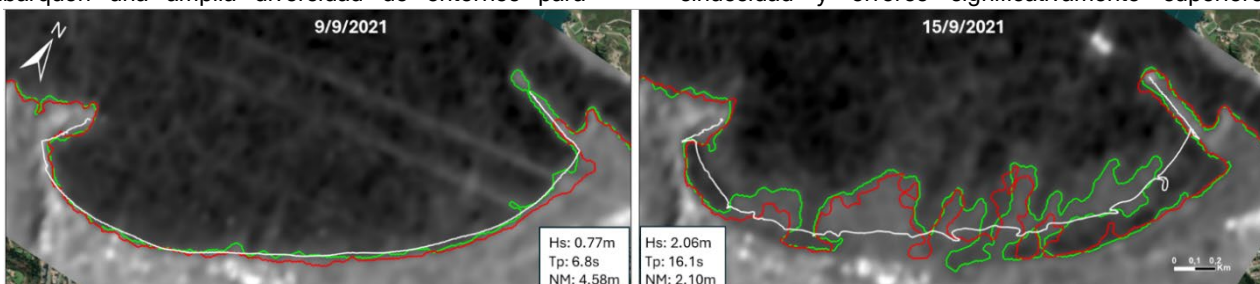


Figura 1. Líneas de costa extraídas en Salinas en dos fechas distintas, comparando la línea de referencia (blanco), la extracción con polarización VV (verde) y VH (rojo). De fondo la imagen preprocesada, previa a la segmentación correspondiente en ambos casos a VV.

respecto a la referencia. Tal como se observa en la Figura 1, las zonas próximas a la orilla muestran una retrodispersión mayor de la esperada para superficies de agua, posiblemente asociada a procesos de rotura del oleaje y a la exposición de formas intermareales con mayores niveles de humedad que la arena seca, lo que introduce errores en la detección.

Aunque en estas condiciones VH muestra resultados ligeramente mejores en términos métricos (Tabla 1), el análisis visual de la Figura 1 indica que ambos métodos fallan en el intento de detectar la interfaz agua tierra, y resalta la complejidad a la hora de definir el método óptimo en condiciones de mar energético.

Tabla 1. Métricas de error en metros para las dos fechas y las dos polarizaciones (VV verde y VH rojo): media, raíz del error cuadrático medio (RMSE), desviación típica, error absoluto medio (MAE) y desviación absoluta media (MAD).

Fecha	9/9/2021	15/9/2021
Media	3.29 / 24.55	41.25 / 52.15
RMSE	17.33 / 36.20	158.47 / 130.56
Desviación típica	17.28 / 27.02	155.46 / 121.60
MAE	14.06 / 30.42	144.31 / 113.70
MAD	13.26 / 17.74	126.26 / 93.17

Este caso práctico pone de manifiesto la fuerte influencia de factores como la polarización, el oleaje, el nivel del mar y la tipología del entorno costero en la extracción de la línea de costa. Asimismo, evidencia la necesidad de ampliar el análisis a un mayor número de condiciones y fechas para avanzar hacia metodologías más robustas y generalizables.

4. FUTUROS PASOS

Para consolidar el uso del SAR como herramienta operativa en estudios de morfodinámica costera, resulta prioritario mejorar la comprensión física de la señal en estos entornos y determinar qué indicadores de línea de costa pueden detectarse de forma fiable bajo distintas condiciones ambientales y de adquisición. En particular, es necesario analizar la influencia de factores como el estado mareal, la humedad del sedimento, la morfología de la playa y el oleaje en la respuesta de la retrodispersión y en la visibilidad de los distintos indicadores costeros.

Asimismo, se requieren evaluaciones comparativas sistemáticas de las configuraciones SAR, incluyendo bandas, polarizaciones, ángulos de incidencia y geometrías orbitales, aplicadas a una amplia variedad de tipologías costeras. Los resultados disponibles evidencian la ausencia de un método universal y la fuerte dependencia del rendimiento respecto al entorno, como el rango mareal, la orientación, la pendiente, el tamaño de grano o la presencia de elementos antrópicos, lo que pone de manifiesto la necesidad de desarrollar metodologías adaptativas.

Otro aspecto crítico es la disponibilidad de datos de referencia fiables y homogéneos. El desarrollo de bases de datos públicas, obtenidas mediante mediciones in situ

o imágenes de alta resolución y no únicamente por digitalización manual de imágenes SAR, resulta esencial para la validación robusta de métodos y el entrenamiento de modelos de aprendizaje automático, así como para mejorar la comparabilidad entre estudios. En este sentido, el acceso abierto a datos y algoritmos es clave para reducir la fragmentación actual y favorecer el avance coordinado del campo.

Finalmente, el avance hacia aplicaciones operacionales requiere la automatización de los flujos de trabajo, la integración de datos SAR y ópticos y la explotación de nuevas misiones satelitales, como NISAR, SWOT o Sentinel-1 Next Generation. Estas líneas permitirán el desarrollo de sistemas reproducibles y escalables, capaces de generar series temporales largas y análisis a escala regional.

5. REFERENCIAS

- Angelini, R., Angelats, E., Ribas, F., Luzi, G., Ciaccio, F. D., Mugnai, F., & Masiero, A. (2025). Enhanced SAR-Based Shoreline Extraction in Microtidal Beaches Through Improved Preprocessing of Sentinel-1 and TerraSAR-X Data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 1–17.
- Ferrentino, E., Buono, A., Nunziata, F., Marino, A., & Migliaccio, M. (2021). On the Use of Multipolarization Satellite SAR Data for Coastline Extraction in Harsh Coastal Environments: The Case of Solway Firth. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14, 249–257.
- Haarpaintner, J., Davids, C., Haarpaintner, J., & Davids, C. (2021). Mapping Atmospheric Exposure of the Intertidal Zone with Sentinel-1 CSAR in Northern Norway. *Remote Sensing*, 13(17).
- Mason, D. C., Davenport, I. J., Robinson, G. J., Flather, R. A., & McCartney, B. S. (1995). Construction of an inter-tidal digital elevation model by the 'Water-Line' Method. *Geophysical Research Letters*, 22(23), 3187–3190.
- Savastano, S., Gomes da Silva, P., Sánchez, J. M., Tort, A. G., Payo, A., Pattle, M. E., Garcia-Mondéjar, A., Castillo, Y., & Monteys, X. (2024). Assessment of Shoreline Change from SAR Satellite Imagery in Three Tidally Controlled Coastal Environments. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(1), Article 1.
- Tajima, Y., Wu, L., Fuse, T., Shimozone, T., & Sato, S. (2019). Study on shoreline monitoring system based on satellite SAR imagery. *Coastal Engineering Journal*, 61(3), 401–421.
- Vos, K., Splinter, K. D., Harley, M. D., Simmons, J. A., & Turner, I. L. (2019). CoastSat: A Google Earth Engine-enabled Python toolkit to extract shorelines from publicly available satellite imagery. *Environmental Modelling & Software*, 122, 104528.
- Zollini, S., Alicandro, M., Cuevas-González, M., Baiocchi, V., Dominici, D., & Buscema, P. M. (2020). Shoreline Extraction Based on an Active Connection Matrix (ACM) Image Enhancement Strategy. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(1), Article 1.