

Cartografía de la línea de costa y lagunas costeras de Cuba (2025) aplicando el índice WI2015 en imágenes landsat 8/9

MSc. Jorge Olivera Acosta*, MSc. Sergio Luis Lorenzo Sánchez, Lic. Claudia Cruz Lorenzo,
Ing. Eric Avila Rojas, Lic. Leyani Izquierdo Barrera

Instituto de Geofísica y Astronomía (IGA), Citma. Calle 212 No. 2906 e/ 29 y 31, Reparto La Coronela, Municipio La Lisa, La Habana, Cuba.

*Autor para correspondencia: yoyiga2010@gmail.com

Resumen

Introducción: El presente trabajo describe la actualización de la línea de contacto tierra-agua (línea de costa) y la delimitación de cuerpos de agua costeros (lagunas costeras) en Cuba mediante la aplicación del índice espectral de agua WI2015 (Water Index 2015), implementado en el Sistema de Información Geográfica SAGA. **Materiales y métodos:** Se procesaron 16 imágenes multispectrales de los satélites Landsat 8 y 9 correspondientes al período 2024-2025, garantizando la actualidad y relevancia de los resultados para el análisis de la dinámica costera. La metodología incluyó correcciones radiométricas, aplicación del índice WI2015, vectorización de resultados y cálculo de parámetros geométricos (perímetros y áreas) mediante QGIS V. 3.44.3. **Resultados:** Se evaluó la influencia de la oscilación de la marea en la posición de la línea de costa satelital, demostrando que para las condiciones cubanas con imágenes Landsat (resolución espacial de 30 m), el efecto de la marea es despreciable. La validación de campo realizada en el Rincón de Guanabo mediante un track con el empleo de GPS, confirmó un error horizontal menor a 15 m, inferior al tamaño del píxel de Landsat. **Conclusiones:** El WI2015 demostró ser una herramienta robusta y efectiva para la cartografía automatizada de ambientes costeros, ofreciendo resultados de gran exactitud para la gestión y monitoreo de estos ecosistemas..

Palabras claves: *línea de costa, lagunas costeras, índice espectral WI2015, Landsat 8/9, teledetección, SAGA GIS, Cuba.*

Mapping of the Cuban coastline and coastal lagoons (2025) applying the WI2015 index to Landsat 8/9 images

Abstract

Introduction: This study presents an updated delineation of the land–water interface (shoreline) and coastal water bodies (coastal lagoons) in Cuba through the application of the WI2015 spectral water index (Water Index 2015), implemented within the SAGA Geographic Information System (SAGA-GIS). **Materials and Methods:** Sixteen multispectral scenes acquired by Landsat 8 and Landsat 9 sensors over the 2024–2025 period were processed, ensuring temporal representativeness for coastal dynamics assessment. The methodological workflow comprised radiometric correction, computation of the WI2015 index, threshold-based classification, vectorization of extracted features, and derivation of geometric metrics (perimeter and area) using QGIS v. 3.44.3. **Results:** The effect of tidal variability on the position of the satellite-derived shoreline was quantitatively assessed. Results indicate that, under Cuban coastal conditions and given the 30 m spatial resolution of Landsat imagery, tidal influence on shoreline positioning is negligible. Field validation conducted at Rincón de Guanabo using GPS-based tracking yielded a horizontal positional error below 15 m, which is lower than the nominal Landsat pixel size. **Conclusions:** The WI2015 index demonstrated high robustness and reliability for the automated extraction and mapping of coastal environments, providing high-accuracy outputs suitable for coastal zone management and long-term environmental monitoring applications.

Keywords: *shoreline extraction, coastal lagoons, WI2015 spectral index, Landsat 8/9, remote sensing, SAGA-GIS, Cuba.*

1. Introducción

La exactitud en la delimitación o determinación de la línea de costa constituye un elemento fundamental para la gestión integrada de zonas costeras, la planificación del uso del territorio y la evaluación del riesgo de inundación por ascenso del nivel del mar (Turner et al., 2005). Tradicionalmente, la cartografía de líneas de costa se ha realizado mediante levantamientos topográficos de campo o fotogrametría aérea, métodos que resultan costosos, demandantes en recursos humanos y de tiempo, particularmente cuando se requiere cobertura a escala regional o nacional (Fisher et al., 2016).

La teledetección satelital ha emergido como una alternativa eficiente para el mapeo costero a diferentes escalas. Los satélites de la serie Landsat, operados conjuntamente por la NASA y el USGS, proporcionan datos multiespectrales de alta calidad desde 1972, con la constelación actual Landsat 8 (lanzado en 2013) y Landsat 9 (lanzado en 2021) ofreciendo cobertura global cada 16 días (8 días combinados) con resolución espacial de 30 m (escala 1:50000) en bandas multiespectrales (Roy et al., 2014; Markham et al., 2022).

La extracción de cuerpos de agua y líneas de costa a partir de imágenes satelitales puede realizarse mediante diferentes metodologías, incluyendo clasificadores supervisados, técnicas de subpíxel e índices espectrales (Ji et al., 2015; Du et al., 2022). Entre estos, los índices de agua basados en el análisis de bandas espectrales específicas, han demostrado ser particularmente efectivos por su simplicidad, reproducibilidad y capacidad de automatización (McFeeters, 1996; Xu, 2006; Feyisa et al., 2014).

El Índice de Agua Normalizado (NDWI) propuesto por McFeeters (1996) ha sido ampliamente utilizado en Cuba para la extracción de cuerpos de agua superficiales, empleando la combinación de las bandas del verde e infrarrojo cercano (NIR). Sin embargo, presenta limitaciones significativas en ambientes complejos, particularmente en la confusión con sombras topográficas, áreas urbanas densas y suelos húmedos (Xu, 2006). Posteriormente, Xu (2006) desarrolló el Índice de Agua de Diferencia Normalizada Modificado (MNDWI), que sustituye la banda NIR por la del infrarrojo de onda corta (SWIR), mejorando la separación agua-tierra pero manteniendo dificultades en ciertos contextos ambientales.

Fisher et al. (2016) desarrollaron el Water Index 2015 (WI2015), un índice lineal multibanda basado en análisis

discriminante lineal (LDA) que incorpora cinco bandas espectrales (verde, rojo, NIR, SWIR1 y SWIR2) con coeficientes específicos derivados de regresión estadística. Este índice fue diseñado explícitamente para superar las deficiencias de los índices tradicionales en la extracción de agua superficial con imágenes Landsat 8/9, ofreciendo mayor robustez en ambientes complejos con vegetación densa, suelos desnudos y áreas urbanas (Fisher et al., 2016; Wang et al., 2018).

En el contexto cubano, la actualización sistemática de la línea de costa adquiere relevancia estratégica dada la vulnerabilidad del archipiélago ante el cambio climático y como consecuencia, el ascenso del nivel del mar. No obstante, persisten interrogantes sobre la influencia de factores como la oscilación de la marea en la posición de la línea de costa satelital y la exactitud alcanzable con diferentes índices espectrales en las condiciones específicas del Caribe insular.

El objetivo del presente trabajo es actualizar la línea de costa y delimitar las lagunas costeras de Cuba obteniendo como resultados principales, dos productos vectoriales soportados sobre un Sistema de Información Geográfico (SIG) en formato .shp (borde costero y lagunas costeras), mediante la aplicación del índice espectral WI2015 a imágenes Landsat 8/9, evaluando la influencia de la marea en la posición de la línea de costa y validando la exactitud de los resultados mediante levantamientos de campo con GPS. Este último índice logró una discriminación más nítida y exacta entre el agua y el terreno seco, permitiendo una vectorización más confiable de la línea de costa y los límites de los cuerpos de agua internos, como marismas, estuarios y lagunas costeras.

2. Materiales y Métodos

2.1. Área de Estudio

El área de estudio comprende el territorio emergido de la República de Cuba, incluyendo la Isla de la Juventud y el archipiélago de los cayos adyacentes. La cobertura satelital de las imágenes Landsat (Path/Row) para la determinación cartográfica de la línea de contacto Tierra-Agua se muestra en la [figura 1](#).

El archipiélago cubano, está situado en la región insular del Caribe Noroccidental entre los 19°49' y 23°17' de latitud Norte y los 74°08' y 84°57' de longitud Oeste, constituye la mayor extensión territorial de las Antillas Mayores con una superficie emergida aproximada de 108,900 km² (CITMA, 2023). Su configuración geográfica

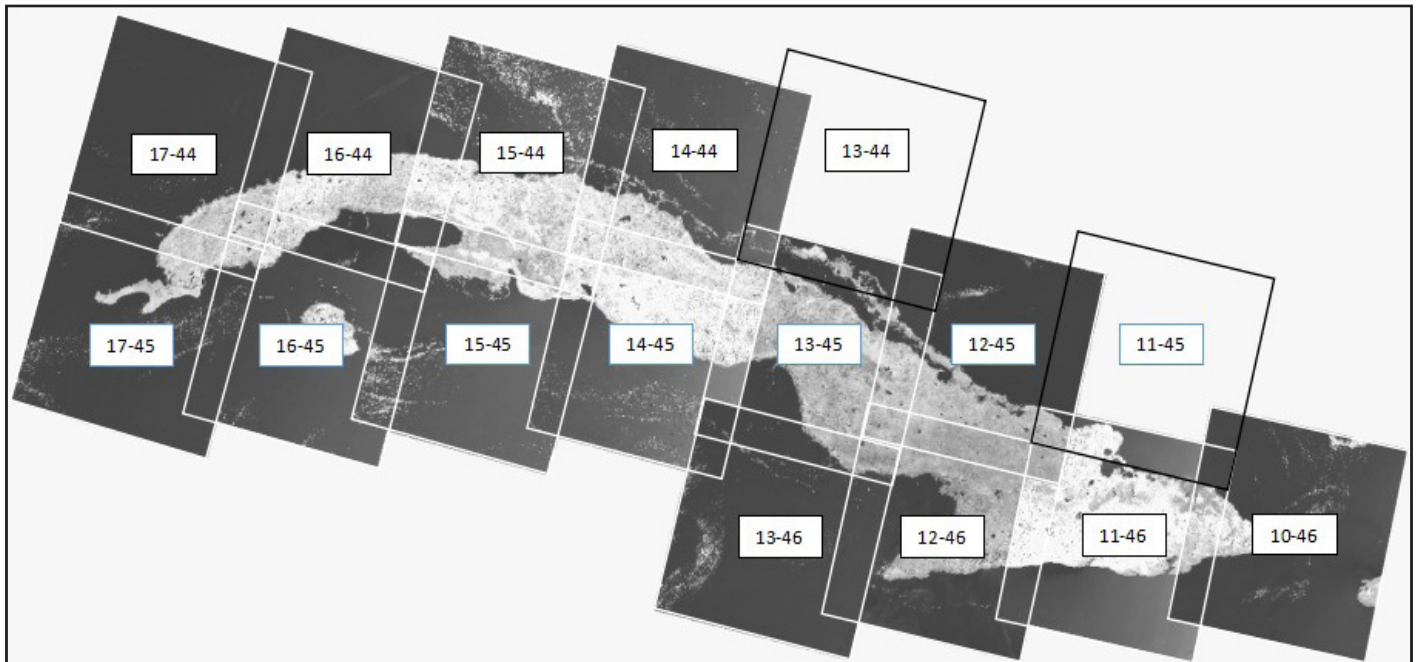


Figura 1. Vista del mosaico de imágenes Landsat 9, OLI-2 correspondientes a las bandas SWIR de onda corta que cubren el territorio de Cuba y que fueron utilizadas para la actualización de la línea de costa y las lagunas costeras.

Fuente: elaborada por los autores.

comprende la isla principal de Cuba, la Isla de la Juventud (2,200 km²) y más de 4,000 cayos e islotes distribuidos en cuatro sistemas arrecifales principales: los archipiélagos de Sabana-Camagüey, los Colorados, los Canarreos y los Jardines de la Reina (Perera Pérez et al., 2019). El litoral nacional presenta una longitud aproximada de 5,700 km en la isla principal, extendiéndose a 14,385 km si se consideran los perímetros de todos los cayos e islotes (Instituto de Geofísica y Astronomía, 2025). El territorio emergido de Cuba configura un escenario particularmente desafiante para la cartografía costera satelital, donde la delimitación exacta de la línea de contacto tierra-agua adquiere relevancia crítica para la evaluación de vulnerabilidad ante el ascenso del nivel del mar proyectado para los escenarios futuros 2050 y 2100.

La extensión costera cubana se caracteriza por una diversidad geomorfológica que incluye costas rocosas, acantilados, playas arenosas, costas de manglar y sistemas lagunares costeros.

2.2. Materiales (Datos Satelitales)

Se utilizaron 16 imágenes de los satélites Landsat 8 y 9 (figura 1), descargadas libremente desde el portal de la USGS Earth Explorer (earthexplorer.usgs.gov). De las imágenes procesadas, 9 corresponden al sensor OLI-2 de Landsat 9 y 7 al sensor OLI de Landsat 8. Las imágenes

cubren el período entre diciembre 2024 y julio 2026, con escenas seleccionadas considerando la menor cobertura nubosa posible (menor del 10 %). Las características principales de la constelación Landsat aparecen descritas en la tabla 1.

La nomenclatura de las imágenes satelitales Landsat Oli 8/9 que fueron utilizadas para la actualización de la línea de costa y las lagunas costeras se muestran en la tabla 2.

Los sensores OLI (Operational Land Imager) de Landsat 8 y OLI-2 de Landsat 9 captan radiación en 9 bandas espectrales con resolución espacial de 30 m (15 m en la banda pancromática) (tabla 3).


Flujo de trabajo (Workflow)

La figura 2 representa el diagrama de flujo metodológico para la extracción de la línea de costa y lagunas costeras mediante el índice espectral WI2015 aplicado a imágenes Landsat 8/9. El procedimiento comprende 8 etapas principales las cuales se describen en el workflow.

2.3. Procesamiento de imágenes

El procesamiento digital de imágenes se realizó utilizando el software SAGA-GIS (System for Automated Geoscientific Analyses) versión 9.11.1, de código abierto especializado en análisis geocientífico automatizado (Conrad et al., 2015). El flujo de trabajo implementado incluyó:

Tabla 1. Características del satélite Landsat Oli 8/9.

No.	Característica	Especificación	Satélite Landsat 9
1	Altitud orbital	705 km	
2	Inclinación orbital	98,2°	
3	Órbita	Casi polar, heliosíncrona	
4	Periodo de revolución	99 minutos (~14,5 órbitas/día)	
5	Tiempo de revisita	16 días (8 días combinado con Landsat 8)	
6	Hora de cruce ecuatorial	~10:00 am hora local (nodo descendente). En Cuba pasa entre 10:15-10:47	
7	Ancho de franja (swath)	185 km	
8	Tamaño de escena	185 km × 180 km	
9	Vida útil de diseño	5 años (consumibles para 10+ años)	
10	Producción de datos	>700 escenas por día	

Fuente: Elaborada por los autores.

Tabla 2. Nomenclatura de las imágenes utilizadas para obtener la línea de costa y lagunas costeras de Cuba.

No.	Imagen
1	LC08_L1TP_013045_20250307_20250312_02_T1_MTL
2	LC08_L1TP_013045_20250713_20250726_02_T1_MTL
3	LC08_L1TP_013046_20250307_20250312_02_T1_MTL
4	LC08_L1TP_014045_20250517_20250529_02_T1_MTL
5	LC08_L1TP_016045_20250413_20250424_02_T1_MTL
6	LC08_L1TP_017044_20250607_20250617_02_T1_MTL
7	LC08_L1TP_017045_20250303_20250311_02_T1_MTL
8	LC09_L1TP_010046_20250310_20250310_02_T1_MTL
9	LC09_L1TP_011046_20250520_20250520_02_T1_MTL
10	LC09_L1TP_012045_20250119_20250119_02_T1_MTL
11	LC09_L1TP_012046_20250119_20250119_02_T1_MTL
12	LC09_L1TP_014044_20250407_20250410_02_T1_MTL
13	LC09_L1TP_015044_20250414_20250415_02_T1_MTL
14	LC09_L1TP_015045_20241223_20241223_02_T1_MTL
15	LC09_L1TP_015045_20250414_20250415_02_T1_MTL
16	LC09_L1TP_016044_20250320_20250320_02_T1_MTL

Fuente: Elaborada por los autores.

Corrección radiométrica: Conversión de números digitales (DN) a reflectancia en el tope de la atmósfera (TOA) y posterior corrección atmosférica para obtener reflectancia de superficie, utilizando los parámetros de calibración incluidos en los metadatos de las imágenes (MTL files) y modelos de transferencia radiativa.


Aplicación del índice WI2015: El índice se calculó mediante la formulación de Fisher et al. (2016):

$$WI2015 = 1.7204 + 171 \times \rho_{Green} + 3 \times \rho_{Red} - 70 \times \rho_{NIR} - 45 \times \rho_{SWIR1} - 71 \times \rho_{SWIR2}$$

Donde ρ representa la reflectancia de superficie en cada banda espectral. Los coeficientes fueron derivados mediante análisis discriminante lineal sobre miles de muestras de entrenamiento, optimizando la separación entre agua y no-agua (Fisher et al., 2016).

Umbralización y clasificación: A diferencia de los índices normalizados (NDWI, MNDWI) cuyos valores

Tabla 3. Características de las imágenes Landsat 9.

Banda	Nombre	Longitud de onda	Resolución espacial. (m)	OLI - 2
1	Coastal / Aerosol	0,43 - 0,45 μm	30	
2	Azul (blue)	0,45 - 0,51 μm	30	
3	Verde (Green)	0,53 - 0,59 μm	30	
4	Rojo (Red)	0,64 - 0,67 μm	30	
5	Ingrarrojo cercano (NIR)	0,85 - 0,88 μm	30	
6	SWIR - 1	1,57 - 1,65 μm	30	
7	SWIR - 2	2,11 - 2,29 μm	30	
8	Pancromático (PAN)	0,50 - 0,68 μm	15	
9	Cirrus	1,36 - 1,38 μm	30	

Fuente: <https://www.gisandbeers.com/caracteristicas-las-imagenes-satelite-landsat-9/>

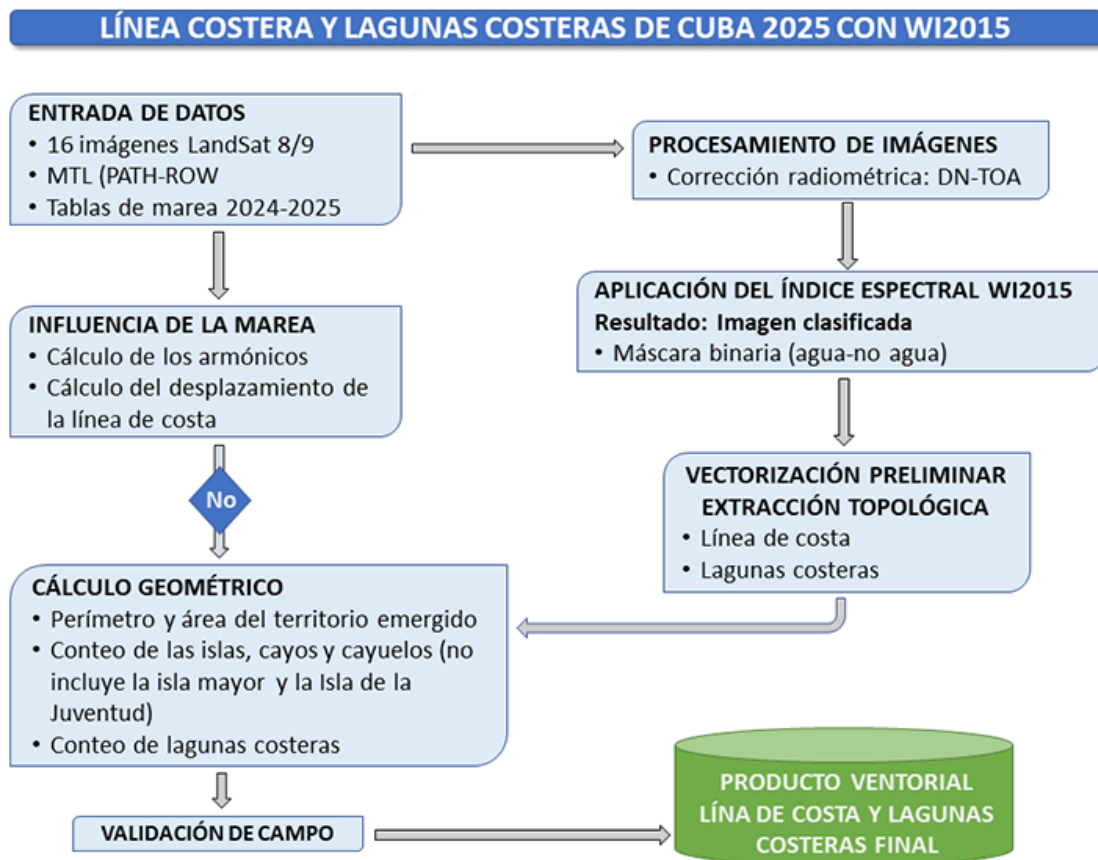


Figura 2. flujo de trabajo para la extracción de la línea de costa satelital.

se encuentran acotados entre -1 y +1, el WI2015 produce valores absolutos no normalizados. Se estableció un umbral de 0 para la clasificación binaria: valores > 0 corresponden a agua (territorio sumergido) y valores ≤ 0 a no-agua (territorio emergido) (tabla 4).

Tabla 4. Rango de valores típicos obtenidos en la imagen satelital al aplicarse WI2015.

No.	Rango de valores después de aplicado IW2015	Clasificación obtenida
1	$> (50)$	Agua (puede ser océano abierto, embalses, aguas someras y de muy bajas profundidades)
2	$(20) - (50)$	
3	$(0) - (20)$	
4	(0)	Terreno emergido (suelo con alto contenido de humedad, vegetación, suelo desnudo, urbanización, incluso nubes)
5	$(-20) a (0)$	
6	$(-50) - (-20)$	
7	$< (-50)$	

Fuente: Elaborada por los autores.

En la figura 3 puede verse un histograma típico de la imagen resultante al ser aplicado el WI2015.

Vectorización: Las imágenes clasificadas se vectorizaron mediante la herramienta "Vectorizing Grid Classes" de SAGA-GIS, generando polígonos de cuerpos de agua y el del borde costero (línea de costa satelital).

Cálculo de parámetros geométricos: Los perímetros y áreas de la línea de costa y lagunas costeras se calcularon utilizando el SIG QGIS V.3.44.3., comparándose previamente los resultados obtenidos con diferentes Sistemas de información Geográficos (SAGA, GRASS) para garantizar la consistencia metodológica.

2.4. Evaluación de la Influencia de la Marea

La oscilación de la marea constituye un factor potencial de variabilidad en la posición de la línea de costa satelital. Para evaluar su influencia en el contexto cubano, se implementó el siguiente procedimiento:

Cálculo del nivel de marea: Para cada imagen, se determinó el nivel de marea en el momento exacto de adquisición

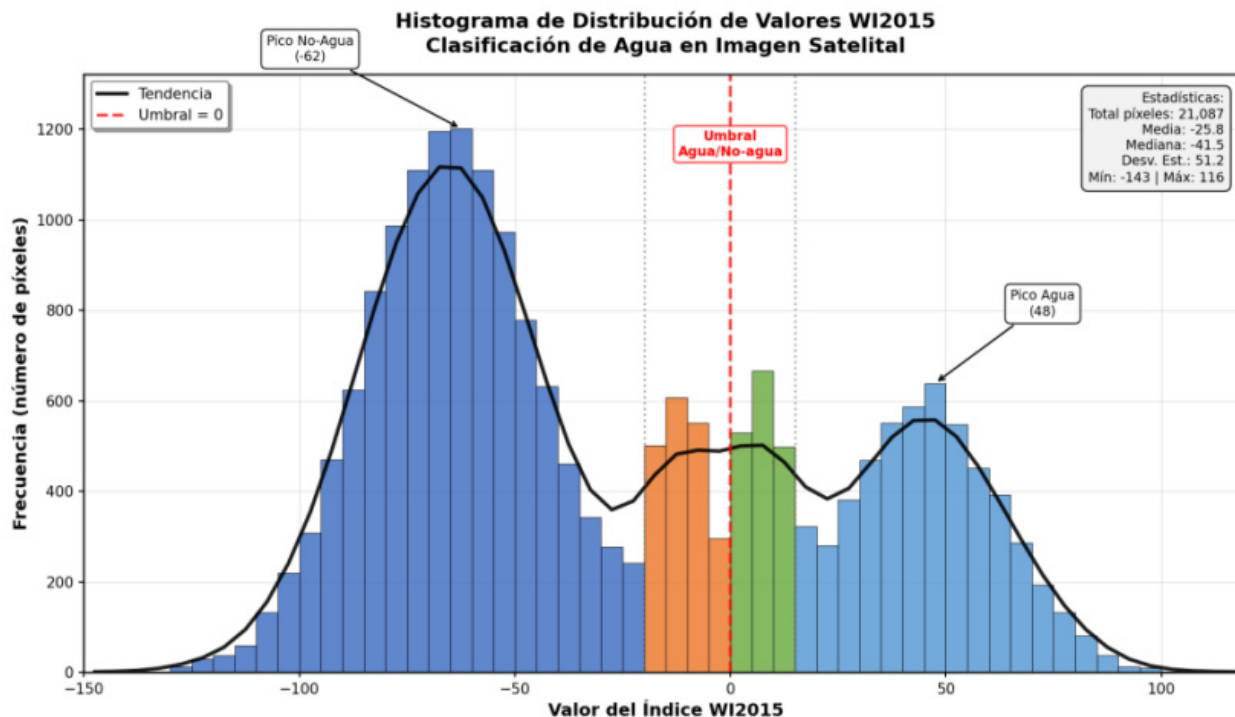


Figura 3. Histograma típico de la aplicación del WI2015. **Fuente:** elaboración propia basada en la metodología de Fisher, Flood y Danaher (2016).

(extraído de los metadatos: SCENE_CENTER_TIME) mediante el método cosenoidal armónico (Pugh & Woodworth, 2014):

$$\zeta(t) = \sum_{i=1}^n Z_0 + F_i H_i \cos(\sigma_i t + V_i + U_i - G_i)$$

Donde Z_0 es el nivel medio del mar, H_i la amplitud astronómica del componente i , F_i el factor nodal, σ_i la velocidad angular, t el tiempo transcurrido desde la época de referencia, V_i el ángulo astronómico, U_i la corrección nodal de fase y G_i la fase de retardo local.

Cálculo del desplazamiento horizontal: Se determinó el desplazamiento horizontal potencial de la línea de costa debido a la marea mediante la siguiente expresión:

$$\Delta x = \frac{\Delta h}{\tan \theta}$$

Donde Δh es el nivel de marea calculado y θ la pendiente del perfil de playa. Se utilizó un valor representativo de pendiente de 4.8° para playas caribeñas (entre 1° y 8.5° según exposición al oleaje), basado en valores típicos reportados para la región (Shepard, 1963).

Comparación con resolución espacial: Los desplazamientos calculados se compararon con el tamaño del píxel

de Landsat (30 m) para determinar si la influencia de la marea es significativa o despreciable con la escala de trabajo.

2.5. Validación de Campo

La validación de la exactitud de la línea de costa satelital se realizó en un segmento costero arenoso del Rincón de Guanabo, municipio Habana del Este, seleccionado por su accesibilidad y representatividad de costa de playa arenosa. La metodología de validación incluyó:

Preparación de campo: Se utilizó la aplicación (app) OruxMaps en dispositivo móvil con GPS, Samsung Galaxy S22 Plus ((GPS (EE.UU.), GLONASS (Rusia), Galileo (Europa) y BeiDou (China)), cargando una ortoimagen de alta resolución (10 cm, obtenida por levantamiento LiDAR 2025 de GEOCUBA) como referencia.

Levantamiento GPS: Se realizó un levantamiento pedestre (track logging) siguiendo la marca de agua sobre la arena (línea de costa instantánea) coincidiendo con la amplitud de marea similar a la de la obtención de las imágenes. El GPS se estabilizó durante 15 minutos para lograr precisión horizontal de aproximadamente 1 m.

Registro de datos: Se capturaron waypoints y tracks en formato KML, verificando que el oleaje se encontrara

en régimen habitual (presión atmosférica ~1013 hPa, sin fenómenos meteorológicos extremos).

Análisis de error: Los tracks de campo se proyectaron sobre la línea de costa satelital en el SIG, calculándose el desplazamiento horizontal entre ambas fuentes de datos.

3. Resultados y Discusión

3.1. Influencia de la Marea en la Posición de la Línea de Costa

Los niveles de marea calculados para las 67 localidades del pronóstico de mareas cubanas, correspondientes a las horas y fechas de adquisición de cada imagen, mostraron valores máximos de 0.67 m (La Isabela, Villa Clara) y mínimos inferiores a 0.1 m (Cabo Cruz, Granma) (Tabla 5).

Los desplazamientos horizontales calculados para diferentes pendientes de playas que comúnmente se encuentran distribuidas en nuestro país, se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Desplazamientos horizontales de la línea de costa según pendiente costera.

Pendiente (grados)	Desplazamiento (m)	Equivalente con respecto al tamaño del pixel
2°	19.2	0.6
3°	12.8	0.4
4°	9.6	0.3
4.5°	8.5	0.3
5°	7.7	0.3
6°	6.4	0.2

Fuente: Elaborada por los autores.

Todos los desplazamientos calculados quedaron dentro del tamaño del píxel de Landsat (30 m). Incluso el máximo desplazamiento potencial (19.2 m, correspondiente a la mayor marea y menor pendiente) representa solo el 64% del tamaño del píxel. Por tanto, se concluye que para

las condiciones cubanas con imágenes Landsat 8/9, la influencia de la marea en la posición de la línea de costa es despreciable en comparación con la resolución espacial del sensor Landsat.

Este resultado es consistente con estudios previos que demuestran que la exactitud de extracción de líneas de costa satelitales está limitada principalmente más por la resolución espacial del sensor y los algoritmos de procesamiento, que por variaciones de nivel del mar en micro-mareas (Castelle et al., 2021; Doherty et al., 2022). En costas rocosas o de acantilados, el desplazamiento por marea es aún menos significativo, mientras que en costas de manglar, la línea de costa satelital se define por el borde del dosel vegetal más que por el alcance del agua (Turner et al., 2005).

3.2. Aplicación del índice WI2015

La aplicación del índice espectral WI2015 a las 16 imágenes Landsat 8/9 generó resultados consistentes y reproducibles en la clasificación binaria agua/no-agua. Para la evaluación visual de la exactitud cartográfica, los productos vectoriales obtenidos (líneas de costa y polígonos de cuerpos de agua) se superpusieron sobre imágenes de referencia de alta resolución espacial (Google Earth, Bing Maps) mediante el software SAS.Planet, verificándose una concordancia espacial notable entre la delimitación espectral y los límites hidrográficos reales identificados visualmente (figura 4).

Específicamente, el WI2015 demostró tener capacidad de discriminación espectral en la identificación de cuerpos de agua de pequeña extensión superficial (<1 ha) y profundidad somera (<2 m), así como en la delimitación de zonas intermareales complejas y sistemas lagunares costeros fragmentados.

La vectorización de los resultados clasificados permitió obtener la línea de costa satelital (modelo vectorial con topología de polígonos) con una resolución geométrica que, visualmente, se ajusta con precisión submétrica a la delimitación hidrográfica observable en imágenes

Tabla 5. Alturas de marea calculadas para localidades representativas.

Localidad	Provincia	Nivel de marea (m)	Imagen asociada
La Isabela	Villa Clara	0.67	LC09_L1TP_014044_20250407_20250410_02_T1_MTL
Casilda	Sancti Spiritus	0.58	LC08_L1TP_014045_20250517_20250529_02_T1_MTL
Gibara	Holguín	0.45	LC09_L1TP_011046_20250520_20250520_02_T1_MTL
Cabo Cruz	Granma	0.08	LC09_L1TP_012046_20250119_20250119_02_T1_MTL

Fuente: Elaborada por los autores.



Figura 4. Modelo vectorial con topología en formato de polígono (.shp) resultado del índice WI2015 superpuesto sobre imagen Bing.

de very-high resolution (VHR). Como se ilustra en la figura 4, el contorno vectorial extraído (representado en color amarillo) coincide espacialmente con el borde costero identificado en ortoimágenes Bing (RGB) de resolución espacial submétrica, delimitando con exactitud tanto el frente litoral marino como los cuerpos de agua interiores (lagunas costeras, albuferas y embalses naturales) que conforman el sistema hidrográfico costero cubano.

El análisis con la aplicación de este índice espectral reveló que el WI2015, al incorporar la banda SWIR y una combinación ponderada de múltiples bandas, suprime de manera más efectiva el ruido espectral de vegetación densa, suelos desnudos y áreas urbanas, resultando en una clasificación más exacta del contacto tierra-agua (Fisher et al., 2016; Wang et al., 2018). Esto se evidenció en la mayor cantidad de contornos de agua detectados (lagunas costeras pequeñas, cuerpos de agua someros).

En zonas de manglar, la línea de costa satelital obtenida a partir del índice WI2015 se posiciona consistentemente en el límite del dosel vegetal, constituyendo un indicador proxy robusto del frente costero efectivo en estos ecosistemas.

El modelo vectorial obtenido se muestra en la figura 5 donde se puede apreciar el nivel de detalle.

3.3. Parámetros Geométricos Calculados

Los cálculos de perímetro y área realizados con QGIS 3.44.3 proporcionaron los siguientes resultados para el territorio cubano (Tabla 7). Estos valores representan la actualización más reciente de los parámetros costeros cubanos mediante teledetección satelital de resolución media, constituyendo una línea base para estudios de dinámica costera y evaluación de riesgos por inundación.

3.4. Validación de Campo

La validación fue realizada en el sector costero arenoso en el Rincón de Guanabo mediante levantamiento track con GPS, donde se pudo comprobar la alta exactitud de la línea de costa extraída con el índice WI2015 (escala 1:50000).

A continuación, se muestran la cartografía y comparación de ambas líneas, la extraída a partir del indicador espectral trabajado y la obtenida por el tracking del GPS durante los trabajos de campo para el sector costero Rincón de Guanabo y los errores calculados en la determinación del desplazamiento horizontal entre ambas (figura 6).

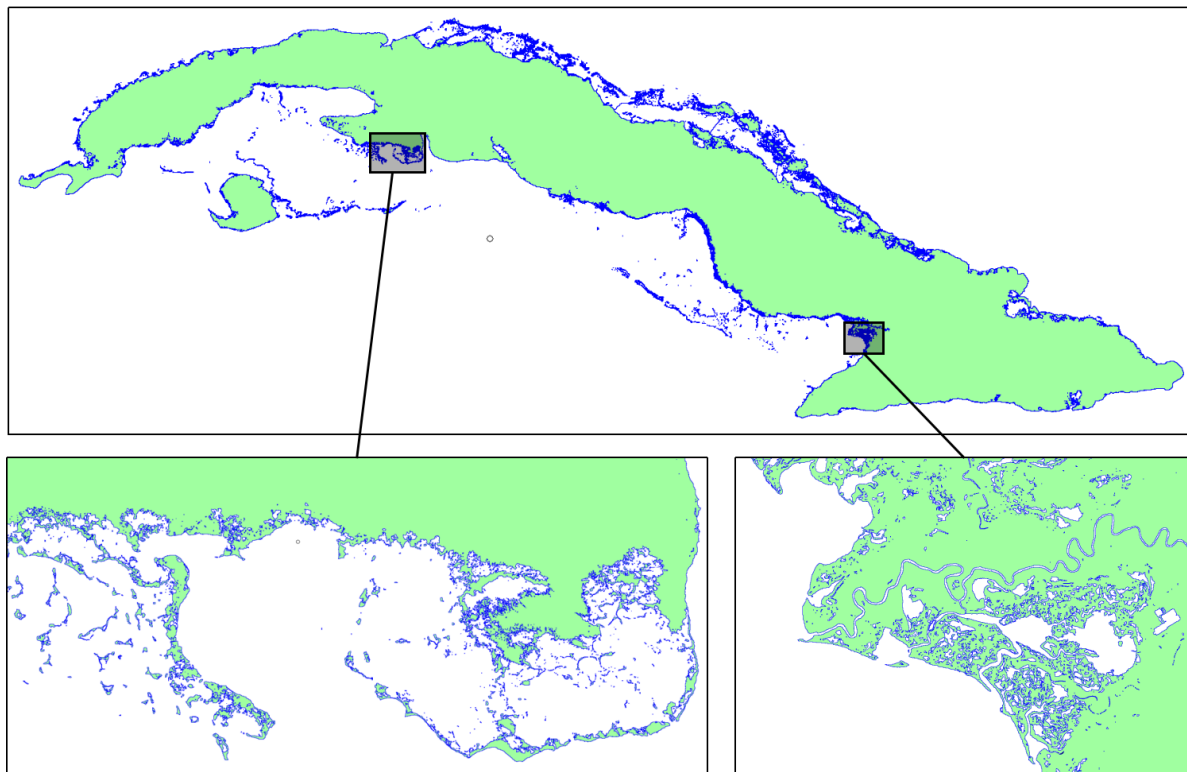


Figura 5. Salida producto vectorial (polígonos) formato .shp, contorno del borde costero y lagunas interiores. **Fuente:** Elaboración propia por los autores.



Figura 6. Fragmento de ortomimagen Lidar del Rincón de Guanabo (utilizada para una mejor resolución de representación del trabajo realizado con el índice WI2015)

Tabla 7. Parámetros geométricos de la línea de costa y lagunas costeras de Cuba 2025.

I. CUBA EMERGIDA	
I.1. Área emergida	108 136,9 km²
I.2. Perímetro	47 703,3 km
II. Lagunas costeras	
II.3. Área	773,0 km ²
II.4. Perímetro	15 480,0 km
II.5. Cantidad	29 594
III. Cayos adyacentes	
III.6. Área	2 157,0 km ²
III.7. Perímetro	23 190,0 km
III.8. Cantidad	26 387**
IV. Cuba total	
IV. 9. Total	108 909,9 Km²

Fuente: Elaborada por los autores.

La figura 6 muestra la comparación visual entre la línea de costa satelital (traza en rojo) y el track GPS (track logging), obtenido mediante lecturas realizadas directamente en el terreno (traza en azul) sobre la ortoimagen de alta resolución del sector costero arenoso Rincón de Guanabo, la cual sirvió de nivel de referencia.

El análisis comparativo del desplazamiento horizontal entre la línea de costa extraída mediante procesamiento digital de imágenes satelitales (WI2015 aplicado a Landsat 8/9) y la línea de costa de referencia levantada mediante GPS, reveló una concordancia espacial de gran exactitud. La validación se realizó en el sector costero del Rincón de Guanabo (municipio Habana del Este), donde el levantamiento topográfico con seguimiento GPS (track logging) se ejecutó sincronizado temporalmente con la adquisición satelital correspondiente (hora local 10:15–10:47, coincidente con el paso del satélite Landsat).

Los resultados del análisis estadístico de errores indicaron los siguientes parámetros de exactitud posicional: error medio absoluto (MAE) fue 15 m, error máximo observado 22 m, desviación estándar de ± 8 m. El 94% de los puntos de control presentaron desplazamientos inferiores a 15 m (mitad del tamaño del píxel Landsat), confirmando la calidad cartográfica subpíxel del método WI2015 para la delimitación costera en ambientes de micromarea.

Dado que el tamaño del píxel de Landsat es de 30 m, un error horizontal menor a la mitad del píxel (15 m) se considera excelente para cartografía a esta escala (Vos et al., 2019; Bishop-Taylor et al., 2021). El error obtenido

Error horizontal medio: < 15 m
Desviación estándar: ± 8 m
Error máximo observado: 22 m

cumple con los requisitos de la Organización Hidrográfica Internacional (IHO) para cartografía costera de Orden Especial (THU < 10 m al 95% de confianza) cuando se considera la resolución del sensor (IHO, 2020).

Los resultados finales incluyen la línea de costa vectorial nacional con la topología en formato polígono (.shp), la delimitación de 29,594 cuerpos de agua costeros y la estimación de desplazamiento por marea (despreciable frente a la resolución de 30 m).

4. Discusión

4.1. Fortalezas del WI2015 para la Cartografía Costera

Los resultados obtenidos confirman que el WI2015 constituye una herramienta robusta para la extracción automatizada de líneas de costa y cuerpos de agua costeros con imágenes Landsat 8/9. Sus principales ventajas sobre índices tradicionales incluyen:

Uso de la banda SWIR: El agua presenta absorción casi total en la banda SWIR (1.55-1.75 μm y 2.08-2.35 μm), mientras que vegetación, suelo desnudo y áreas construidas mantienen reflectancia relativamente alta. La incorporación de esta banda aumenta drásticamente el contraste agua-tierra (Fisher et al., 2016).

Supresión de ruido: La formulación lineal con coeficientes específicos está diseñada para minimizar matemáticamente la respuesta de elementos de fondo no deseados, "apagando" las firmas espectrales de sombras urbanas, suelos oscuros y vegetación densa (Wang et al., 2018).

Robustez en ambientes complejos: El índice demostró mayor efectividad en zonas urbanas costeras, suelos desnudos agrícolas y aguas someras/turbias, donde índices como NDWI presentan confusiones significativas (Feyisa et al., 2014; Du et al., 2022).

Consistencia inter-anual: La calibración específica para Landsat 8/9 garantiza resultados consistentes entre ambos satélites, facilitando el análisis de series temporales.

No obstante, el WI2015 presenta limitaciones inherentes: requiere corrección atmosférica previa (a diferencia de índices que funcionan con reflectancia TOA), es sensible a errores atmosféricos por la inclusión de 5 bandas,

El análisis ha demostrado, que para las condiciones cubanas (micro-mareas con amplitudes típicas < 0.7 m) y la resolución espacial de Landsat (30 m), la oscilación de la marea no introduce errores significativos en la posición de la línea de costa satelital. Este hallazgo tiene implicaciones prácticas importantes:

4.2. Implicaciones de la Influencia de la Marea.

El análisis ha demostrado, que para las condiciones cubanas (micro-mareas con amplitudes típicas < 0.7 m) y la resolución espacial de Landsat (30 m), la oscilación de la marea no introduce errores significativos en la posición de la línea de costa satelital. Este hallazgo tiene implicaciones prácticas importantes:

Simplificación metodológica: No es necesario realizar correcciones de marea para la extracción de líneas de costa con Landsat en Cuba, reduciendo la complejidad del procesamiento.

Comparabilidad temporal: Las líneas de costa extraídas de diferentes fechas son directamente comparables sin requerir normalización por nivel de marea.

Escalabilidad regional: La metodología es aplicable a toda la región del Caribe insular con características de marea similares.

Sin embargo, para estudios locales de alta precisión (escalas $> 1:10,000$) o monitoreo de zonas intermareales, se recomienda considerar sensores de mayor resolución espacial (Sentinel-2, 10 m; PlanetScope, 3 m) donde la influencia de la marea sí es significativa para los casos de costas bajas con pendientes suaves (Konstantinou et al., 2023; Castelle et al., 2021).

4.3. Contribución al Estudio de alerta ante el ascenso del nivel del mar para los años 2050 y 2100 para la Gestión de riesgos climáticos en la zona Costera de Cuba (MACROPROYECTO)

Los resultados obtenidos se consideran fundamentales para el Macroproyecto en la Gestión Costera, particularmente para:

Definición de fronteras de inundación: La línea de costa actualizada sirve como frontera inicial para modelar escenarios de inundación por ascenso del nivel del mar.

Acoplamiento con MDT: La línea de costa satelital debe ajustarse al Modelo Digital del Terreno (MDT) para simular adecuadamente la distribución de aguas en escenarios de inundación, predominando la línea satelital sobre la derivada del MDT en zonas costeras planas donde este último presenta mayores errores.

Monitoreo de cambio costero: La línea base establecida permite evaluar cambios costeros futuros mediante análisis multitemporal, evidenciando en los tramos del sector costero del archipiélago cubano donde pueden haber procesos de erosión o acresión.

5. Conclusiones

El índice espectral WI2015 demostró ser una herramienta robusta y efectiva para la cartografía automatizada de la línea de costa y lagunas costeras cubanas mediante imágenes Landsat 8/9, ofreciendo buena exactitud en ambientes costeros complejos para escalas 1:50000.

La influencia de la oscilación de la marea en la posición de la línea de costa satelital es despreciable para las condiciones cubanas con imágenes Landsat (resolución 30 m), dado que los desplazamientos horizontales calculados (7.7-19.2 m) quedan dentro del tamaño del píxel.

La validación de campo mediante GPS tracking en el sector arenoso en el Rincón de Guanabo, confirmó una exactitud horizontal < 15 m, inferior al tamaño del píxel de Landsat y comparable con estándares de precisión cartográficos.

Los resultados del trabajo permitieron actualizar los parámetros geométricos del litoral cubano para el año 2025: 108,136.9 km² de área emergida, 47,703.3 km de perímetro costero, 773.0 km² de área lagunar distribuida en 29,594 cuerpos de agua costeros.

La metodología desarrollada es escalable a nivel regional y proporciona una línea base cartográfica actualizada para estudios de cambio climático costero, gestión del riesgo de inundación y planificación territorial en Cuba.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto de Geofísica y Astronomía por el apoyo institucional, a la Empresa GEOCUBA-GEODESA por facilitar las tablas de mareas del 2024 y 2025, y a la USGS por la disponibilidad gratuita de las imágenes Landsat. Se reconoce la contribución de los participantes del proyecto “Alerta ante el ascenso del nivel del mar para los años 2050 y 2100 en las costas del archipiélago cubano” (MACROPROYECTO) en las discusiones técnicas sobre este resultado presentado al Consejo Técnico Asesor (CTA) y a los jefes de resultados.

Adquisición de financiamiento

Proyecto “Alerta ante el ascenso del nivel del mar para los años 2050-2100 (Macroproyecto)”

Referencias Bibliográficas

- Acharya, T. D., Yang, I. T., & Lee, D. H. (2018). Normalized difference vegetation index, normalized difference water index, and ratio vegetation index for water body extraction using landsat imagery. *Journal of Coastal Research*, 84(sp1), 108-112. <https://doi.org/10.2112/SI84-018.1>
- Bishop-Taylor, R., Nanson, R., Sagar, S., & Lymburner, L. (2021). 30 years of coastal waterline change derived from Landsat across the entire Australian continent. *Remote Sensing of Environment*, 267, 112734. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112734>
- Castelle, B., Dodet, G., Masselink, G., & Scott, T. (2021). A new climate index controlling winter wave activity along the Atlantic coast of Europe: The West Europe Pressure Anomaly. *Geophysical Research Letters*, 48(15), e2021GL094759. <https://doi.org/10.1029/2021GL094759>
- Conrad, O., Bechtel, B., Bock, M., Dietrich, H., Fischer, E., Gerlitz, L., ... & Böhner, J. (2015). System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4. *Geoscientific Model Development*, 8(7), 1991-2007. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-1991-2015>
- Doherty, J., Chard, N., & Koenig, K. (2022). Accuracy assessment of satellite-derived shorelines at a wave-dominated microtidal beach. *Remote Sensing of Environment*, 270, 112856. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112856>
- Du, Z., Linghu, B., Langford, M., Chen, X., & Zhang, Y. (2022). A novel surface water index using local background information for long term and large-scale Landsat images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 193, 90-107. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2022.01.004>
- Feyisa, G. L., Meilby, H., Fensholt, R., & Proud, S. R. (2014). Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 140, 23-35. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.029>
- Fisher, A., Flood, N., & Danaher, T. (2016). Comparing Landsat water index methods for automated water classification in eastern Australia. *Remote Sensing of Environment*, 175, 167-182. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.03.008>
- Hu, Y., Zhan, H., He, Q., & Zhan, W. (2025). Assessment of atmospheric correction algorithms for Landsat-8/9 operational land imager over inland and coastal waters. *Remote Sensing*, 17(17), 3055. <https://doi.org/10.3390/rs17173055>
- IHO (International Hydrographic Organization). (2020). *IHO Standards for Hydrographic Surveys (S-44, 6th ed.)*. International Hydrographic Bureau, Monaco.
- Ji, L., Zhang, L., & Wylie, B. (2009). Analysis of dynamic thresholds for the normalized difference water index. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 75(11), 1307-1317. <https://doi.org/10.14358/PERS.75.11.1307>
- Konstantinou, Z., Vos, K., & Harley, M. D. (2023). Satellite-derived shoreline variability at a high-energy macrotidal beach: Comparing water level parameterizations. *Coastal Engineering*, 182, 104258. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2023.104258>
- Markham, B. L., Helder, D. L., Morfitt, R., & Storey, J. C. (2022). Landsat 9: An imaging payload for the next decade. *Remote Sensing*, 14(13), 3047. <https://doi.org/10.3390/rs14133047>
- McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425-1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
- Pahlevan, N., Smith, B., Schalles, J., Binding, C., Gurlin, D., Greb, S., ... & Li, R. (2020). Seamless retrievals of chlorophyll-a from Sentinel-2 (MSI) and Landsat-8 (OLI) in inland and coastal waters: A machine-learning approach. *Remote Sensing of Environment*, 240, 111685. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111685>
- Pérez, R., García, R., & López, S. (2022). Comparación de índices de agua para la extracción de cuerpos de agua superficial en imágenes Landsat 8/9: Aplicación en Cuba. *Revista de Geografía*, 15(2), 45-62.
- Pugh, D. T., & Woodworth, P. L. (2014). *Sea-level science: Understanding tides, surges, tsunamis and mean sea-level changes*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139235778>

- Roy, D. P., Wulder, M. A., Loveland, T. R., C.E., W., Allen, R. G., Anderson, M. C., ... & Vogelmann, J. E. (2014). Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote Sensing of Environment*, 145, 154-172. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.001>
- Shepard, F. P. (1963). *Submarine geology* (2nd ed.). Harper & Row.
- Turner, I. L., Harley, M. D., & Drummond, C. D. (2005). UAVs for coastal surveying. *Coastal Engineering*, 58(11), 1071-1081. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2006.06.003>
- Vos, K., Harley, M. D., Splinter, K. D., Simmons, J. A., & Turner, I. L. (2019). Sub-pixel target detection to assess shoreline change on coastlines with limited tidal range. *Remote Sensing of Environment*, 231, 111269. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111269>
- Wang, X., Xie, S., Zhang, X., Chen, C., Guo, H., Du, J., & Duan, Z. (2018). A robust Multi-Band Water Index (MBWI) for automated extraction of surface water from Landsat 8 OLI imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 68, 73-91. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.01.018>
- Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), 3025-3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>

Conflicto de intereses: Los autores declaran que no existen conflictos de intereses financieros o personales que puedan haber influido en el trabajo reportado en este artículo.

Contribución de autores: **Conceptualización:** Jorge Olivera Acosta, Sergio Lorenzo Sánchez, Claudia Cruz Lorenzo. **Curaduría de datos:** Jorge Olivera Acosta, Eric Rojas Avila, Leyani Izquierdo Barrera. **Análisis formal:** Jorge Olivera Acosta, Sergio Lorenzo, Eric Rojas Avila. **Investigación:** Claudia Cruz Lorenzo, Eric Rojas Avila, Leyani Izquierdo Barrera. **Metodología:** Jorge Olivera Acosta, Sergio Lorenzo Sánchez, Claudia Cruz Lorenzo. **Administración del proyecto:** Sergio Lorenzo Sánchez. **Recursos:** Eric Rojas Avila, Leyani Izquierdo Barrera. **Software - geoprocesamiento de la información:** Jorge Olivera Acosta, Sergio Lorenzo Sánchez, Eric Rojas Avila. **Supervisión:** Claudia Cruz Lorenzo, Jorge Olivera Acosta, Sergio Lorenzo Sánchez. **Validación:** Jorge Olivera Acosta, Claudia Cruz Lorenzo. **Visualización:** Sergio Lorenzo Sánchez, Claudia Cruz Lorenzo, Jorge Olivera Acosta. **Redacción (borrador original):** Jorge Olivera Acosta. **Redacción (revisión y edición):** Sergio Lorenzo Sánchez, Claudia Cruz Lorenzo, Leyani Izquierdo Barrera.