

# Boletín Científico CIOH

CARIBE Y PACÍFICO

Cartagena de Indias, D.T. y C., Colombia



Ministerio de Defensa Nacional-Dirección General Marítima

Vol. 44 N.º 2. Diciembre 2025

Ministerio de Defensa Nacional



Dirección General Marítima  
Autoridad Marítima Colombiana

Centro de Investigaciones Oceanográficas  
e Hidrográficas del Caribe

Centro de Investigaciones Oceanográficas  
e Hidrográficas del Pacífico

# **Boletín Científico CIOH**

Vol. 44 N.º 2  
Diciembre 2025

**Ministerio de Defensa Nacional  
Dirección General Marítima  
Centro de Investigaciones Oceanográficas e  
Hidrográficas del Caribe (CIOH)  
Centro de Investigaciones Oceanográficas e  
Hidrográficas del Pacífico (CCCP)**

## **BOLETÍN CIENTÍFICO CIOH**

Dirección General Marítima (Dimar)

Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH)

Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico (CCCP)

Vol. 44 N.º 2. Diciembre 2025

## **DIRECTOR GENERAL MARÍTIMO**

Almirante John Fabio Giraldo Gallo

## **DIRECTOR BOLETÍN CIENTÍFICO CIOH**

Capitán de Navío Alexis Grattz Bonilla

Director CIOH

## **COORDINADORA EDITORIAL**

Ángelica María Castrillón-Gálvez

Máster en Edición de Publicaciones Dimar

## **EDITORIA JEFÉ**

Rosana del Pilar Adames Prada, M.Sc.

Máster en Ciencias - Física y Magíster en Oceanografía

Grupo de Investigación Científica Marítima -

Subdirección de Desarrollo Marítimo

## **GESTOR EDITORIAL**

Alexandra Castro Suárez

Máster en Estudios Editoriales

## **COMITÉ EDITORIAL**

Roberto Enrique Lastra Mier, Ph.D.

Grupo de investigación en Derecho y Territorio. Grupo de investigación INVIUS

Facultad de Ciencias Jurídicas

Universidad del Atlántico

Yanis Cruz Quintana, Ph. D.

Grupo de Investigación en Sanidad Acuícola, Inocuidad y Salud Ambiental

Universidad Técnica de Manabí (Ecuador)

Bismarck Jigena Antelo, Ph.D.

Departamento de Ciencias y Técnicas de la Navegación y Construcciones Navales.

Universidad de Cádiz (España)

Juan Gabriel Rueda Bayona, Ph.D.

Grupo de investigación en Hidráulica Fluvial y Marítima - HIDROMAR

Facultad de Ingeniería

Universidad del Valle

Mónica María Zambrano Ortiz, Ph.D.

Corporación Académica Ambiental

Universidad de Antioquia

Mary Luz Cañón Páez, Ph.D.

Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA)

Andrea Corredor-Acosta, Ph.D.

Centro de Investigación Dinámica de Ecosistemas Marinos de Altas Latitudes (IDEAL)

Universidad Austral de Chile

Eduardo Santamaría del Ángel, Ph.D.

Facultad de Ciencias Marinas

Universidad Autónoma de Baja California (México)

## **CUBIERTA**

Fachada del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH).

## **COMITÉ CIENTÍFICO**

Guillermo Gomer Cotrina Cabello, Ph.D.

Universidad Nacional de Cañete (Perú)

Luis Ernesto Paz Enrique, Ph.D.

Universidad Nacional Autónoma de México (México)

Ángel Leonardo Rojas Rodríguez, Ph.D. (c)

Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla"

Sonia Esperanza Reyes Gómez, Ph.D.

Instituto de Capacitación e Investigación del Plástico y del Caucho ICIPC

Mauricio Alejandro Perea Ardila, Ph.D.

Universidade Federal do Ceará (Brasil)

German David Patarroyo Camargo, Ph.D.

Universidad Industrial de Santander

Yeison Alberto Garcés Gómez, Ph.D.

Universidad Católica de Manizales

Iván Martín León Luna, Ph.D.

Universidad del Atlántico

Julio César Herrera Carmona, Ph.D.

Universidad del Valle

## **EDITORIAL DIMAR**

## **DISEÑO Y COMPOSICIÓN**

Fenix Media Group S.A.S.



Boletín Científico CIOH por Dimar se encuentra bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Unported. Basada en una obra en [www.cioh.org.co](http://www.cioh.org.co)

El Boletín Científico CIOH es una revista científica seriada, especializada en las diferentes áreas de investigación de las ciencias del mar: hidrografía, oceanografía física, meteorología marina, geología marina, protección del medio marino, manejo integrado de zonas costeras, patrimonio cultural sumergido y biología marina y disciplinas afines, dirigida a la comunidad científica y la academia en el ámbito global. Publica semestralmente artículos científicos inéditos y arbitrados, producto de proyectos de investigación adelantados por los centros de investigaciones científicas marinas de la Dirección General Marítima y de otros institutos, e investigadores que realicen contribuciones originales al desarrollo de nuevo conocimiento. Se edita en formato digital bajo el ISSN en línea 2215-9045, en idioma español e inglés. Su distribución se hace desde la plataforma Open Journal System (OJS) (<http://ojs.dimar.mil.co>) y el Repositorio Biblioteca Digital (RBDM) (Boletín Científico CIOH). Este producto intelectual cuenta con una política de acceso abierto (Open Access, OA) para su consulta, sus condiciones de uso y distribución están definidas por el licenciamiento Creative Commons ©.

**ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN**

**Impactos de la Oscilación del Sur de El Niño en la variabilidad hidroclimática de una cuenca andina tropical a partir de conjuntos de datos en malla fina**

*Impacts of El Niño Southern Oscillation on hydroclimatic variability of a tropical Andean basin from fine-gridded datasets*

DOI: <https://doi.org/10.26640/22159045.2025.654>

Fecha de recepción: 2024-11-12 / Fecha de evaluación: 2025-07-25 / Fecha de aceptación: 2025-09-15

**José A. Posada-Marín<sup>1</sup>; Sharon A. Sánchez-Muñoz<sup>2</sup>; Melisa K. Toro-Martínez<sup>3</sup>**

**CITAR COMO:**

**Posada-Marín, J.; Sánchez-Muñoz, S.; Toro-Martínez, M. (2025).** Impactos de la Oscilación del Sur El Niño en la variabilidad hidroclimática de una cuenca andina tropical a partir de conjuntos de datos en malla fina, *Boletín Científico CIOH*, 44(2), 3-23. <https://doi.org/10.26640/22159045.2025.654>.

**RESUMEN**

Cuantificar cuánto los modos climáticos modulan los regímenes hidrológicos locales es esencial para anticipar riesgos en regiones montañosas tropicales. Este estudio analizó la influencia del fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) sobre la variabilidad hidroclimática en la cuenca Peñol-Guatapé, estratégica para la generación hidroeléctrica en los Andes colombianos. Aunque existen validaciones regionales de datos de precipitación, su desempeño varía en terrenos montañosos complejos, dejando un vacío a escala de cuenca, donde se toman decisiones críticas de gestión. Se evaluaron productos de alta resolución frente a registros en superficie y se analizaron anomalías asociadas al ENOS. CHIRPS representó con mayor consistencia la precipitación. Además, El Niño redujo la lluvia en más del 30 % en temporadas críticas, mientras La Niña intensificó la precipitación, elevando los riesgos de inundaciones y deslizamientos. Estos hallazgos subrayan el papel del ENOS como modulador hidroclimático y la importancia de validaciones locales en regiones tropicales montañosas.

**PALABRAS CLAVES:** El Niño, variabilidad climática, precipitación, seguridad del agua, gestión del agua.

**ABSTRACT**

*Quantifying how much climate modes modulate local hydrological regimes is essential for anticipating risks in tropical mountain regions. This study analyzed the influence of the El Niño–Southern Oscillation (ENOS) on hydroclimatic variability in the Peñol–Guatapé basin, a strategic area for hydropower generation in the Colombian Andes. Although regional validations of precipitation datasets exist, their performance varies in complex mountainous terrains, leaving a gap at the basin scale where critical management decisions are made. High-resolution products were evaluated against surface records, and anomalies associated with ENOS were analyzed. CHIRPS most consistently represented precipitation. Moreover, El Niño reduced precipitation by more than 30% during critical seasons, while La Niña intensified precipitation and increased the risks of floods and landslides. These findings highlight the role of ENOS as a hydroclimatic driver and the importance of localized validations in tropical mountain regions.*

**KEYWORDS:** El Niño, climate variability, precipitation, water security, water management.

<sup>1</sup> Orcid: 0000-0001-7456-8772. Grupo de Investigación en Innovación Digital y Desarrollo Social INDDES, IU Digital de Antioquia, Medellín, Colombia. Correo electrónico: [jose.posada@iudigital.edu.co](mailto:jose.posada@iudigital.edu.co)

<sup>2</sup> Orcid: 0000-0001-5996-9367. Grupo de Investigación en Innovación Digital y Desarrollo Social INDDES, IU Digital de Antioquia, Medellín, Colombia. Correo electrónico: [sharon.sanchez@iudigital.edu.co](mailto:sharon.sanchez@iudigital.edu.co)

<sup>3</sup> Orcid: 0009-0004-1248-1734. Grupo de Investigación en Innovación Digital y Desarrollo Social INDDES, IU Digital de Antioquia, Medellín, Colombia. Correo electrónico: [melisa.toro@iudigital.edu.co](mailto:melisa.toro@iudigital.edu.co)



Publicado por la Dimar

## INTRODUCCIÓN

El fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) es el principal impulsor de la variabilidad climática regional y global (Arias *et al.*, 2021). Este fenómeno incluye una fase cálida (El Niño) y una fase fría (La Niña), cada una caracterizada por patrones anómalos de temperatura en el océano Pacífico. Durante la fase de El Niño (La Niña), las temperaturas en el Pacífico oriental son más altas (más bajas) que el promedio histórico (McPhaden, Zebiak & Glantz, 2006). El ENOS impulsa la variabilidad hidroclimática, alterando notablemente la precipitación a escalas regionales y globales (Dai & Wigley, 2000; Lin & Qian, 2019; Posada-Marín, *et al.*, 2023). Numerosos estudios han demostrado la influencia de El Niño en eventos extremos de precipitación (por ejemplo, Sun, *et al.*, 2015; Yang, Wu, Liu & Ye, 2021; An *et al.*, 2023), los cuales afectan la magnitud y frecuencia de amenazas naturales como inundaciones (Emerton, *et al.*, 2017; Yan *et al.*, 2020), deslizamientos de tierra (Vilímek, *et al.*, 2013; Emberson, *et al.*, 2021; Vega, *et al.*, 2024) y escasez de agua (Veldkamp *et al.*, 2015; Vicente-Serrano *et al.*, 2017; Singh, Ashfaq, Skinner, Anderson, Mishra & Singh, 2022).

Estas amenazas inducidas por el ENOS tienen impactos significativos en la infraestructura (Kim, Chowdhury, Pant, Yamashita & Ghimire, 2021), la seguridad alimentaria (Muza, 2017; Sazib, Mladenova & Bolten, 2020), la seguridad hídrica (Mishra, 2020), la generación hidroeléctrica (Poveda, Mesa & Waylen, 2003; Ng, Turner & Galelli, 2017; Gao, Zhao, Hou & Wang, 2022), la salud pública (Muñoz, Poveda, Arbeláez & Vélez, 2021; Woyessa, Siebert, Owusu, Cousin, Dinku & Thomson, 2023) y el funcionamiento de los ecosistemas (Holmgren, Scheffer, Ezcurra, Gutiérrez & Mohren, 2001; Posada-Marín *et al.*, 2023). Estos impactos podrían volverse aún más severos bajo escenarios de cambio climático, ya que se proyecta un aumento en la ocurrencia e intensidad de las fases del ENOS (Cai *et al.*, 2015; Cai *et al.*, 2022; Singh *et al.*, 2022).

El norte de América del Sur (NSA, por sus siglas en inglés) está particularmente influenciado por el ENOS (Poveda, Álvarez & Rueda, 2011; Cai *et al.*, 2020; Bolaños, Salazar, Betancur & Werner, 2021). En términos generales, la fase de El Niño (La Niña) conduce a reducciones (incrementos)

en la precipitación en esta región (Poveda *et al.*, 2011). El ciclo anual de precipitación en el NSA está modulado por la oscilación de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), la cual afecta la intensidad y comportamiento de los chorros de nivel bajo que transportan humedad desde el océano Pacífico (Chorro de Nivel Bajo del Chocó - CHLLJ, Sierra, Arias, Durán-Quesada, Tapias, Vieira & Martínez, 2021), el océano Atlántico (Chorro de Nivel Bajo del Caribe - CLLJ, Wang, 2007) y las cuencas del Amazonas (Chorro de Nivel Bajo de América del Sur - SALLJ, Montini, Jones & Carvalho, 2019) y del Orinoco (Chorro de Nivel Bajo del Orinoco - OLLJ, Jiménez-Sánchez, Markowski, Jewtoukoff, Young & Stensrud, 2019). Cai *et al.* (2020) sintetizaron hallazgos sobre la influencia del ENOS en América del Sur, indicando que durante la fase de El Niño (La Niña) se presenta movimiento descendente (ascendente) anómalo sobre el NSA, lo cual genera reducciones (incrementos) en la precipitación. Poveda *et al.* (2011) sugirieron además que, durante las fases de El Niño (La Niña), los cambios en los gradientes de temperatura entre el océano Pacífico y el continente del NSA causan un debilitamiento (intensificación) de los chorros CHLLJ y CLLJ, reduciendo (aumentando) así el transporte de humedad hacia el interior.

Asimismo, el reciclaje de humedad terrestre (TMR, por sus siglas en inglés) desde las cuencas del Amazonas y del Orinoco hacia los Andes Tropicales del NSA, modulado por los chorros SALLJ y OLLJ, se reduce considerablemente (Poveda *et al.*, 2011; Builes-Jaramillo *et al.*, 2022; Posada-Marín *et al.*, 2023). Estos cambios en el transporte atmosférico de humedad explican parcialmente las anomalías de precipitación en el NSA (Cai *et al.*, 2020).

El ENOS puede afectar la ocurrencia y severidad de amenazas naturales relacionadas con la precipitación en el norte de América del Sur, como sequías, inundaciones y deslizamientos. Emerton *et al.* (2017) señalaron que no existe una relación lineal simple entre la precipitación y la magnitud de las inundaciones, lo que dificulta determinar la influencia del ENOS en las amenazas asociadas a inundaciones, las cuales varían según la ubicación dentro de los Andes Tropicales. En cuanto a los incendios forestales, las fases de El Niño aumentan su ocurrencia durante las temporadas secas debido a reducciones en la precipitación y

en la humedad del suelo (Emerton *et al.*, 2017; Bolaños *et al.*, 2021). Por el contrario, La Niña incrementa la precipitación tanto en las estaciones secas como en las húmedas, aumentando la erosión y la ocurrencia de deslizamientos (Vega *et al.*, 2024). Estas amenazas naturales inducidas por el ENOS provocan alteraciones en los ecosistemas, pérdidas económicas, daños a la infraestructura e incluso víctimas fatales (Duque-Escobar, 2007). Los efectos son particularmente severos en las regiones montañosas de los Andes Tropicales, donde las características topográficas y geológicas, combinadas con los patrones alterados de precipitación, incrementan los riesgos de deslizamientos y los daños asociados (Vega *et al.*, 2024). El monitoreo de la precipitación es esencial para comprender cómo la variabilidad inducida por el ENOS impacta las amenazas relacionadas con el agua, contribuyendo así a garantizar la seguridad hídrica en esta región.

Existen diversos conjuntos de datos en malla, como reconstrucciones climatológicas (por ejemplo, GPCC - Global Precipitation Climatology Centre, Becker *et al.*, 2013), reanálisis (por ejemplo, ERA5-Land, Hersbach *et al.*, 2020) y datos de teledetección (por ejemplo, GPM - Global Precipitation Measurement, Skofronick-Jackson *et al.*, 2017), que proporcionan información de precipitación para caracterizar la variabilidad hidroclimática a escalas global y regional (por ejemplo, Dai & Wigley, 2000; Posada-Marín *et al.*, 2023). Sin embargo, estos conjuntos de datos suelen tener una resolución espacial más gruesa, lo que limita la capacidad para comprender la variabilidad hidroclimática a escalas locales. Esta información es esencial para mitigar los riesgos asociados con las amenazas naturales derivadas de dicha variabilidad. Por ejemplo, muchas cuencas que abastecen embalses hidroeléctricos cubren áreas relativamente pequeñas, y estos conjuntos de datos no logran capturar completamente la variabilidad espacio-temporal de la precipitación dentro de ellas (por ejemplo, Posada-Marín, Rendón, Salazar, Mejía & Villegas, 2019). En consecuencia, los datos de precipitación de resolución más fina son fundamentales para comprender la disponibilidad hídrica de las cuencas, garantizar operaciones hidroeléctricas eficientes y reducir las amenazas naturales vinculadas a modos de variabilidad climática como el ENOS.

En los últimos años, ha surgido una nueva generación de productos de precipitación que abordan las limitaciones de resolución espacial y se han convertido en una valiosa fuente de datos para mejorar las evaluaciones hidroclimáticas. Entre ellos, el conjunto de datos Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS, Funk *et al.*, 2015) proporciona estimaciones diarias de precipitación cuasi globales de alta resolución espacial, combinando imágenes satelitales con observaciones terrestres, lo que ha permitido su uso generalizado en estudios climáticos e hidrológicos en regiones tropicales. De manera similar, el conjunto Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks (PERSIANN, Nguyen *et al.*, 2018) ofrece cobertura global con énfasis en eventos extremos de precipitación, mientras que el producto Multi-Fuente Weighted-Ensemble Precipitation (MSWEP, Beck *et al.*, 2017) combina información de pluviómetros, satélites y reanálisis para ofrecer un conjunto balanceado con precisión mejorada en diversas regiones.

El conjunto de reanálisis ERA5-Land-Land (Muñoz-Sabater *et al.*, 2021), producido por el European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), integra modelación atmosférica y observaciones asimiladas para generar registros consistentes a largo plazo con resolución temporal horaria.

Estos conjuntos de datos han resultado útiles en regiones con registros *in situ* limitados; sin embargo, su representatividad puede variar considerablemente en áreas con topografía compleja, donde las estimaciones satelitales y los modelos de reanálisis pueden subestimar o representar de manera incorrecta los patrones locales de precipitación. Diversos estudios han destacado estos desafíos, mostrando que el desempeño de los productos en malla está fuertemente condicionado por los gradientes topográficos y climáticos (Amjad, Yilmaz, Yucel & Yilmaz, 2020; Hafizi & Sorman, 2022; López-Bermeo, Montoya, Caro-Lopera & Díaz-García, 2022; Nadeem *et al.*, 2022; Peña-Guerrero, Umirbekov, Tarasova & Müller, 2022; Valencia, Marín, Gómez, Hoyos, Salazar & Villegas, 2023; Amjad, Shahzad & Hassan, 2025).

Por lo tanto, aunque estas bases de datos proporcionan cobertura espacial continua y

permiten análisis comparativos, su eficacia en cuencas montañosas —como los Andes Tropicales— requiere una validación cuidadosa frente a las redes de pluviómetros disponibles antes de poder incorporarlas de manera confiable a los procesos de gestión de recursos hídricos y toma de decisiones a escala de cuenca.

En este estudio, evaluamos la capacidad de cuatro conjuntos de datos de precipitación en malla para representar las características hidroclimáticas de la cuenca Peñol-Guatapé, una cuenca andina tropical donde la precipitación desempeña un papel fundamental en el sostenimiento de la generación hidroeléctrica, piedra angular del suministro eléctrico de Colombia. La caracterización precisa de la dinámica de la precipitación en la cuenca está limitada por su topografía montañosa y una red pluviométrica escasa, lo que introduce incertidumbres en las evaluaciones hidroclimáticas y en la planificación de los recursos hídricos. Además, la cuenca es sensible a la variabilidad climática a gran escala, particularmente al ENOS, que puede desencadenar anomalías significativas en la precipitación y aumentar la probabilidad de extremos hidrológicos.

Asimismo, analizamos la relación entre el ENOS y la variabilidad y anomalías de precipitación, y examinamos cómo el ENOS modifica las funciones de densidad de probabilidad de la precipitación estacional, con énfasis en los posibles cambios en la ocurrencia de amenazas naturales. Al combinar evaluaciones a escala de cuenca con análisis impulsados por el ENOS, este estudio ayuda a cerrar la brecha entre los conjuntos de datos de precipitación y su aplicabilidad en cuencas locales dentro de regiones montañosas, ofreciendo información relevante tanto para la comprensión científica como para la gestión del recurso hídrico.

## ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca Peñol-Guatapé se encuentra en la zona central de los Andes Tropicales, en la región oriental del departamento de Antioquia, Colombia. Esta cuenca es una de las más importantes de la región, ya que aporta hasta 10 GWh/día al sistema interconectado nacional, con una capacidad máxima de almacenamiento de 1.240 Mm<sup>3</sup> y profundidades máxima y promedio de 43 m y 27,5 m, respectivamente (Aguirre Ramírez, Palacio Baena & Ramírez Restrepo,

2007). El embalse cubre un área de 1.218 km<sup>2</sup>, ofreciendo diversos servicios ecosistémicos —como el abastecimiento de agua, el turismo y la generación hidroeléctrica— que benefician tanto a las comunidades locales como regionales.

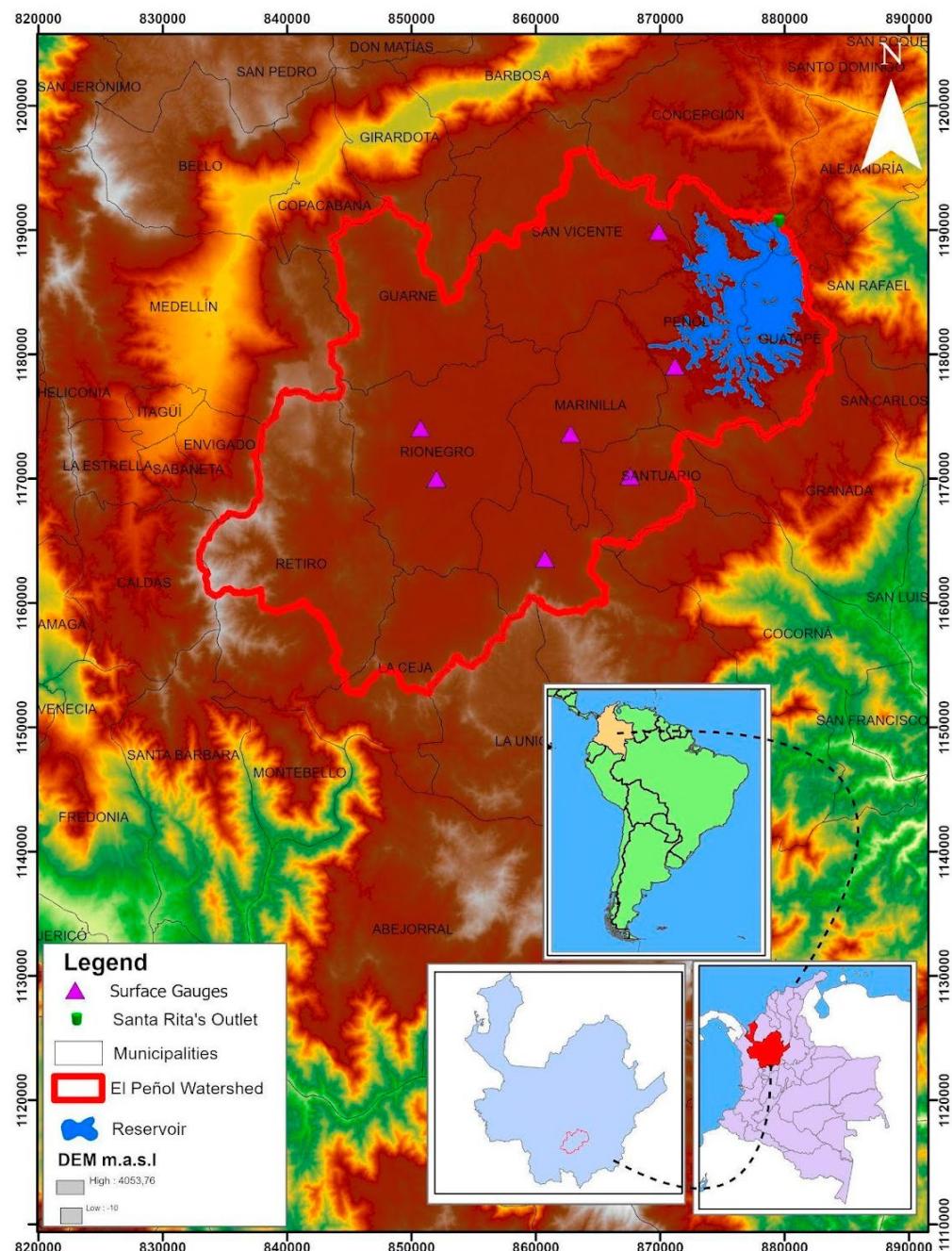
La cuenca se caracteriza por una topografía compleja, con un paisaje fragmentado por numerosas islas y penínsulas. Se encuentra a una altitud promedio de 1.900 metros sobre el nivel del mar y presenta un clima húmedo y templado, con una temperatura media anual entre 17 °C y 19 °C (Aguirre Ramírez *et al.*, 2007). Entre sus servicios ecosistémicos, el embalse contribuye a la regulación de los flujos de agua, controlando las inundaciones en la parte baja de la cuenca y almacenando agua durante las temporadas lluviosas para su uso en las épocas secas.

Además, sustenta diversas especies acuáticas y terrestres, proporcionando hábitat para la fauna local, incluyendo aves, peces y otros organismos dependientes de los ecosistemas acuáticos y ribereños (Aguirre Ramírez *et al.*, 2007). El embalse también ofrece servicios culturales a través del turismo, la recreación, el valor paisajístico y la educación ambiental. Las condiciones hidroclimáticas de la cuenca están fuertemente influenciadas por el ENOS, lo que representa riesgos para la provisión de servicios ecosistémicos y la estabilidad de la seguridad hídrica y energética.

## METODOLOGÍA

### Evaluación del desempeño de los conjuntos de datos de precipitación

Las condiciones hidroclimáticas en la cuenca del embalse Peñol-Guatapé durante el periodo 1983–2022 se caracterizaron utilizando datos de precipitación (P) provenientes de varios conjuntos de datos de alta resolución (Tabla 1). Estos conjuntos incluyeron un reanálisis atmosférico (ERA5-Land-Land) y tres conjuntos de datos de precipitación que integran información de teledetección y estaciones de superficie mediante técnicas de inteligencia artificial y asimilación de datos para el monitoreo hidroclimático. Los valores de precipitación de estos productos se compararon con datos provenientes de siete pluviómetros superficiales administrados por



**Figura 1.** Ubicación geográfica de la cuenca Peñol-Guatapé (polígono rojo), que alimenta el embalse (polígono azul). Los triángulos indican los pluviómetros superficiales utilizados en este estudio.

el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Colombia). Las series temporales de precipitación empleadas en este estudio consistieron en datos mensuales previamente procesados y controlados en calidad por el IDEAM, garantizando la homogeneidad y

confiabilidad de los registros. Para este análisis, se verificó que todas las series temporales cubrieran el mismo periodo (1983-2022) y no presentaran valores faltantes, evitando así la necesidad de aplicar procedimientos de reconstrucción de datos.

**Tabla 1.** Fuentes de datos hidroclimáticos utilizadas en este estudio.

Fuente	Categoría	Resolución Espacial [km]	Resolución Temporal	Periodo de operación	Referencia
ERA5-Land-Land	Reanálisis	9	Mensual	1940-presente	<a href="https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-land-monthly-means?tab=overview">https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-land-monthly-means?tab=overview</a>
CHIRPS	Teledetección	5	Mensual	1981- presente	<a href="https://www.chc.ucsb.edu/data/chirps">https://www.chc.ucsb.edu/data/chirps</a>
PERSIANN	Teledetección	4	Mensual	1983- presente	<a href="https://chrsdata.eng.uci.edu/">https://chrsdata.eng.uci.edu/</a>
MSWEP	Teledetección	9	Mensual	1979- presente	<a href="https://www.gloh2o.org/mswep/">https://www.gloh2o.org/mswep/</a>
IDEAM	Surface gauges. Aeropuerto J.M. Cordova Aut [23085270] Campoalegre [23080650] Corrientes [23085160] La Selva Aut [23085260] Marinilla [23080640] El Penol [23085110] Santuario [23080920]	-	Mensual	1983 -presente	<a href="http://dhime.ideal.gov.co/webgis/home/">http://dhime.ideal.gov.co/webgis/home/</a>

Se realizó una comparación de los conjuntos de datos de alta resolución mediante un conjunto de indicadores estadísticos para evaluar su desempeño en la representación de las distribuciones espaciales y temporales de la precipitación (por ejemplo,, Posada-Marín *et al.*, 2019). Para cada pluviómetro, se extrajo la serie temporal de estimaciones correspondiente al píxel en el que se encuentra la estación. Este enfoque fue consistente con la técnica Match-up, que relaciona directamente las observaciones *in situ* con los valores de la celda de la cuadrícula del conjunto de datos. Las métricas estadísticas aplicadas incluyeron la evaluación de: (1) El error cuadrático medio (RMSE), (2) El error relativo (E%), (3) El coeficiente de correlación (R), y (4) La desviación estándar (SD):

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \times \sum_{k=1}^N (M_k - O_k)^2} \quad [1]$$

$$E\% = \sum_{k=1}^N \frac{M_k - O_k}{O_k} \quad [2]$$

$$R = \frac{\sum_{k=1}^N (O_k - \bar{O})(M_k - \bar{M})}{\sqrt{\sum_{k=1}^N (O_k - \bar{O})^2 \sum_{k=1}^N (M_k - \bar{M})^2}} \quad [3]$$

$$\text{SD} = \sqrt{\frac{1}{N} \times \sum_{k=1}^N (O_k - \bar{O})^2} \quad [4]$$

En estas ecuaciones, O y M representan los valores de las estaciones y de los productos en malla, respectivamente, para un tiempo o punto determinado (el índice k identifica tiempo o espacio, según el caso), y N denota el tamaño de la muestra. Además, se utilizaron diagramas de Taylor para evaluar la variabilidad espacial de la precipitación sobre la cuenca Peñol-Guatapé, comparando todas las fuentes de información en malla con las observaciones superficiales en

términos de error, variabilidad y correlación. Con el fin de garantizar la solidez de los análisis posteriores, se basó la evaluación de los conjuntos de datos de precipitación en la comparación con los pluviómetros del IDEAM, con el objetivo de identificar el producto que mejor representara la dinámica de la precipitación en la cuenca. Este paso de selección es una práctica común en los estudios hidroclimáticos, ya que garantiza que la base de datos utilizada para analizar las teleconexiones climáticas a gran escala sea la más consistente con las observaciones locales.

A partir de esta evaluación, se examinó la influencia del ENOS sobre la variabilidad de la precipitación, relacionando las anomalías en malla con diferentes índices ENOS.

### **Análisis de compuestos del ENOS**

La relación entre el ENOS y las condiciones hidroclimáticas en la cuenca del embalse Peñol-

Guatapé se analizó mediante técnicas estadísticas (por ejemplo, Dai & Wigley, 2000; Posada-Marín *et al.*, 2023) aplicadas a las series temporales anuales y estacionales de precipitación y de los índices ENOS (Tabla 2). Usamos las relaciones más fuertes identificadas en este análisis, junto con la evaluación de los conjuntos de datos, para calcular las anomalías de precipitación inducidas por el ENOS. Los eventos seleccionados de ENOS (El Niño y La Niña) fueron primero promediados y luego sustraídos de los promedios de las fases neutrales para formar las anomalías compuestas. Las diferencias estadísticamente significativas en los compuestos del ENOS se determinaron mediante una prueba t de Student de dos colas con un nivel de confianza del 0.95. Estas diferencias se evaluaron entre los compuestos de diferentes fases del ENOS en cada celda de malla, garantizando que la correlación espacial no afectara la prueba (por ejemplo, Posada-Marín *et al.*, 2023).

**Tabla 2.** Índices de ENOS utilizados en este estudio.

Fuente	Categoría	Resolución Temporal	Referencia
Índice Oceánico del Niño (ONI)	Oceánico	Mensual	<a href="https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php">https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php</a>
Índice de la región Niño 1+2	Oceánico	Mensual	<a href="https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/nino-sst-indices-nino-12-3-34-4-oni-and-tni">https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/nino-sst-indices-nino-12-3-34-4-oni-and-tni</a>
Índice de la región Niño 3.4	Oceánico	Mensual	<a href="https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/nino-sst-indices-nino-12-3-34-4-oni-and-tni">https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/nino-sst-indices-nino-12-3-34-4-oni-and-tni</a>
Índice de la región Niño 3	Oceánico	Mensual	<a href="https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/nino-sst-indices-nino-12-3-34-4-oni-and-tni">https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/nino-sst-indices-nino-12-3-34-4-oni-and-tni</a>
Índice de la región Niño 4	Oceánico	Mensual	<a href="https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/nino-sst-indices-nino-12-3-34-4-oni-and-tni">https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/nino-sst-indices-nino-12-3-34-4-oni-and-tni</a>

Aunque los registros pluviométricos de las siete estaciones superficiales del IDEAM ubicadas dentro de la cuenca Peñol-Guatapé proporcionan información valiosa como fuente de realidad en tierra, su distribución espacial es dispersa y desigual, lo que limita su capacidad para capturar la alta variabilidad espacial de la precipitación en una cuenca montañosa. Por esta razón, nuestro análisis se basó principalmente en productos de precipitación en malla—CHIRPS, PERSIANN, MSWEP y ERA5-Land-Land—que ofrecen cobertura espacial continua. Estos conjuntos de datos permiten caracterizar la

dinámica de la precipitación a escalas espaciales más finas y realizar validaciones cruzadas entre fuentes independientes, aumentando así la robustez de los resultados. No obstante, reconociendo las incertidumbres asociadas con los productos de teledetección y reanálisis en regiones con topografía compleja, validamos las cuatro bases de datos frente a las estaciones IDEAM disponibles antes de incorporarlas en la evaluación hidroclimática, garantizando que las observaciones locales sirvieran como referencia esencial.

## RESULTADOS

### **Desempeño de los conjuntos de datos de precipitación**

La Figura 2 sintetiza la capacidad de los conjuntos de datos en malla para representar la variabilidad espacio-temporal de la precipitación anual en la cuenca Peñol-Guatapé. Usando como referencia las estaciones superficiales del IDEAM, el conjunto de datos que mejor representó la variabilidad anual de la precipitación fue CHIRPS, que presentó el error de magnitud más bajo y un RMSE de 0.42 mm/día. En contraste, el conjunto PERSIANN mostró el RMSE más alto (3.36 mm/día), indicando debilidades en su capacidad para representar la magnitud de la precipitación. Todos los conjuntos de datos en malla capturaron el patrón temporal de la precipitación anual en la cuenca, según el coeficiente de correlación (Fig. 2a,  $R > 0.7$ ), siendo CHIRPS el que lo capturó con mayor precisión. La representación de la variabilidad temporal, indicada por la razón entre las desviaciones estándar de los conjuntos de datos en malla y las de las estaciones superficiales (SDM/SDO), mostró que MSWEP y CHIRPS proporcionaron aproximaciones muy cercanas de la variabilidad anual. Cuanto más cercana a 1 sea esta razón, mejor es la representación de la variabilidad observada. CHIRPS subestimó ligeramente la precipitación anual, con un error porcentual medio de 0.2% y valores mínimos y máximos de -18.1% y 11.6%. MSWEP presentó el segundo mejor desempeño ( $E\% = 4.0\%$ ), pero con una mayor variabilidad en el error (valores mínimo y máximo de -19.0% y 32.0%). PERSIANN sobreestimó la precipitación en casi un 50%, con un valor máximo de 116.2%, lo que evidencia problemas serios para representar la magnitud de la precipitación anual (Fig. 2b).

En cuanto a la variabilidad espacial del promedio anual, todos los conjuntos de datos capturaron el patrón espacial ( $R > 0.6$ ), excepto ERA5-Land (Fig. 2c). En conclusión, CHIRPS proporcionó la mejor representación del patrón espacial, con un coeficiente de correlación y una razón entre desviaciones estándar cercanos a 0.7 y 0.5, respectivamente. A pesar de su marcada sobreestimación, PERSIANN capturó un patrón espacial similar al de CHIRPS. En contraste, MSWEP y ERA5-Land no lograron representar

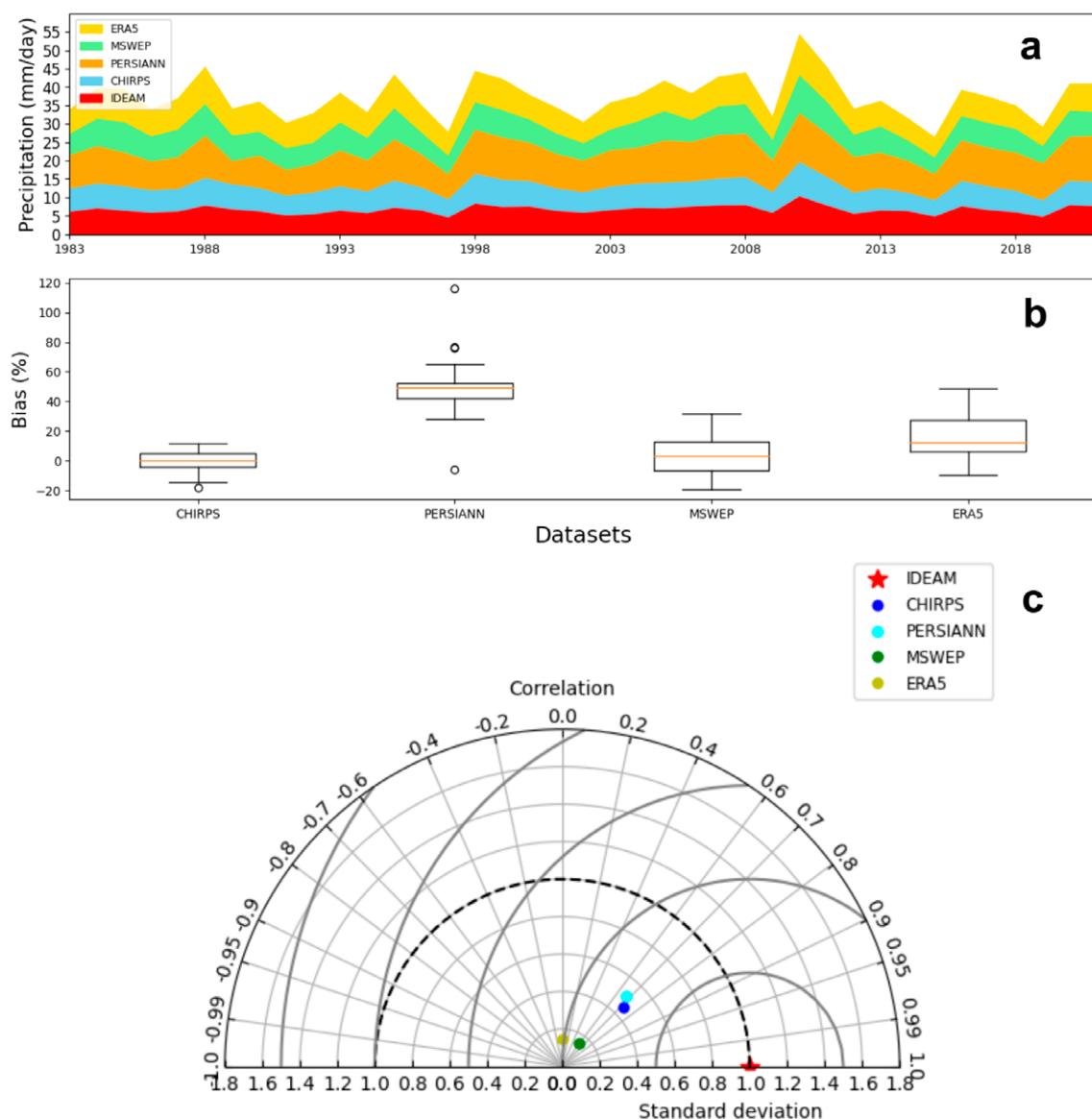
adecuadamente el patrón espacial, probablemente debido a su resolución espacial más gruesa. ERA5-Land-Land presentó la resolución más baja (9 km), lo que limita su capacidad para representar la variabilidad espacial dentro de la cuenca Peñol-Guatapé.

La Figura 3 resume la capacidad de los conjuntos de datos en malla para representar el ciclo anual de precipitación en la cuenca Peñol-Guatapé. Estos conjuntos capturaron eficazmente la fase del ciclo anual, el cual sigue un patrón bimodal influenciado por la migración de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT). Este patrón incluye una estación seca de diciembre a febrero (DJF), dos estaciones lluviosas de marzo a mayo (MAM) y de septiembre a noviembre (SON), y una estación de transición de junio a agosto (JJA). Las diversas fuentes de datos de teledetección reflejaron con precisión la variabilidad intraanual ( $SDM/SDO \sim 1.0$ ). Sin embargo, el conjunto PERSIANN tendió a sobreestimar considerablemente la precipitación mensual (3.27 mm/día, 53%), especialmente durante la estación seca. CHIRPS y MSWEP mostraron un desempeño comparable, aunque CHIRPS presentó una ligera ventaja debido a su menor error relativo y a una variabilidad de error más reducida. Con base en estos resultados, CHIRPS se destacó como el conjunto de datos más consistente con la información de las estaciones superficiales.

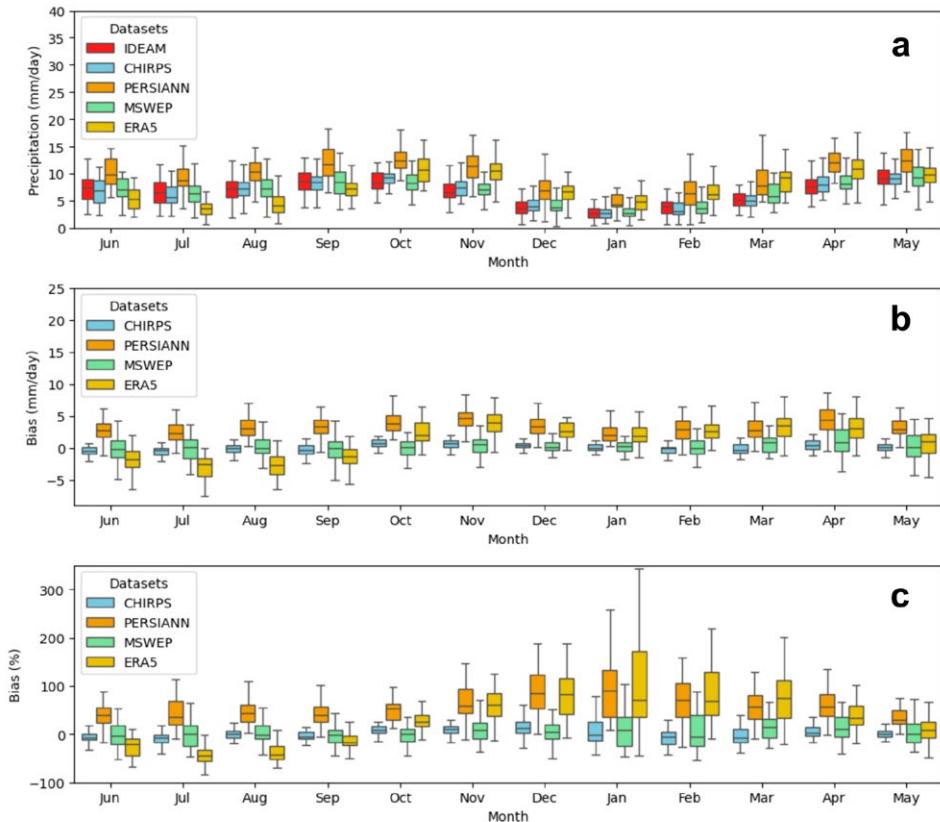
La Figura 4 muestra diagramas de Taylor que representan la capacidad de los distintos conjuntos de datos para capturar la distribución espacial de la precipitación media estacional en la cuenca Peñol-Guatapé. Usando como referencia las observaciones de las estaciones superficiales para los diagramas de Taylor normalizados, se encontró que ERA5-Land y MSWEP no logran representar con precisión la variabilidad espacial de la precipitación estacional en la cuenca. Ambos conjuntos presentaron valores de correlación ( $R$ ) inferiores a 0.5, excepto durante el periodo de septiembre a noviembre (SON). Además, durante todos los trimestres, estos conjuntos mostraron mayor diferencia entre sus desviaciones estándar y las observadas en superficie, excepto en ERA5-Land durante SON. Estos problemas surgen debido a la resolución espacial más gruesa de los conjuntos de datos en relación con el tamaño de la cuenca Peñol-Guatapé. En contraste, PERSIANN

y CHIRPS mostraron valores de correlación superiores a 0.5 en todos los trimestres, excepto para PERSIANN durante diciembre a febrero (DJF). CHIRPS logró capturar aproximadamente la mitad de la variabilidad espacial de la precipitación en comparación con los datos de las estaciones superficiales. Aunque ambos

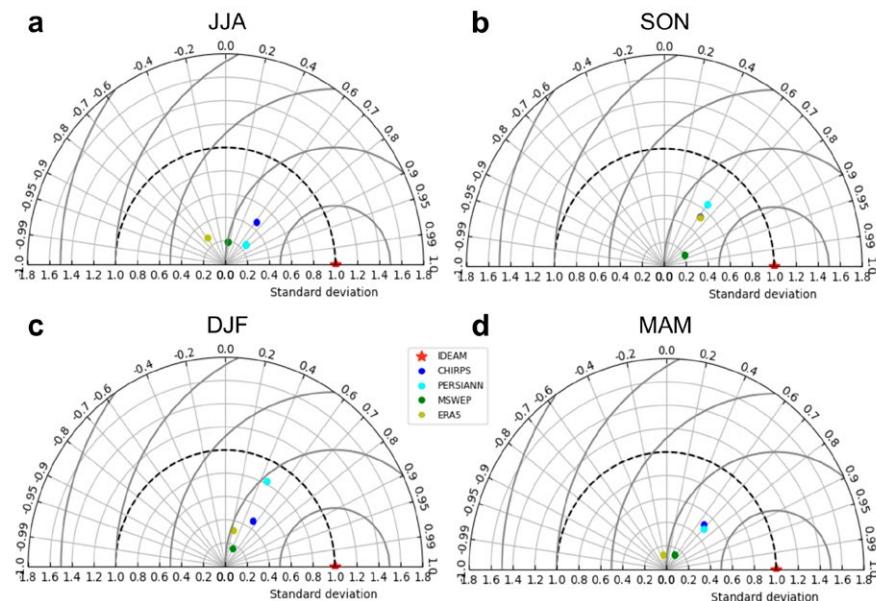
conjuntos mostraron capacidades similares, PERSIANN presentó dificultades para representar la magnitud de la precipitación, especialmente en DJF. En consecuencia, CHIRPS resultó ser el más efectivo para capturar la distribución espacial de la precipitación media estacional en la cuenca Peñol-Guatapé.



**Figura 2.** (a) Series anuales de precipitación en la cuenca a partir de varios conjuntos de datos; (b) error relativo de 1983 a 2022; y (c) diagrama de Taylor que resume la capacidad de los conjuntos de datos para representar la distribución espacial de la precipitación media anual en la cuenca.



**Figura 3.** Diagramas de caja que muestran el ciclo anual de (a) precipitación en la cuenca a partir de los conjuntos de datos durante 1983-2022, (b) error absoluto y (c) error relativo.

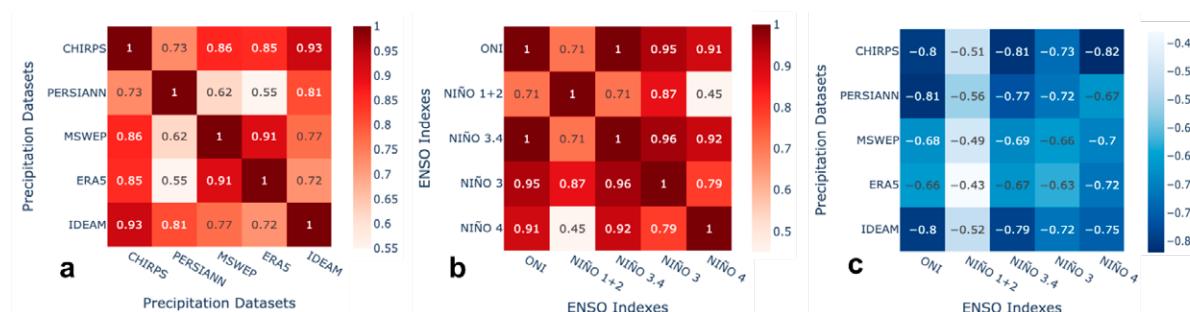


**Figura 4.** Diagramas de Taylor que resumen la capacidad de los conjuntos de datos para representar la distribución espacial de la precipitación estacional media en la cuenca durante (a) junio-julio-agosto (JJA), (b) septiembre-octubre-noviembre (SON), (c) diciembre-enero-febrero (DJF) y (d) marzo-abril-mayo (MAM) para el período 1983-2022.

## Relación entre ENOS y las condiciones hidrocimáticas

La Figura 5 muestra las correlaciones temporales entre los conjuntos de datos de precipitación y los índices ENOS a escala anual. CHIRPS, seguido de PERSIANN, presentó el mejor ajuste entre los datos en malla y las estaciones superficiales del IDEAM, mientras que ERA5-Land presentó la correlación más baja (Fig. 5a). En cuanto a los índices ENOS, la correlación más fuerte ocurrió entre los índices Niño 3.4 y Niño 3 (Fig. 5b,  $R = 0.95$ ). Esta alta correlación se debe a su estrecha proximidad geográfica y a los procesos oceánico-atmosféricos compartidos que impulsan los eventos de El Niño y La Niña. Las anomalías de temperatura en ambas regiones están influenciadas por la misma dinámica climática de gran escala y por la propagación hacia el este de aguas cálidas en el Pacífico ecuatorial.

Como resultado, ambos índices capturan cambios sincronizados en la temperatura superficial del mar durante estos fenómenos climáticos. Una relación similar se presenta entre el ONI y el índice Niño 3, siendo el ONI calculado a partir de anomalías de temperatura superficial del mar (SST) en la región Niño 3.4 del Pacífico ecuatorial. El mayor valor de correlación entre la precipitación de las estaciones superficiales y los índices ENOS se observó con el ONI (Fig. 5c). Como se mencionó anteriormente, CHIRPS mostró una mejor capacidad para representar los datos de precipitación de las estaciones. Sin embargo, la mayor correlación entre este conjunto de datos y los índices ENOS corresponde al Niño 4, aunque también es significativa con el Niño 3 y el ONI. Con base en este análisis, utilizamos el índice ONI para calcular las anomalías de precipitación a partir de CHIRPS en la cuenca Peñol-Guatapé.



**Figura 5.** Mapas de calor que muestran las correlaciones entre (a) los conjuntos de datos de precipitación, (b) los índices ENOS y (c) los conjuntos de datos de precipitación versus índices ENOS a escala anual.

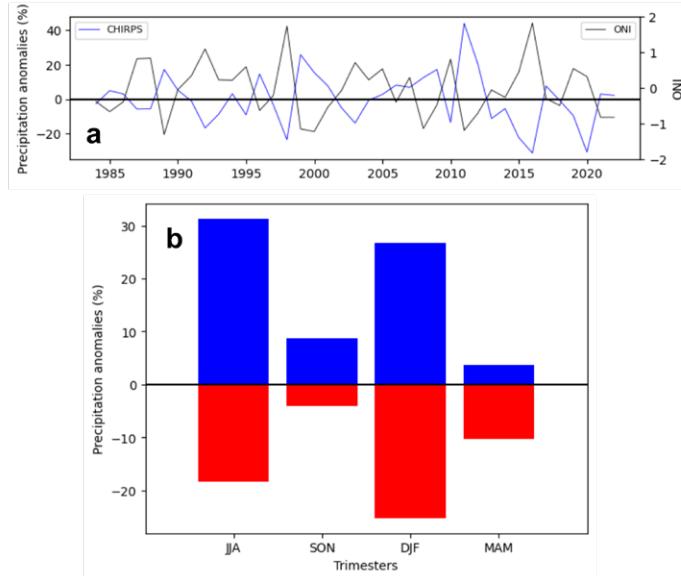
## Anomalías en la precipitación inducidas por ENOS

La Figura 6 presenta las anomalías anuales y estacionales de precipitación inducidas por las fases del ENOS. Se identifica una relación inversa entre el índice ONI y las anomalías anuales de precipitación sobre la cuenca Peñol-Guatapé (Fig. 6a). Esto indica que el calentamiento (enfriamiento) asociado con El Niño (La Niña) en el Pacífico redujo (aumentó) la precipitación en la cuenca. Las reducciones más significativas en la precipitación inducidas por El Niño ocurrieron durante 2015-2016 (31.3%), cuando el calentamiento en el Pacífico fue más intenso según el ONI (1.82). Por el contrario, durante el evento La Niña 2010-2011, el incremento en la precipitación fue más pronunciado (43.0%), aunque este no fue el año

con el mayor enfriamiento (1988-1989). Estos resultados destacan la influencia significativa del ENOS en los patrones de precipitación en la cuenca Peñol-Guatapé. La sustancial reducción en la precipitación durante El Niño 2015-2016 concuerda con las expectativas de disminución bajo condiciones cálidas en el Pacífico. Del mismo modo, el notable aumento durante La Niña 2010-2011 confirma el incremento esperado bajo temperaturas oceánicas más frías. Sin embargo, el hecho de que el mayor aumento de precipitación no coincide con el mayor enfriamiento sugiere que otros factores atmosféricos o regionales pueden modular la respuesta hidrológica de la cuenca frente a las fases de ENOS. En ambas fases, las anomalías más fuertes ocurren durante JJA y SON (Fig. 6b). Durante JJA, el compuesto de El Niño (La Niña) sugiere reducciones (aumentos) en la

precipitación cercanas al 18% (30%). Durante el trimestre DJF, las reducciones inducidas por El Niño son más intensas (alrededor del 25%). Estos

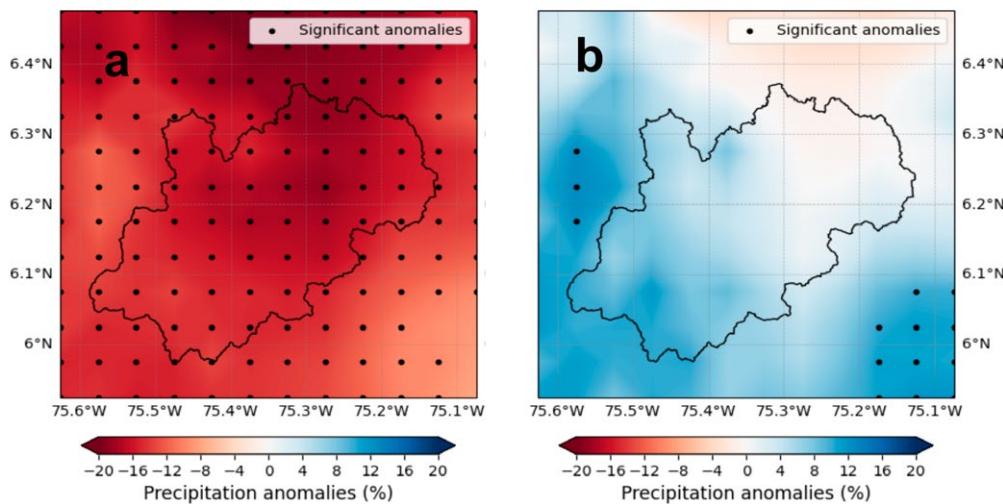
resultados coinciden con los patrones esperados: El Niño genera condiciones más secas, mientras que La Niña intensifica la precipitación.



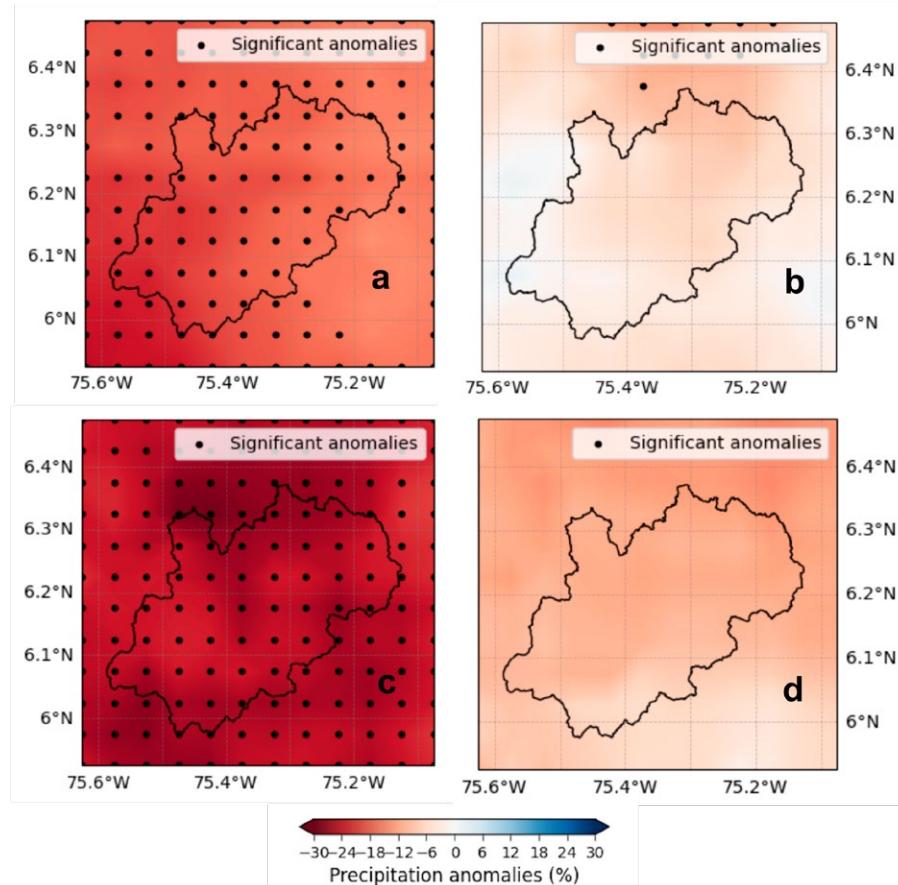
**Figura 6.** (a) Anomalías anuales y (b) estacionales de precipitación inducidas por las fases de ENOS.

La Figura 7 muestra la distribución espacial del promedio anual de largo plazo de las anomalías de precipitación inducidas por ENOS. La fase El Niño causó reducciones significativas en la precipitación sobre la cuenca, que pueden superar el 20% del promedio anual (Fig. 7a). Estas reducciones fueron más intensas en la parte media de la cuenca. En contraste, la fase La Niña generó aumentos de precipitación que pueden alcanzar aproximadamente el 8% del promedio anual; sin embargo, estas diferencias no fueron estadísticamente significativas (Fig. 7b). Estos resultados resaltan el riesgo potencial para la seguridad hídrico-energética de la cuenca durante eventos de El Niño, dado que la reducción sustancial en la precipitación podría conducir a una menor disponibilidad de agua para la generación hidroeléctrica. Además, los incrementos de precipitación asociados a La Niña, aunque presentes, fueron menos pronunciados, lo que sugiere una capacidad limitada para amortiguar amenazas naturales como sequías, y a la vez un posible incremento del riesgo de inundaciones en ciertas áreas, aunque con un impacto menor en la estabilidad hidroclimática de largo plazo.

La Figura 8 muestra la distribución espacial del promedio estacional de largo plazo de las anomalías de precipitación inducidas por El Niño. Esta fase de ENOS generó reducciones en la precipitación durante todas las estaciones del año, con disminuciones significativas en toda la cuenca durante los trimestres JJA y DJF, que corresponden a los períodos más secos y críticos para la generación hidroeléctrica. En particular, durante DJF, estas reducciones fueron más severas, superando el 30% de la precipitación típica para este período. Históricamente, estas disminuciones en la precipitación han amenazado la disponibilidad de agua y la generación hidroeléctrica en la región (Posada-Marín *et al.*, 2019). Cabe destacar que las reducciones durante DJF fueron más pronunciadas en la región norte de la cuenca. Las estrategias de mitigación ante los riesgos hídricos-energéticos inducidos por El Niño podrían priorizarse en esta zona. Al atender estas vulnerabilidades, los actores involucrados pueden mejorar la disponibilidad de agua y asegurar una generación hidroeléctrica más confiable, reduciendo así el riesgo que los eventos El Niño representan para la seguridad energética de la región y su resiliencia frente a amenazas naturales.



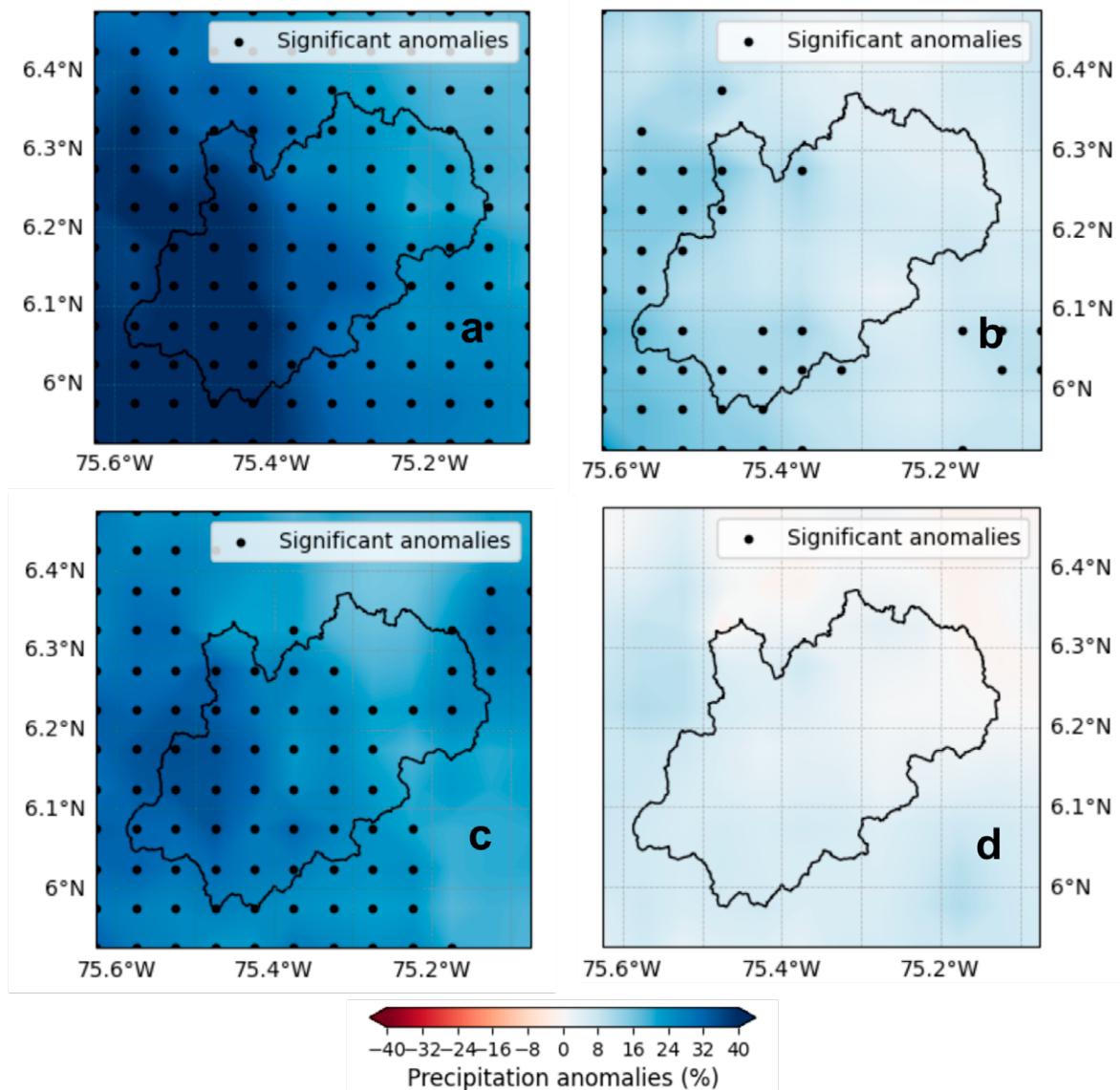
**Figura 7.** Distribución espacial del promedio anual de largo plazo de las anomalías de precipitación inducidas por ENOS durante (a) El Niño y (b) La Niña. Los puntos indican diferencias estadísticamente significativas (nivel de confianza del 0.95).



**Figura 8.** Distribución espacial del promedio estacional de largo plazo de las anomalías de precipitación inducidas por El Niño durante (a) JJA, (b) SON, (c) DJF y (d) MAM. Los puntos indican diferencias estadísticamente significativas (nivel de confianza del 0.95).

La Figura 9 muestra la distribución espacial del promedio estacional de largo plazo de las anomalías de precipitación inducidas por La Niña. Durante los trimestres JJA y DJF, esta fase del ENOS presentó anomalías que oscilaron entre el 16% y el 40%, lo que indica un aumento de la precipitación durante las temporadas secas, favoreciendo una mayor acumulación de agua en el suelo. De acuerdo con Emerton *et al.* (2017), este incremento en la precipitación influye en la ocurrencia y severidad de amenazas naturales

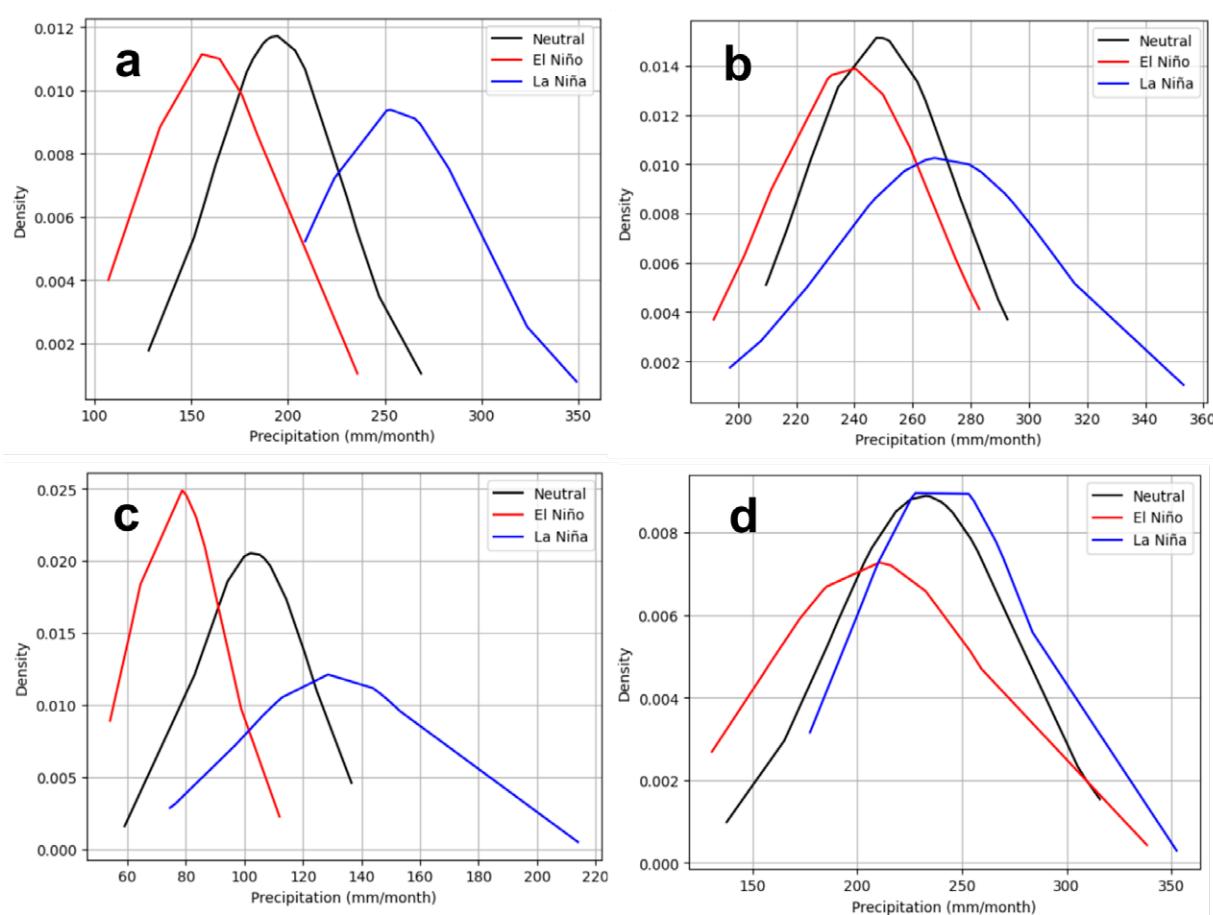
en los Andes. En consecuencia, tales aumentos de lluvia previos a las temporadas húmedas pueden desencadenar deslizamientos de tierra e inundaciones, lo que representa riesgos para la vida humana, la vivienda y el desarrollo sostenible dentro del área crítica de la cuenca. Esta región, localizada en la zona de Montaña Andina Tropical, se caracteriza por un relieve complejo con pendientes abruptas, lo que la hace particularmente vulnerable a dichas amenazas naturales (Vega *et al.*, 2024).



**Figura 9.** Distribución espacial del promedio estacional de largo plazo de las anomalías de precipitación inducidas por La Niña durante (a) JJA, (b) SON, (c) DJF y (d) MAM. Los puntos indican diferencias estadísticamente significativas (nivel de confianza del 0.95).

La Figura 10 presenta las funciones de densidad de probabilidad de la precipitación media estacional durante las fases del ENOS en la cuenca Peñol-Guatapé. Durante JJA y DJF (Figs. 10a y 10c), las estaciones más críticas para la disponibilidad hídrica, las fases de El Niño redujeron significativamente la precipitación, aumentando así la probabilidad de desabastecimiento (valores  $p < 0.05$ ). De manera similar, La Niña generó incrementos significativos en las funciones de densidad de probabilidad de la precipitación media estacional durante estos trimestres. En contraste, para SON y MAM (Figs. 10b y 10d), los cambios en la precipitación media estacional inducidos por las fases del ENOS no fueron significativos (valores  $p > 0.05$ ). Estas variaciones en los patrones de precipitación tienen importantes implicaciones para la ocurrencia de amenazas naturales relacionadas con el agua. La reducción de la precipitación durante

El Niño puede generar condiciones de sequía, aumentando el riesgo de desabastecimiento hídrico que afecta la generación hidroeléctrica, el suministro de agua potable y los ecosistemas. Por el contrario, el incremento de la precipitación durante La Niña puede resultar en inundaciones y deslizamientos, particularmente en áreas vulnerables. Comprender estas dinámicas es crucial para implementar estrategias efectivas de gestión del riesgo de desastres, dado que la cuenca Peñol-Guatapé puede enfrentar períodos alternantes de escasez y exceso de agua, lo que requiere medidas adaptativas para mitigar los impactos de estas amenazas naturales. Esta adición vincula los hallazgos con las implicaciones más amplias para las amenazas naturales, enfatizando la importancia de comprender estos patrones de precipitación para una gestión y mitigación efectivas.



**Figura 10.** Funciones de densidad de probabilidad de la precipitación estacional durante las fases del ENOS: (a) JJA, (b) SON, (c) DJF y (d) MAM.

## DISCUSIÓN

Los resultados de este estudio confirmaron el papel dominante del ENOS en la configuración de la variabilidad de la precipitación en la cuenca Peñol-Guatapé, pero también destacaron patrones locales que enriquecen la comprensión más amplia de las dinámicas hidroclimáticas en cuencas andinas tropicales. Aunque López-Bermeo *et al.* (2022) realizaron una validación a escala regional de CHIRPS en una zona más amplia, nuestro estudio contribuye al reducir esta evaluación a una cuenca hidroeléctrica de relevancia estratégica. Esta perspectiva localizada es necesaria porque el desempeño de los conjuntos de datos de precipitación presenta una fuerte heterogeneidad espacial, especialmente en terrenos montañosos donde los efectos topográficos amplifican o atenuan las señales del ENOS. Así, este trabajo se posiciona como un estudio de caso que demuestra cómo los conjuntos de datos de alta resolución pueden apoyar la gestión del agua a escala de cuenca bajo condiciones de variabilidad climática.

La asimetría estacional de las anomalías inducidas por el ENOS, con impactos más fuertes durante los períodos secos de JJA y DJF, subraya una vulnerabilidad crítica para la disponibilidad de agua y la producción hidroeléctrica. Dependencias similares se han reportado en otras cuencas andinas y asiáticas (Ng *et al.*, 2017; Gao *et al.*, 2022), pero nuestros resultados refuerzan que algunas cuencas tropicales de montaña son particularmente sensibles a los déficits de precipitación durante El Niño y a los excesos de lluvia durante La Niña. Esta dualidad resalta la transferibilidad de nuestra metodología y hallazgos a otras cuencas de montaña tropical donde la hidroelectricidad, los ecosistemas y las comunidades están simultáneamente expuestos a sequías e inundaciones.

Un resultado notable es la no linealidad de las respuestas de la cuenca a las fases del ENOS. Por ejemplo, el mayor aumento de precipitación no coincidió con el mayor enfriamiento del Pacífico. Esto sugiere que el forzamiento a gran escala del ENOS interactúa con dinámicas atmosféricas regionales —como los chorros de bajo nivel y el reciclaje de humedad terrestre— para configurar la hidroclimatología local (Builes-Jaramillo, Yepes & Salas, 2022; Posada-Marín *et al.*, 2023).

Además, estudios previos habían reportado que los impactos del ENOS en la precipitación en Colombia pueden exhibir un desfase temporal respecto al inicio de las condiciones del ENOS en el Pacífico (Poveda & Mesa, 1997; Poveda, Jaramillo, Gil, Quiceno & Mantilla, 2001). Aunque nuestro estudio no cuantificó este desfase para la cuenca Peñol-Guatapé, lo reconocemos como una limitación relevante y recomendamos su evaluación detallada en investigaciones futuras. Estos hallazgos exigen una interpretación más matizada de los impactos del ENOS que vaya más allá de una simple teleconexión lineal.

No obstante, este estudio abordó el ENOS como un fenómeno binario (El Niño vs. La Niña), omitiendo la diversidad de tipos de ENOS (Pacífico oriental, Pacífico central o eventos Modoki). Investigaciones recientes demuestran que estos “sabores” del ENOS ejercen impactos diferenciados sobre los extremos de precipitación y las amenazas naturales (por ejemplo, Feng, Chen & Tung, 2020; Yan, Wu, Li & Tan, 2022; Mahajan *et al.*, 2023), con implicaciones para la seguridad hídrica regional. Reconocemos esto como una limitación de nuestro trabajo, pero también como una oportunidad para que futuras investigaciones incorporen esta diversidad del ENOS en evaluaciones de riesgo para cuencas andinas tropicales.

Más allá de las implicaciones locales, los hallazgos se conectan con debates globales sobre cómo el ENOS amplifica los riesgos multiamenaza bajo el cambio climático (por ejemplo, Cai *et al.*, 2015). Estudios previos han demostrado que las fases del ENOS modulan no solo la precipitación, sino también extremos compuestos como secuencias de sequía-inundación, pérdidas agrícolas y crisis sanitarias (Singh *et al.*, 2022; Woyessa *et al.*, 2023). Al vincular las anomalías de precipitación inducidas por el ENOS con la seguridad energética en Colombia, nuestro trabajo enfatiza el papel del ENOS como un amplificador de riesgo intersectorial. Sin embargo, es importante señalar que nuestro análisis se basó en anomalías de precipitación como un proxy de primer orden para posibles impactos en la generación hidroeléctrica. Una evaluación integral requeriría incorporar variables hidrológicas, dinámicas de embalses y registros de producción energética, lo cual estaba fuera del alcance de este estudio. Por

lo tanto, reconocemos esto como una limitación metodológica y recomendamos que futuras investigaciones aborden estos vínculos con mayor detalle.

Finalmente, es importante señalar que este estudio no evaluó otras fuentes de variabilidad climática, como los ciclos solares, ni sus posibles interacciones con las fases del ENOS. Diferenciar los efectos de estos forzamientos sigue siendo un desafío para futuras investigaciones. Abordar tales complejidades, junto con la diversidad del ENOS, permitiría refinar aún más nuestra comprensión de los riesgos hidroclimáticos en regiones montañosas.

En síntesis, este estudio aporta una perspectiva localizada y orientada a la aplicación sobre los impactos del ENOS en una cuenca andina tropical. Al situar nuestros hallazgos dentro de la validación regional de conjuntos de datos de precipitación y conectarlos con debates contemporáneos sobre la diversidad del ENOS y el cambio climático, proporcionamos una contribución práctica para la gestión hídrico-energética a escala de cuenca y un puente hacia discusiones científicas más amplias sobre telecomunicaciones y riesgos multiamenaza. Estos hallazgos, aunque enraizados en la cuenca Peñol-Guatapé, tienen implicaciones más amplias para otras cuencas tropicales de montaña alrededor del mundo. Regiones de Asia, África y Centroamérica comparten desafíos similares de topografía compleja, fuerte sensibilidad al ENOS y dependencia de sistemas agua-energía, lo que hace que validaciones localizadas y evaluaciones de impactos del ENOS sean altamente relevantes más allá de Colombia. Al situar nuestros resultados dentro de este contexto internacional, el estudio no solo aborda una brecha de investigación a escala regional, sino que también contribuye al debate global sobre las telecomunicaciones océano-atmósfera y la amplificación de riesgos hidroclimáticos bajo el cambio climático.

## **CONCLUSIONES**

Entre los conjuntos de datos de precipitación evaluados, CHIRPS resultó ser el más preciso para representar la dinámica de la precipitación en la cuenca Peñol-Guatapé, al presentar el menor error relativo y la mayor concordancia con los registros de estaciones superficiales. Esto refuerza la originalidad de nuestro estudio

como una validación localizada en una cuenca hidroenergética estratégica de los Andes, complementando análisis a escala regional con evidencia adaptada a un entorno montañoso complejo.

Los resultados confirman que el ENOS ejerce una influencia determinante en la hidroclimatología de la cuenca, donde El Niño produce reducciones severas en la precipitación—en algunos casos superiores al 30% durante las temporadas secas— mientras que La Niña incrementa la precipitación y el riesgo de inundaciones. Estas dinámicas plantean desafíos duales para la producción hidroeléctrica y la seguridad hídrica, lo que resalta la necesidad de estrategias de manejo adaptativo que integren datos de alta resolución para mejorar la anticipación de extremos climáticos en cuencas tropicales de montaña vulnerables.

Más allá del caso local, estos hallazgos tienen implicaciones amplias para otras regiones sensibles al ENOS, donde la variabilidad de la precipitación amenaza tanto los ecosistemas como la infraestructura hídrica y energética estratégica. Al situar este trabajo junto con validaciones regionales y vincularlo con debates internacionales sobre telecomunicaciones, destacamos la relevancia de las evaluaciones a escala de cuenca para el análisis global del riesgo hidroclimático.

Finalmente, este estudio reconoce como limitación metodológica el tratamiento del ENOS como un fenómeno binario. Investigaciones futuras deberían abordar la diversidad del ENOS y su interacción con el cambio climático, así como incorporar evaluaciones estacionales y multiamenaza de sequías, inundaciones y movimientos en masa en cuencas andinas. Avanzar en esta dirección no solo permitirá perfeccionar las estrategias locales de gestión del riesgo, sino también fortalecer la contribución de las cuencas de montaña tropicales al diálogo global sobre variabilidad climática y eventos extremos.

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores desean agradecer a la Dirección de Investigación de la Institución Universitaria Digital de Antioquia por su apoyo durante el desarrollo de este trabajo.

## FINANCIACIÓN

Este trabajo fue financiado por la Convocatoria Interna de Investigación 2023 de la Institución Universitaria Digital de Antioquia.

## CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: J.A.P-M; Metodología: J.A.P-M, S.A.S-M, M.K.T-M; Validación: J.A.P-M, S.A.S-M; Análisis: J.A.P-M, S.A.S-M, M.K.T-M; Investigación: J.A.P-M, S.A.S-M, M.K.T-M; Redacción del manuscrito: J.A.P-M, S.A.S-M, M.K.T-M; Revisión y edición: S.A.S-M, M.K.T-M; Gestión del proyecto: J.A.P-M. Todos los autores han leído y aprobado la versión publicada del manuscrito.

## REFERENCIAS

- Aguirre Ramírez, N. J., Palacio Baena, J., & Ramírez Restrepo, J. J. (2007). Características limnológicas del embalse el Peñol-Guatapé, Colombia. Revista Ingenierías Universidad de Medellín, 6(10), 53-66.
- Amjad, M., Yilmaz, M. T., Yucel, I., & Yilmaz, K. K. (2020). Performance evaluation of satellite- and model-based precipitation products over varying climate and complex topography. Journal of Hydrology, 584, 124707. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124707>
- Amjad, M., Shahzad, N., & Hassan, W. U. (2025). Accuracy assessment of potential alternatives to observed precipitation for extremes over complex topography. Theoretical and Applied Climatology, 156(1), 42. <https://doi.org/10.1007/s00704-024-05232-x>
- An, D., Eggeling, J., Zhang, L., He, H., Sapkota, A., Wang, Y. C., & Gao, C. (2023). Extreme precipitation patterns in the Asia-Pacific region and its correlation with El Niño-Southern Oscillation (ENSO). Scientific Reports, 13(1), 11068. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-38317-0> PMID:37422491 PMCid:PMC10329631
- Arias, P. A., Bellouin, N., Coppola, E., Jones, R. G., Krinner, G., Marotzke, J., *et al.* (2021). Technical summary. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, *et al.*, Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (pp. 33–144). Cambridge University Press.
- Beck, H. E., Van Dijk, A. I., Levizzani, V., Schellekens, J., Miralles, D. G., Martens, B., & De Roo, A. (2017). MSWEP: 3-hourly 0.25 global gridded precipitation (1979–2015) by merging gauge, satellite, and reanalysis data. Hydrology and Earth System Sciences, 21(1), 589–615. <https://doi.org/10.5194/hess-21-589-2017>
- Becker, A., Finger, P., Meyer-Christoffer, A., Rudolf, B., Schamm, K., Schneider, U., & Ziese, M. (2013). A description of the global land-surface precipitation data products of the Global Precipitation Climatology Centre with sample applications including centennial (trend) analysis from 1901–present. Earth System Science Data, 5(1), 71–99. <https://doi.org/10.5194/essd-5-71-2013>
- Bolaños, S., Salazar, J. F., Betancur, T., & Werner, M. (2021). GRACE reveals depletion of water storage in northwestern South America between ENSO extremes. Journal of Hydrology, 596, 125687. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125687>
- Builes-Jaramillo, A., Yepes, J., & Salas, H. D. (2022). The Orinoco Low-Level Jet and its association with the hydroclimatology of Northern South America. Journal of Hydrometeorology, 23(2), 209–223. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-21-0073.1>
- Cai, W., Wang, G., Santoso, A., McPhaden, M. J., Wu, L., Jin, F. F., ... & Guilyardi, E. (2015). Increased frequency of extreme La Niña events under greenhouse warming. Nature Climate Change, 5(2), 132–137. <https://doi.org/10.1038/nclimate2492>
- Cai, W., McPhaden, M. J., Grimm, A. M., Rodrigues, R. R., Taschetto, A. S., Garreaud, R. D., ... & Vera, C. (2020). Climate impacts of the El Niño-southern oscillation on South America. Nature Reviews Earth & Environment, 1(4), 215–231. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0040-3>
- Cai, W., Ng, B., Wang, G., Santoso, A., Wu, L., & Yang, K. (2022). Increased ENSO Sea surface

- temperature variability under four IPCC emission scenarios. *Nature Climate Change*, 12(3), 228-231. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01282-z>
- Dai, A., & Wigley, T. M. L. (2000). Global patterns of ENSO-induced precipitation. *Geophysical Research Letters*, 27(9), 1283-1286. <https://doi.org/10.1029/1999GL011140>
- Duque-Escobar, G. (2007). Amenazas naturales en los Andes de Colombia. Departamento de Matemáticas y Estadística.
- Emberson, R., Kirschbaum, D., & Stanley, T. (2021). Global connections between El Niño and landslide impacts. *Nature communications*, 12(1), 2262. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22398-4> PMid:33859185 PMCid:PMC8050240
- Emerton, R., Cloke, H. L., Stephens, E. M., Zsoter, E., Woolnough, S. J., & Pappenberger, F. (2017). Complex picture for likelihood of ENSO-driven flood hazard. *Nature communications*, 8(1), 14796. <https://doi.org/10.1038/ncomms14796> PMid:28294113 PMCid:PMC5355947
- Feng, Y., Chen, X., & Tung, K. K. (2020). ENSO diversity and the recent appearance of Central Pacific ENSO. *Climate Dynamics*, 54(1), 413-433. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-05005-7>
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., ... & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific data*, 2(1), 1-21. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66> PMid:26646728 PMCid:PMC4672685
- Gao, J., Zhao, J., Hou, P., & Wang, H. (2022). Effects of ENSO on hydrological process and hydropower across the Lancang-Mekong River Basin. *River*, 1(2), 172-188. <https://doi.org/10.1002/rvr.2.25>
- Hafizi, H., & Sorman, A. A. (2022). Assessment of 13 gridded precipitation datasets for hydrological modeling in a mountainous basin. *Atmosphere*, 13(1), 143. <https://doi.org/10.3390/atmos13010143>
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., ... & Thépaut, J. N. (2020). The ERA5-Land global reanalysis. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 146(730), 1999-2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Holmgren, M., Scheffer, M., Ezcurra, E., Gutiérrez, J. R., & Mohren, G. M. (2001). El Niño effects on the dynamics of terrestrial ecosystems. *Trends in Ecology & Evolution*, 16(2), 89-94. [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(00\)02052-8](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(00)02052-8) PMid:11165707
- Jiménez-Sánchez, G., Markowski, P. M., Jewtoukoff, V., Young, G. S., & Stensrud, D. J. (2019). The Orinoco low-level jet: An investigation of its characteristics and evolution using the WRF model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(20), 10696-10711. <https://doi.org/10.1029/2019JD030934>
- Kim, K., Chowdhury, R., Pant, P., Yamashita, E., & Ghimire, J. (2021). Assessment of ENSO risks to support transportation resilience. *Progress in disaster science*, 12, 100196. <https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2021.100196>
- Lin, J., & Qian, T. (2019). A new picture of the global impacts of El Niño-Southern oscillation. *Scientific reports*, 9(1), 17543. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54090-5> PMid:31772238 PMCid:PMC6879734
- López-Bermeo, C., Montoya, R. D., Caro-Lopera, F. J., & Díaz-García, J. A. (2022). Validation of the accuracy of the CHIRPS precipitation dataset at representing climate variability in a tropical mountainous region of South America. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 127, 103184. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2022.103184>
- Mahajan, S., Passarella, L. S., Tang, Q., Keen, N. D., Caldwell, P. M., van Roekel, L. P., & Golaz, J. C. (2023). ENSO diversity and the simulation of its teleconnections to winter precipitation extremes over the US in high resolution earth system models. *Geophysical Research Letters*, 50(11), e2022GL102657. <https://doi.org/10.1029/2022GL102657>
- McPhaden, M. J., Zebiak, S. E., & Glantz, M. H. (2006). ENSO as an integrating concept in earth science. *science*, 314(5806), 1740-1745. <https://doi.org/10.1126/science.1132588> PMid:17170296

- Mishra, V. (2020). Long-term (1870–2018) drought reconstruction in context of surface water security in India. *Journal of Hydrology*, 580, 124228. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124228>
- Montini, T. L., Jones, C., & Carvalho, L. M. (2019). The South American low-level jet: A new climatology, variability, and changes. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(3), 1200-1218. <https://doi.org/10.1029/2018JD029634>
- Muñoz, E., Poveda, G., Arbeláez, M. P., & Vélez, I. D. (2021). Spatiotemporal dynamics of dengue in Colombia in relation to the combined effects of local climate and ENSO. *Acta Tropica*, 224, 106136. <https://doi.org/10.1016/j.actatropica.2021.106136> PMID:34555353
- Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., Balsamo, G., ... & Thépaut, J. N. (2021). ERA5-Land-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth system science data*, 13(9), 4349-4383. <https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021>
- Muza, O. (2017). El Niño-Southern Oscillation influences on food security. *Journal of Sustainable Development*, 10(5), 268-279. <https://doi.org/10.5539/jsd.v10n5p268>
- Nadeem, M. U., Anjum, M. N., Afzal, A., Azam, M., Hussain, F., Usman, M., ... & Majeed, F. (2022). Assessment of multi-Satellite precipitation products over the Himalayan mountains of Pakistan, South Asia. *Sustainability*, 14(14), 8490. <https://doi.org/10.3390/su14148490>
- Ng, J. Y., Turner, S. W., & Galelli, S. (2017). Influence of El Niño Southern Oscillation on global hydropower production. *Environmental Research Letters*, 12(3), 034010. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa5ef8>
- Nguyen, P., Ombadi, M., Sorooshian, S., Hsu, K., AghaKouchak, A., Braithwaite, D., ... & Thorstensen, A. R. (2018). The PERSIANN family of global satellite precipitation data: A review and evaluation of products. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(11), 5801-5816. <https://doi.org/10.5194/hess-22-5801-2018>
- Peña-Guerrero, M. D., Umirbekov, A., Tarasova, L., & Müller, D. (2022). Comparing the performance of high-resolution global precipitation products across topographic and climatic gradients of Central Asia. *International Journal of Climatology*, 42(11), 5554-5569. <https://doi.org/10.1002/joc.7548>
- Posada-Marín, J. A., Rendón, A. M., Salazar, J. F., Mejía, J. F., & Villegas, J. C. (2019). WRF downscaling improves ERA-Interim representation of precipitation around a tropical Andean valley during El Niño: implications for GCM-scale simulation of precipitation over complex terrain. *Climate Dynamics*, 52, 3609-3629. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4403-0>
- Posada-Marín, J. A., Arias, P. A., Jaramillo, F., & Salazar, J. F. (2023). Global impacts of El Niño on terrestrial moisture recycling. *Geophysical Research Letters*, 50(10), e2023GL103147. <https://doi.org/10.1029/2023GL103147>
- Poveda, G., & Mesa, O. J. (1997). Feedbacks between hydrological processes in tropical South America and large-scale ocean-atmospheric phenomena. *Journal of climate*, 10(10), 2690-2702. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1997\)010<2690:FBHPIT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1997)010<2690:FBHPIT>2.0.CO;2)
- Poveda, G., Jaramillo, A., Gil, M. M., Quiceno, N., & Mantilla, R. I. (2001). Seasonality in ENSO-related precipitation, river discharges, soil moisture, and vegetation index in Colombia. *Water resources research*, 37(8), 2169-2178. <https://doi.org/10.1029/2000WR900395>
- Poveda, G., Mesa, O. J., & Waylen, P. R. (2003). Nonlinear forecasting of river flows in Colombia based upon ENSO and its associated economic value for hydropower generation. *Climate and water: transboundary challenges in the Americas*, 351-371. [https://doi.org/10.1007/978-94-015-1250-3\\_15](https://doi.org/10.1007/978-94-015-1250-3_15)
- Poveda, G., Álvarez, D. M., & Rueda, O. A. (2011). Hydro-climatic variability over the Andes of Colombia associated with ENSO: a review of climatic processes and their impact on one of the Earth's most important biodiversity hotspots. *Climate Dynamics*, 36, 2233-2249. <https://doi.org/10.1007/s00382-010-0931-y>

- Valencia, S., Marín, D. E., Gómez, D., Hoyos, N., Salazar, J. F., & Villegas, J. C. (2023). Spatio-temporal assessment of Gridded precipitation products across topographic and climatic gradients in Colombia. *Atmospheric Research*, 285, 106643. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.106643>
- Vicente-Serrano, S. M., Aguilar, E., Martínez, R., Martín-Hernández, N., Azorin-Molina, C., Sánchez-Lorenzo, A., ... & Nieto, R. (2017). The complex influence of ENSO on droughts in Ecuador. *Climate Dynamics*, 48, 405-427. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3082-y>
- Sazib, N., Mladenova, L. E., & Bolten, J. D. (2020). Assessing the impact of ENSO on agriculture over Africa using earth observation data. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, 509914. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.509914>
- Sierra, J. P., Arias, P. A., Durán-Quesada, A. M., Tapias, K. A., Vieira, S. C., & Martínez, J. A. (2021). The Choco low-level jet: past, present and future. *Climate Dynamics*, 56, 2667-2692. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05611-w>
- Singh, J., Ashfaq, M., Skinner, C. B., Anderson, W. B., Mishra, V., & Singh, D. (2022). Enhanced risk of concurrent regional droughts with increased ENSO variability and warming. *Nature Climate Change*, 12(2), 163-170. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01276-3>
- Skofronick-Jackson, G., Petersen, W. A., Berg, W., Kidd, C., Stocker, E. F., Kirschbaum, D. B., ... & Wilheit, T. (2017). The Global Precipitation Measurement (GPM) mission for science and society. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(8), 1679-1695. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00306.1> PMid:31359880 PMCid:PMC6662228
- Sun, X., Renard, B., Thyer, M., Westra, S., & Lang, M. (2015). A global analysis of the asymmetric effect of ENSO on extreme precipitation. *Journal of Hydrology*, 530, 51-65. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.09.016>
- Vega, J., Barco, J., & Hidalgo, C. (2024). Space-time analysis of the relationship between landslides occurrence, precipitation variability and ENSO in the Tropical Andean Mountain region in Colombia. *Landslides*, 1-22. <https://doi.org/10.1007/s10346-024-02225-9>
- Veldkamp, T. I., Wada, Y., de Moel, H., Kummu, M., Eisner, S., Aerts, J. C., & Ward, P. J. (2015). Changing mechanism of global water scarcity events: Impacts of socioeconomic changes and inter-annual hydro-climatic variability. *Global Environmental Change*, 32, 18-29. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.02.011>
- Vilímek, V., Hanzlík, J., Sládek, I., Šandov, M., & Santillán, N. (2013). The share of landslides in the occurrence of natural hazards and the significance of El Niño in the Cordillera Blanca and Cordillera Negra Mountains, Peru. *Landslides: global risk preparedness*, 133-148. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-22087-6\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-642-22087-6_9)
- Wang, C. (2007). Variability of the Caribbean low-level jet and its relations to climate. *Climate dynamics*, 29, 411-422. <https://doi.org/10.1007/s00382-007-0243-z>
- Woyessa, A., Siebert, A., Owusu, A., Cousin, R., Dinku, T., & Thomson, M. C. (2023). El Niño and other climatic drivers of epidemic malaria in Ethiopia: new tools for national health adaptation plans. *Malaria Journal*, 22(1), 195. <https://doi.org/10.1186/s12936-023-04621-3> PMid:37355627 PMCid:PMC10290321
- Yan, Y., Wu, H., Gu, G., Ward, P. J., Luo, L., Li, X., ... & Tao, J. (2020). Exploring the ENSO impact on Basin-scale floods using hydrological simulations and TRMM precipitation. *Geophysical research letters*, 47(22), e2020GL089476. <https://doi.org/10.1029/2020GL089476>
- Yan, Z., Wu, B., Li, T., & Tan, G. (2022). Mechanisms determining diversity of ENSO-driven equatorial precipitation anomalies. *Journal of Climate*, 35(3), 923-939. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-21-0363.1>
- Yang, X., Wu, J., Liu, J., & Ye, X. (2021). Changes of extreme precipitation and possible influence of ENSO events in a humid basin in China. *Atmosphere*, 12(11), 1522. <https://doi.org/10.3390/atmos12111522>



**ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN**

**Alternativas de solución para la mitigación del fenómeno erosivo en Playa Salguero, Caribe colombiano**

***Solution Alternatives for the Mitigation of the Erosive Phenomena at Playa Salguero, Colombian Caribbean***

**DOI:** <https://doi.org/10.26640/22159045.2025.650>

**Fecha de recepción:** 2024-10-10 / **Fecha de evaluación:** xxxxxxxx / **Fecha de aceptación:** 2025-09-26

**Pablo Andrés Avendaño Castro<sup>1</sup>, José Andrés Díaz Ruiz<sup>2</sup>, Fernando Afanador Franco<sup>3</sup>**

**CITAR COMO:**

**Avendaño Castro, P. A., Díaz Ruiz, J. A. y Afanador Franco, F. (2025).** Alternativas de solución para la mitigación del fenómeno erosivo en Playa Salguero, Caribe colombiano. *Boletín Científico CIOH*, 44(2), 25-41. <https://doi.org/10.26640/22159045.2025.650>.

**RESUMEN**

En promedio ha retrocedido 15.16 metros (1.17 m/año) la línea de costa en el balneario de Playa Salguero (sur de la bahía de Gaira, Magdalena, Caribe colombiano) entre 2008 y 2021, basado en un análisis multitemporal de línea de costa, el cual determinó que la misma se encuentra en estado de erosión. Esto es comprobado numéricamente determinando tasas de transporte de sedimento, tanto transversal (0.97 m<sup>3</sup>/m.l. por hora de tormenta) como longitudinal (orden de 97820 m<sup>3</sup>/año), en el sector más crítico de erosión, justificando líneas de actuación orientadas a mitigar la problemática. Se proponen configuraciones de diseño de dique exento y tómbolo de playa conformado de relleno hidráulico de sedimento compatible, que permite reducir la pérdida neta de sedimento, añadiendo resiliencia a la playa.

**PALABRAS CLAVES:** zona costera, hidrodinámica, erosión, sedimentación, protección costera.

**ABSTRACT**

*Playa Salguero (south of Gaira Bay, Magdalena, Colombian Caribbean) coastline has experienced an average retreat of 15.16 meters (1.17m/year) between 2008 and 2021, based on a multitemporal shoreline analysis which determines its current erosion state. This is numerically proven by determining sediment transport rates, cross-shore (0.97m<sup>3</sup>/m.l. per hour of storm) as well as along-shore (order of 97820m<sup>3</sup>/year), at the most critical erosion sector, justifying some line of action orientated in mitigating the problematic. Offshore breakwater design configurations and beach tombolo conformed of hydraulic fill of compatible sediment are proposed, which allows to effectively reduce sediment net loss, adding resilience to the beach.*

**KEYWORDS:** Coastal zones, hydrodynamics, erosion, sedimentation, coastal protection.

<sup>1</sup> Orcid: 0009-0007-0271-732X. Investigador. Correo electrónico: pavendancast@hotmail.com

<sup>2</sup> Orcid: 0009-0006-0681-0268. Subdirector de Marina Mercante. Dirección General Marítima. Correo electrónico: jefsubmerc@dimar.mil.co

<sup>3</sup> Orcid: 0000-0003-4708-3280. Jefe de Sección Manejo Integrado de Zona Costera. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH). Correo electrónico: Fernando.Afanador@dimar.mil.co



Publicado por la Dimar

## INTRODUCCIÓN

La erosión costera es un fenómeno natural que supone el desequilibrio en el balance sedimentario de un litoral determinado; dependiendo de la incidencia e interacción de algunos factores como son el aumento relativo del nivel del mar, intervenciones antrópicas, eventos climáticos extremos, grado de exposición a la dinámica marina, entre otros. Las costas colombianas se encuentran, permanentemente, sometidas a la erosión costera, la cual puede variar teniendo en cuenta las características de los litorales en donde se observa el fenómeno (Dimar-CIOH, 2013); (Ricaurte-Villota et al., 2018).

Desde la década de 1960, el departamento del Magdalena ha registrado un incremento sostenido en la urbanización de su zona costera, evidenciado hoy en edificaciones y complejos multifamiliares ubicados a menos de 10 metros de la línea de la más alta marea, o en contacto directo con esta en áreas críticas como Playa Salguero. Antes de los años 50 esta playa mantenía un equilibrio dinámico influenciado por procesos naturales de acumulación y erosión, con aporte sólido del río Gaira, dunas en el supralitoral con vegetación trasera y de playa, y libre transporte eólico y litoral (INVEMAR, 2021). Según Invemar y Corpamag (2015), entre 2014 y 2015 se evidenció un retroceso de 22 metros en la línea de costa, con significativa pérdida de la playa trasera. En 2023, mediante el Decreto 092 del 03 de abril, la alcaldesa del distrito de Santa Marta declaró calamidad pública por erosión costera en el sector, suspendiendo la expedición de nuevas licencias de construcción hasta atender y corregir la problemática (Decreto 092 del 03 de abril, 2023).

El fenómeno de la erosión costera presente en dicho litoral es abordado mediante un estudio técnico investigativo, para conocer puntualmente las causas que han llevado a la calamidad pública, y ofrecer alternativas de solución que lo mitiguen.

La problemática se aborda desde grande a pequeña escala, realizando la caracterización y diagnóstico de la zona de estudio, apoyada en registros tanto históricos como actuales, información primaria y secundaria de climatología marina, entre otras fuentes de información, para la conformación de un modelo digital de elevación

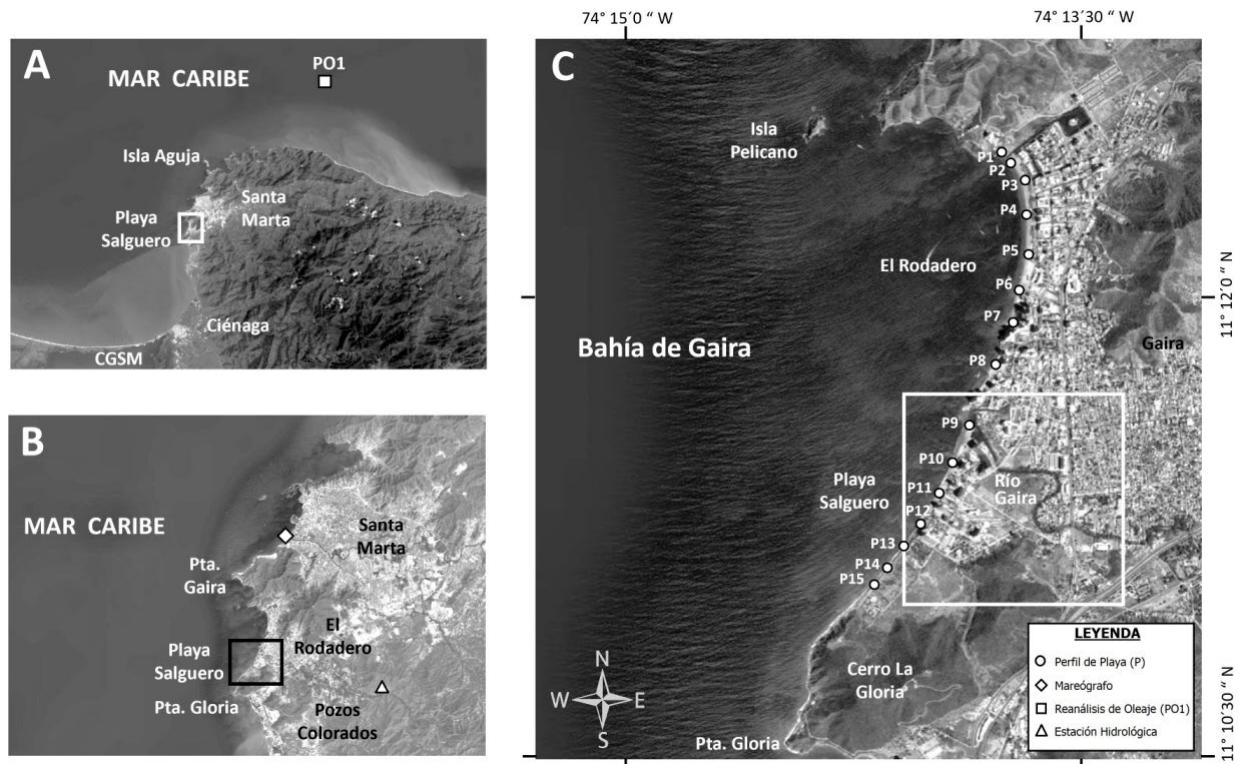
(MDE) representativo, que alimente unas etapas sucesivas de modelación numérica computacional. Se efectuó un análisis multitemporal de línea de costa en donde se analizaron los avances y retrocesos de la posición de esta desde el año 1944 hasta el 2021. Adicionalmente, se estimaron tasas de transporte litoral tanto longitudinal como transversal, que permitieron dimensionar la erosión costera y orientar las obras propuestas para contrarrestar la afectación del borde costero.

## ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se encuentra en el litoral del departamento del Magdalena, el cual se extiende desde Bocas de Ceniza hasta la desembocadura del río Palomino, con 170 km de longitud. En concreto se estudia a detalle el sector de Playa Salguero (Fig. 1), ubicado entre la desembocadura del río Gaira (al norte) y las estribaciones del cerro La Gloria (al sur), abarcando 1640 metros de línea de costa. Cuenta con cuatro unidades geomorfológicas: 1) Playas con fuerte pendiente y arenas medias a gruesas; 2) Llanura costera al oeste, con un escarpe de 2 a 4 metros de altura que desciende hasta el límite con la playa y cuyo sedimento proviene, principalmente, del cerro La Gloria, con contribuciones de material del río Gaira; 3) Llanura aluvial de extensión baja en inmediaciones del curso del río Gaira hasta llegar al mar en donde se estrecha; 4) Lomas y colinas entre las cuales se destaca el cerro La Gloria, con alturas desde los 10 a 143 msnm y con pendientes superiores al 15 % (Dimar-CIOH, 2013).

A nivel regional se destaca la cercanía a la desembocadura del río Magdalena, a 68 km y al complejo lagunar costero más grande de Colombia, la ciénaga Grande de Santa Marta, a 20 km. La morfología del borde costero entre ambos elementos genera una forma parabólica hacia el este, que se vuelve rectilíneo en dirección al oeste. La Sierra Nevada de Santa Marta (pico máximo a 5700 msnm) toma un rol de regulador climático y condensador de agua, que alimenta los principales cauces que drenan hacia sus alrededores (por ejemplo, el río Gaira) y que desvía vientos que inciden sobre la misma, generando incluso flujo turbulento en épocas dominadas por los intensos vientos Alisios (Ingeominas/Ecopetrol ICP/Invemar, 2008). A su vez, las rocosas costas del

macizo montañoso incluyen rocas ígneas y metamórficas, altamente resistentes a la acción del oleaje, albergando ensenadas protegidas (Dimar-CIOH, 2013).



**Figura 1.** Localización regional (A), local (B) y detallada (C) del área de estudio.

En la escala local se observan los distanciamientos de Playa Salguero respecto a algunas zonas de interés como son el Distrito Turístico, Cultural e Histórico de Santa Marta a 5 km al norte, lugar donde se encuentra la estación mareográfica (Fig. 1) que provee datos a la investigación. Por otra parte, a 14 km al norte de la zona de estudio se tiene también la isla de la Aguja, primer punto de difracción importante del oleaje en su propagación hacia Playa Salguero. Es en dicho punto donde el oleaje experimenta buena parte de su transformación, al aproximarse al promontorio rocoso sobre el mar Caribe, separado aproximadamente 600 m del continente.

A medida que el oleaje continúa su tránsito por el mar Caribe, superado el obstáculo de isla de la Aguja, este interactúa con tres bahías (Taganga, Santa Marta e Inca), antes de llegar a bahía de Gaira, donde se ubica el balneario de Playa Salguero. Es importante considerar el efecto de estas bahías, ya que el oleaje incidente

se refracta hacia cada una de ellas, en lo que consiste otro proceso de transformación del oleaje, disminuyendo su energía. En su tránsito por dicha zona, el oleaje también tiene que afrontar nuevos elementos morfológicos que generan difracción, como son: isla El Morro y punta Betín (bahía de Santa Marta), punta de Gaira e isla Pelícano, estas últimas en inmediaciones de la bahía de Gaira. Por su parte, la bahía de Gaira se divide en dos balnearios, separados por la desembocadura del río Gaira: El Rodadero al norte y Playa Salguero al sur.

## METODOLOGÍA

La investigación busca comprender, con la ayuda de herramientas de modelación numérica, el comportamiento morfodinámico de la zona de estudio y proponer alternativas de solución técnicamente sustentadas para mitigar el fenómeno de la erosión que se registra. Para lograr lo anterior se recurrió a distintas fuentes de

información, tanto primarias como secundarias (Tabla 1). La información primaria recopilada por instrumentos o sensores remotos, tanto *in situ* como a distancia (por ejemplo, levantamientos topo batimétricos, muestreos, imágenes de satélite, sobrevuelos), fue utilizada para la creación del MDE. Los sondajes batimétricos del fondo

marino y datos topobatimétricos en playa fueron levantados por el Servicio Hidrográfico Nacional (SHN) y la Sección Manejo Integrado de Zona Costera (Smizc), ambas dependencias orgánicas del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH).

**Tabla 1.** Relación de fuentes de información obtenidas.

Tipo de dato / parámetro	Fuente	Descripción	Ubicación
Batimetría regional	CIOH-SHN	Compilado batimétrico de sondajes históricos.	Departamento del Magdalena: mar territorial y mar interior
Batimetría local	CIOH-SHN	Levantamiento batimétrico monohaz actualizado a septiembre 2021, transectos cada 30 m.	Sector: Playa Salguero, ~500 m offshore
Topografía de playa y línea de costa	CIOH-Smizc	Levantamiento de 15 perfiles de playa y 2 km de línea de costa de referencia a noviembre de 2021.	Borde costero de balnearios El Rodadero y Playa Salguero
Granulometrías de playa	CIOH-Smizc	Toma de 14 muestras granulométricas (meso/infra - litoral)	Borde costero de balnearios El Rodadero y Playa Salguero
Fotografías aéreas históricas	IGAC	Años: 1944 (R-211), 1954 (M-15), 1985 (C-2228), 1987 (C-2289), 1991 (C-2451), 2004 (C-2721)	Bahía de Gaira
Ortofoto-mosaicos	Dimar	Años: 2008, 2021 (resolución espacial 25 y 15 cm, respectivamente)	Bahía de Gaira
Reanálisis de oleaje en aguas profundas (NOAA-WWIII)	NOAA-WWIII	Información secundaria. Altura de ola significante ( $H_s$ ), periodo pico ( $T_p$ ) y dirección media de oleaje ( $\theta$ ), [1979-2018], resolución trihoraria.	PO1 [Lat: 11.5000°, Lon: -74.0000°]
Registro de nivel del mar	UHSLC	Nivel del mar preprocesado [2012-2021], resolución horaria	Egsam [Lat: 11.2351°, Lon: -74.2215°]
Registro de estación hidrológica	Ideam	Estación Gaira [15017010]. Caudales medios diarios [1980].	Gaira [Lat: 11.1833°, Lon: -74.1833°]

**Nota:** Estación de Guardacostas de Santa Marta (Egsam). Instituto Geográfico "Agustín Codazzi" (IGAC). Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA) - WAVEWATCH III (WWIII). Centro del Nivel del Mar de la Universidad de Hawái (UHSLC). Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam).

El compilado batimétrico de sondajes históricos en la zona marina del departamento del Magdalena cuenta con un sondaje multihaz de 2009, que por completo cubre la bahía de Gaira, y más próximo a la zona marina en frente de Playa Salguero, un levantamiento monohaz realizado en 2021 (septiembre).

Para la interfase costera y zona terrestre se realizó, durante noviembre de 2021, el levantamiento de 15 perfiles de playa (cubriendo supralitoral, mesolitoral e infralitoral hasta el veril de 1 m), separados cada 200 m, de forma que cubrieran los balnearios de El Rodadero y Playa Salguero. La línea de costa levantada, con puntos

cada 10 m, abarcó desde el norte del balneario de El Rodadero hasta el sur de Playa Salguero, y sirve para tener referencias verticales a lo largo de todo el borde costero, independientemente del nivel del mar que hubiese en el momento. Se utilizó el ortofoto-mosaico de la zona producido por la Dimar, correspondiente a 2021 y otras imágenes satelitales para digitalizar, ajustar y llenar vacíos de información en la línea de costa, sirviendo este producto como referencia de la misma. Adicionalmente, se tomaron 14 muestras de sedimento sobre los perfiles de playa 1, 4, 7, 9, 11, 13 y 15, una muestra sobre el mesolitoral (línea de costa) y la otra en infralitoral (zona sumergida), los cuales fueron un insumo importante para los cálculos morfodinámicos, a los cuales les fueron realizados ensayos granulométricos por el método de tamizaje en el CIOH.

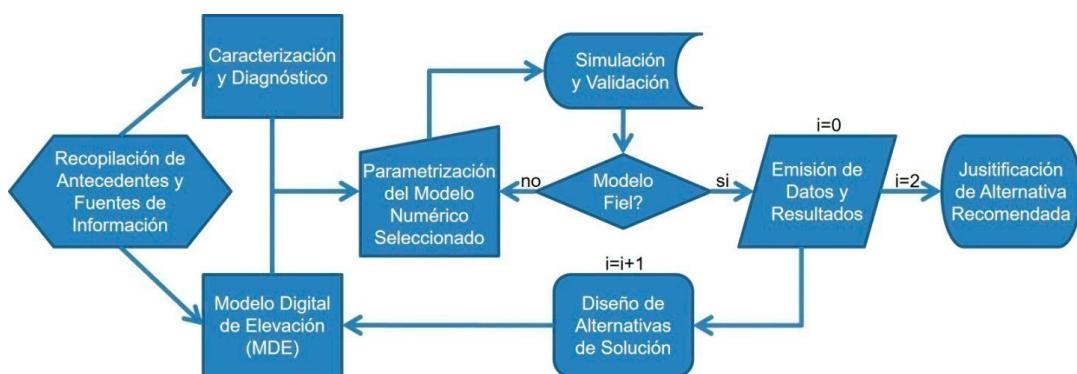
Otras imágenes de referencia, como lo son sobrevuelos históricos del IGAC y el ortofoto-mosaico de la Dimar de 2008, sirvieron para la elaboración de un diagnóstico y análisis multitemporal de la línea de costa desde 1944 hasta 2021. Para este análisis se utilizó la herramienta *Digital Shoreline Analysis Software (DSAS)* (Himmelstoss *et al.*, 2018) implementada dentro de la plataforma ArcGIS que formó parte integral del diagnóstico de la zona de estudio.

El dominio batimétrico del MDE generado cubrió la zona costa afuera, donde se ubicó el punto de reanálisis de oleaje obtenido (PO1) a 34 km en línea recta desde Playa Salguero, en aguas profundas (935 m). Dicho punto provino del modelo WAVEWATCHIII de la NOAA (WW3DG, 2019), conformando una serie de 39

años de datos trihorarios de oleaje significante y otros parámetros asociados. Se implementó el uso del software de Análisis Matemático y Estadístico de Variables Ambientales (Ameva) (Castellanos *et al.*, 2015) para realizar el análisis estadístico descriptivo de los datos, obteniendo regímenes medios, extremos, análisis direccional y estacional; también fue utilizado para analizar la variable asociada al nivel del mar.

El modelado del terreno se referenció verticalmente de manera que el valor cero fuera igual al nivel *Mean Low Water Springs (MLWS)* o promedio entre dos bajamares de sicigia sucesivas a lo largo del año. Se obtuvo el registro de nivel del mar del mareógrafo de Santa Marta, con nueve años de datos, preprocesados, validados y entregados como producto para investigación por la UHSLC (Caldwell *et al.*, 2015). A este registro se le realizó un análisis y descomposición de sus componentes armónicos que permitió obtener los rangos tanto de marea astronómica como meteorológica necesarios para la modelación mediante la herramienta libre *T\_Tide Harmonic Analysis Toolbox* (Pawlowicz *et al.*, 2002). Es de notar que si bien el registro de nivel el mar y, por lo tanto, su componente meteorológico cuenta apenas con nueve años de datos, ha captado huracanes importantes como Matthew, a finales de septiembre de 2016.

La recopilación de información fue utilizada para construir el diagnóstico y caracterización base de la zona de estudio, de manera que quedara planteado el problema y la ruta a seguir para establecer alguna línea de solución, por tanto, se presenta el siguiente esquema metodológico (Fig. 2):

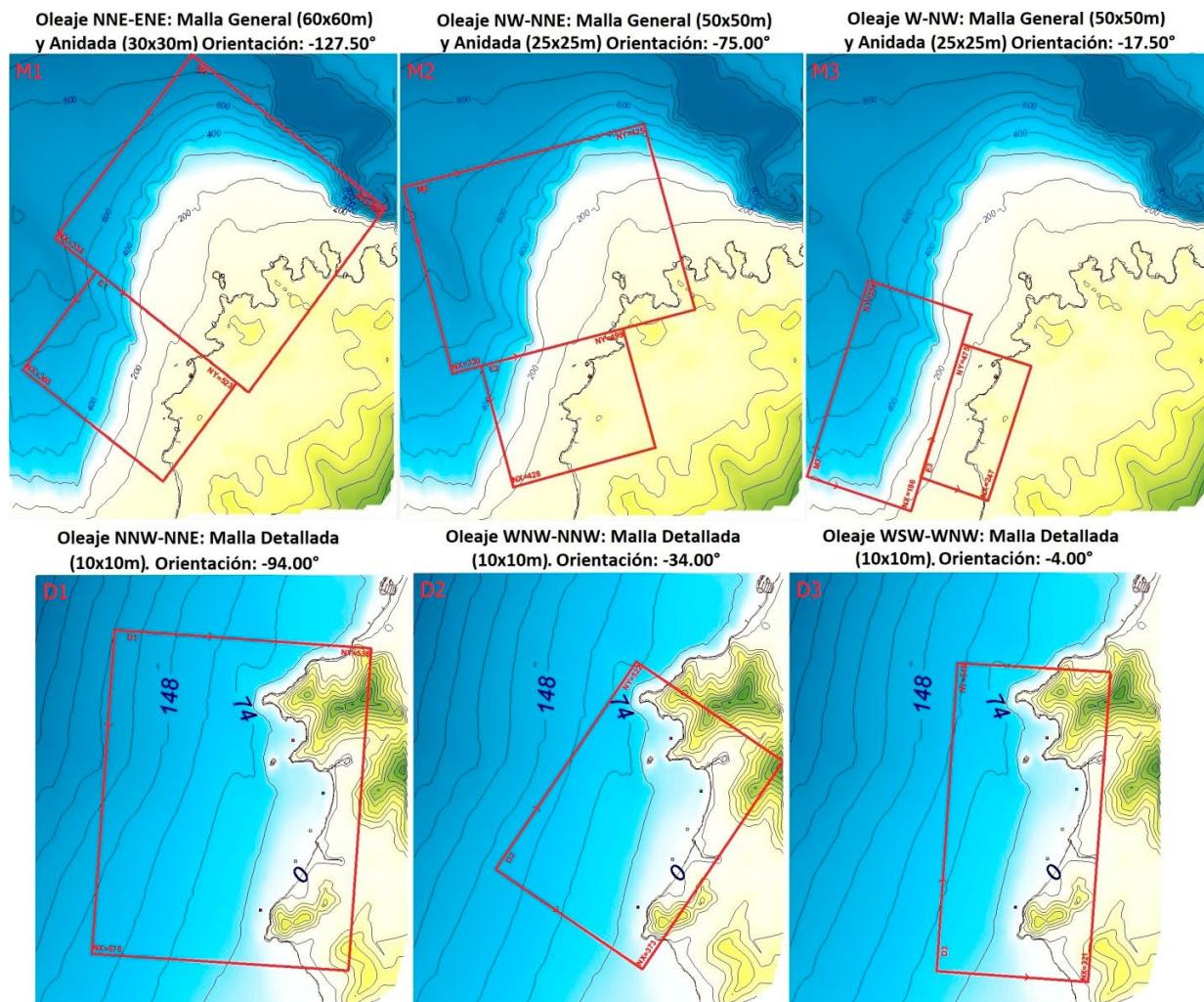


**Figura 2.** Esquema metodológico. El índice 'i' es un contador de alternativas de solución.

La modelación computacional brinda herramientas basadas en formulaciones empíricas y derivadas que apoyan el diseño en ingeniería costera y portuaria al reproducir procesos hidrodinámicos y morfodinámicos. Para este estudio se utilizó el Sistema de Modelado Costero (SMC), desarrollado en España (GIOC y DGCM, 2002), compuesto por varios módulos y modelos, entre ellos: 1) OLUCA-SP, modelo espectral no dispersivo frecuencialmente, que simula la propagación del oleaje desde aguas profundas hasta la costa, incluyendo refracción, difracción e interacción oleaje-corriente bajo una aproximación parabólica para los componentes de energía (O'Reilly y Guza, 1991); (Kirby, 1986). 2) COPLA-SP, modelo bidimensional que calcula corrientes de rotura, resolviendo ecuaciones de

flujo basadas en Navier-Stokes, promediando la velocidad vertical por cada celda del enmallado. Ambos modelos operan de forma acoplada, usando los datos de salida de OLUCA-SP como entrada para COPLA-SP.

Además del MDE, se definieron mallas de cálculo para simular la propagación del oleaje sobre el dominio topobatimétrico y caracterizar la dinámica marina (oleaje y corrientes). Se utilizó un espectro TMA (Bouws et al., 1985) derivado del JONSWAP, modificado para aguas someras, con disipación por rotura, según Winyu y Tomoya (1998). El modelo incluía ajustes por recomendación para simular corrientes, como rugosidad de fondo (coeficiente de Chézy) y viscosidad de remolino en zonas de rompientes.



**Figura 3.** Mallas gruesas (superior) y detalladas (inferior) sobre el MDE. Extraídas de SMC-MOPLA.

La propagación del oleaje desde el punto de reanálisis hasta la bahía de Gaira se realizó mediante tres mallas gruesas (celdas de 60x60m), cada una con una malla anidada de mayor resolución (celdas de 30x30m), sobre el MDE (Fig. 3, superior), reconstruyendo la serie de oleaje en dos puntos objetivo (Lat. 11.2297°, Lon. -74.2471° y Lat. 11.2009°, Lon. 74.2523°) mediante la herramienta Hipercubo-MaxDiss (IHCantabria, 2013), basada en el método de downscaling y el algoritmo de máxima disimilitud (Camus, *et al.*, 2011a); (Camus *et al.*, 2011b).

Posteriormente, se generaron tres mallas adicionales (D1, D2 y D3) con resolución de celdas de 10x10m (Fig. 3, inferior), alineadas en su borde externo con los puntos objetivo reconstruidos, lo que permitió optimizar el gasto computacional y mejorar el detalle de los

resultados hidrodinámicos y morfodinámicos en la costa.

Con estas mallas se propagaron 16 casos de oleaje espectral representativos, de acuerdo con la reconstrucción de clima marítimo efectuado (Tabla 2) con el propósito de producir mapas de isoaltura de ola significante y vectores de corrientes. De acuerdo con la caracterización del oleaje en los puntos objetivo que bordean la bahía de Gaira, los oleajes noreste (NNE) y norte (N) reunieron 18.68 y 78.07 % de las ocurrencias, respectivamente, por ello se dedican 8 de los 16 casos a su estudio; mientras que las direccionalidades noroeste (NW) y oeste (W), aunque son de baja frecuencia (1.5 y 0.5 %, respectivamente), presentan oleajes extremos significativos, que además inciden más directamente sobre las playas al recibir menor transformación.

**Tabla 2.** Casos de propagación de oleaje a la costa.

Casos de oleaje espectral								
	Dirección	# Caso	Hs (m)	Tp (s)	Fr (Hz)	Gamma ( $\gamma$ )	Sigma ( $\sigma$ )	Carrera de marea (m)
Malla D1	NNE	<b>Caso 01</b>	1.01 *	10.0	0.100	3.3	20.0	0.31
		<b>Caso 02</b>	2.00 **	11.0	0.091	10.0	10.0	0.31
		<b>Caso 03</b>	3.01 ***	12.0	0.083	10.0	10.0	0.00
		<b>Caso 04</b>	3.01 ***	12.0	0.083	10.0	10.0	0.63
Malla D2	NW	<b>Caso 05</b>	0.89 *	10.0	0.100	3.3	20.0	0.31
		<b>Caso 06</b>	1.85 **	10.0	0.100	10.0	10.0	0.31
		<b>Caso 07</b>	3.10 ***	12.0	0.083	10.0	10.0	0.00
		<b>Caso 08</b>	3.10 ***	12.0	0.083	10.0	10.0	0.63
Malla D3	W	<b>Caso 09</b>	1.46 *	10.0	0.100	3.3	20.0	0.31
		<b>Caso 10</b>	2.52 **	11.0	0.091	10.0	10.0	0.31
		<b>Caso 11</b>	3.19 ***	12.0	0.083	10.0	10.0	0.00
		<b>Caso 12</b>	3.19 ***	12.0	0.083	10.0	10.0	0.63
		<b>Caso 13</b>	1.03 *	10.0	0.100	3.3	20.0	0.31
		<b>Caso 14</b>	1.93 **	10.5	0.095	10.0	10.0	0.31
		<b>Caso 15</b>	3.19 ***	12.0	0.083	10.0	10.0	0.00
		<b>Caso 16</b>	3.19 ***	12.0	0.083	10.0	10.0	0.63

\* Corresponde a oleajes de régimen medio (Hs50 %)

\*\* Corresponde a oleajes extremos anuales (Hs12)

\*\*\* Corresponde a oleajes extremos (TR=100 años, Función Peak Over Threshold)

**Nota:** los niveles de marea corresponden a valor mínimo, medio y máximo del análisis de la distribución de datos del componente astronómico de marea efectuado. Gamma y Sigma ( $\gamma$ ,  $\sigma$ ) corresponden a dispersión frecuencial y direccional, respectivamente.

Para establecer un correcto análisis de largo plazo en materia de dinámica litoral se aplicó la técnica de *downscaling*, para obtener resultados de clima marítimo en materia de oleaje y corrientes en proximidad al borde costero, de tal manera que estos pudieran servir de insumo para la realización de los cálculos morfodinámicos. Dicho análisis partió de las aproximaciones de perfil y planta de equilibrio en medio y largo plazo, utilizando el módulo Análisis a Largo Plazo de Playas de SMC, sectorizando la playa en cuatro zonas, cada una con un perfil representativo. Al final se obtuvieron resultados de transporte litoral longitudinal neto, representativos de las condiciones medias de 39 años de oleaje, según los datos.

Cada perfil se parametrizó según el ajuste a la fórmula de Dean (1977), ecuación 1, que establece la relación entre la profundidad ( $h$ ) y la posición respecto a la línea de costa ( $x$ ), mediante un parámetro de forma ( $A$ ) que es función de la granulometría ( $w$ : velocidad de caída de grano) y solo válida hasta la profundidad de cierre; y un coeficiente adimensional  $k$ , el cual se calibra de acuerdo al sitio. La velocidad de caída de grano fue calculada de acuerdo con la formulación de Hallermeier (1978), ecuación 2, tomando como información de entrada el oleaje extremo anual,  $H_{s12}$  (oleaje igualado o excedido 12 horas al año), periodo pico asociado en cercanías de la costa ( $T_s$ ), y la aceleración debido a la gravedad ( $g$ ). El análisis de planta de equilibrio permitió a su vez obtener las orientaciones de cada sector de playa y flujo medio de energía, datos que también alimentaron el modelo morfodinámico.

$$h = Ax^{\frac{2}{3}}; \quad A = k\omega^{0.44} \quad [1]$$

$$h^* = 2.28H_{s12} - 68.5 \left( \frac{H_{s12}^2}{gT_{s2}^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad [2]$$

**Tabla 3.** Fuentes de información y datos de hidrosedimentología del río Gaira.

Fuente	Área de cuenca	Precipitación media anual (mm)	Caudal promedio (m <sup>3</sup> /s)	Caudal sólido (x10 <sup>4</sup> t/año)	Rendimiento (t/km <sup>2</sup> ·año)	Periodo
Restrepo y Kjerfve (2004)	30 km <sup>2</sup>	850	2.56	0.14	42	1978-1993
Estación Ideam - Gaira [15017010]	-	-	0.65	-	-	1980

Para obtener tasas de transporte longitudinal de sedimentos se implementó el método de flujo de energía (CERC, 1984), ecuación 3, conociendo la altura de ola en rotura ( $H_b$ ), ángulo de oleaje en rotura ( $\theta_b$ ), densidades de agua y sedimento ( $\rho_w, \rho_s$ , respectivamente), aceleración debido a la gravedad ( $g$ ), porosidad ( $p$ ), índice de rotura ( $\lambda_b$ ) y un coeficiente empírico de proporcionalidad ( $K$ ). Para el cálculo de las características del oleaje en rotura se utilizó el código programado por Gabriel Díaz, modificado por Soledad Requejo Landeria (2011) del Instituto de Hidráulica de Cantabria.

$$Q = \frac{k\rho_w g^{\frac{1}{2}}}{16(\rho_s - \rho_w)(1-p)\sqrt{\lambda_b}} H_b^{\frac{5}{2}} \sin\left(2\theta_b\right)^{\frac{1}{2}} \quad [3]$$

Se realizó adicionalmente análisis de corto plazo con el *Modelo de Evolución del Perfil Transversal de Playa* (GIOC, 2001), módulo contenido dentro de SMC. Se diseñó para cada perfil de equilibrio analizado un caso de tormenta representativo, de acuerdo con la reconstrucción del clima marítimo e información derivada del registro de nivel del mar, obteniendo un estimado del transporte transversal al litoral, el cual representó las pérdidas por erosión en corto plazo debido a eventos singulares, tales como tormentas o huracanes. El modelo de propagación empleado por la herramienta fue el recomendado por la misma Thornton y Guza (1983), mientras que, para la estimación de la corriente transversal de fondo, o *undertow*, se utilizó De Vriend y Stive (1987).

En cuanto al aporte sólido proveniente del río Gaira al sistema se utilizó el valor promedio reportado por Restrepo y Kjerfve (2004) de 0.14 x10<sup>4</sup> t/año (Tabla 3). Asumiendo una densidad de arena de 1500 kg/m<sup>3</sup> se deduce un transporte sólido volumétrico anual de 933 m<sup>3</sup>/año.

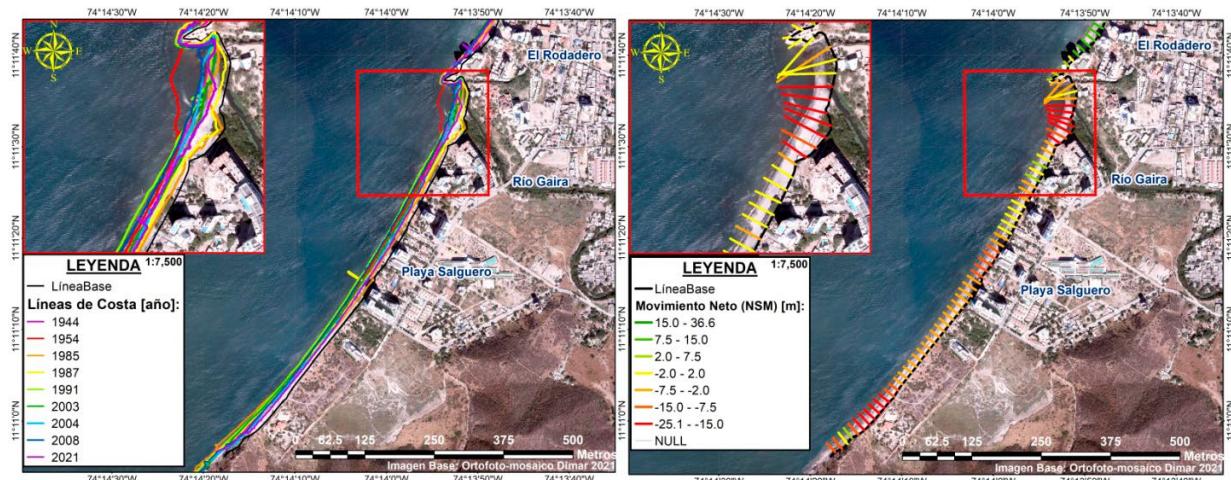
Finalmente, para el diseño de alternativas de solución se analizó toda la información previamente mencionada y se elaboraron en SMC. Se aplicaron los conceptos de playa en equilibrio estático y forma en planta parabólica de Hsu y Evans (1989) para bahías naturales y artificiales, y su uso extendido para playas con forma de tóbolo (González y Raúl, 2001), estos ya implementados dentro del software. Las alternativas fueron comprobadas con estados de mar representativos, obtenidos mediante el análisis de propagación de oleaje hacia la zona de estudio. Posteriormente, fueron justificadas y contrastadas de acuerdo con unos criterios funcionales y de diseño mediante técnica de juicio de expertos dentro del CIOH-Smizc.

## RESULTADOS

Partiendo del análisis multitemporal de línea de costa efectuado (Fig. 4) entre los años 1944 y 2021 se encontró que el movimiento neto de

línea de costa fue positivo (acreción), con valor promedio de 3.05 m en todo el litoral de la bahía de Gaira, en general, pero negativo (erosión), con valor promedio de -7.43 m al sur del río Gaira (Playa Salguero).

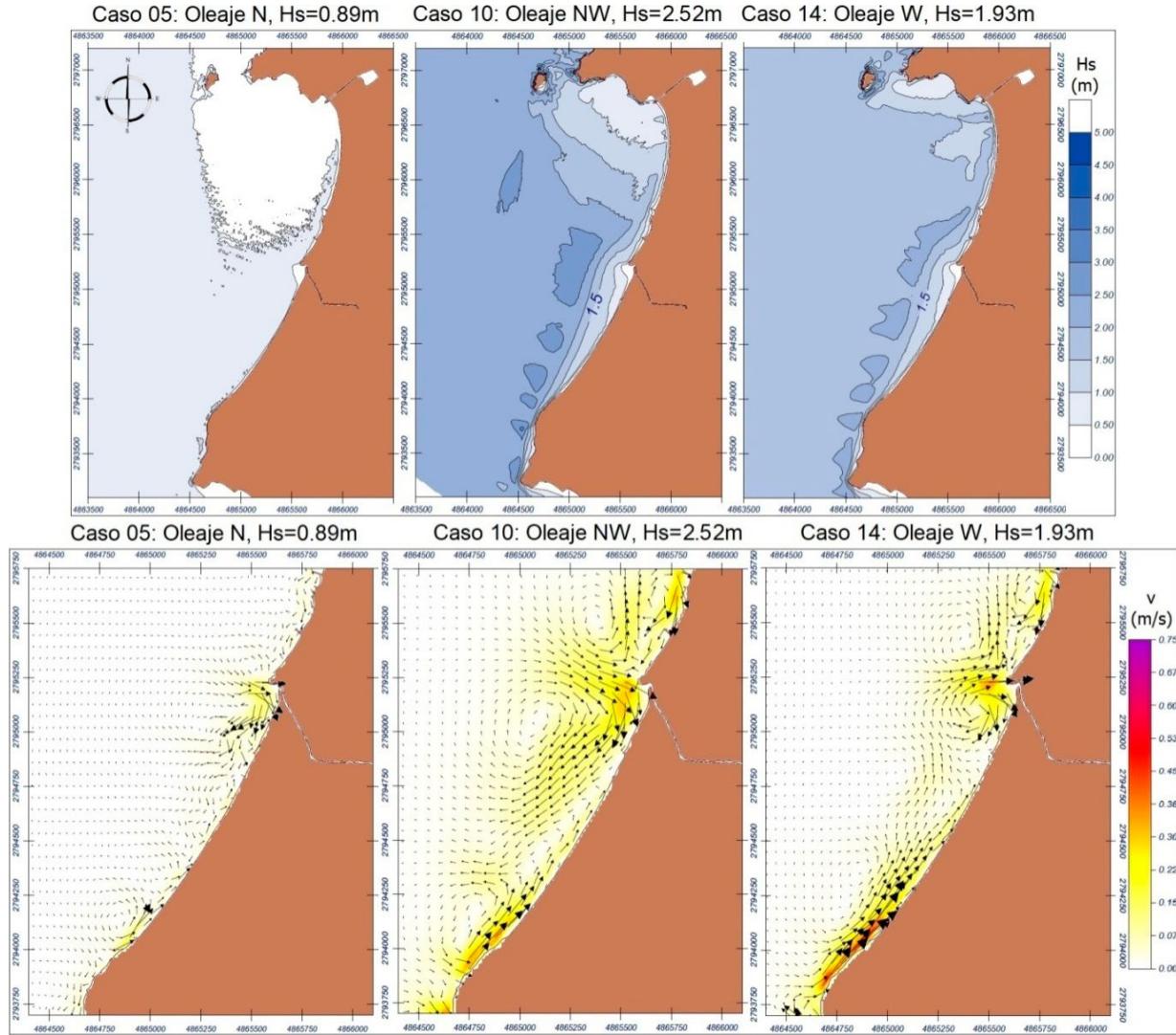
Se demostró, mediante las imágenes de referencia más antiguas (1944 y 1954) y en relación con la situación actual, que no hay mucha diferencia en posición de línea de costa en general. Se determinó que entre los años 2008 y 2021 hubo retroceso de línea de costa en el 98.48 % de los transectos analizados en Playa Salguero, con retroceso máximo de 29.13 m (-2.24 m/año) en la desembocadura del río, zona que presenta mayor variación históricamente. En el mismo periodo de tiempo se destacó que el movimiento neto de línea de costa promedio en Playa Salguero fue de -15.16 m (tasa promedio de -1.17 m/año), indicando el estado actual de erosión que se presenta de acuerdo con el historial de líneas de costa analizadas.



**Figura 4.** Superposición (superior) y movimiento neto (inferior) de líneas de costa.

Se obtuvieron mapas de isoaltura de ola significante y de vectores de corrientes asociados para cada caso de oleajepectral presentado en la Tabla 2. En régimen medio y extremo los oleajes provenientes del noreste y norte (casos 01-08) presentan una dinámica marina baja, con altura de oleaje significante y corrientes de rotura inferiores a 1 m y 0.10 m/s, respectivamente, en el borde costero de la bahía de Gaira. Lo anterior cobra sentido al ser una bahía protegida naturalmente de estos oleajes,

según su dirección de procedencia, y por la geomorfología y disposición de sus costas. Estas direccionalidades son representativas de régimen medio durante cualquier año, reuniendo el 96.75 % de las ocurrencias del oleaje, aproximadamente. También se analizó la hidrodinámica costera del porcentaje de ocurrencias restante, correspondiente a los oleajes provenientes del noroeste y oeste. La Fig. 5 presenta mapas representativos y ampliados para régimen medio y extremo (casos 05, 10 y 14).



**Figura 5.** Régimen medio (Caso 05), régimen extremo anual del noroeste (Caso 10) y del oeste (Caso 14), con sistemas circulatorios asociados en gráficos inferiores. Mapas generados con SMC-MOPLA.

La caracterización del clima marítimo del borde costero de Playa Salguero permitió su sectorización y parametrización, aplicando conceptos de perfil y planta de equilibrio (Tabla 4). El perfil de equilibrio 1 (PE1) se incluyó para representar la playa al norte de la desembocadura del río Gaira (Rodadero), mientras que PE2, PE3 y

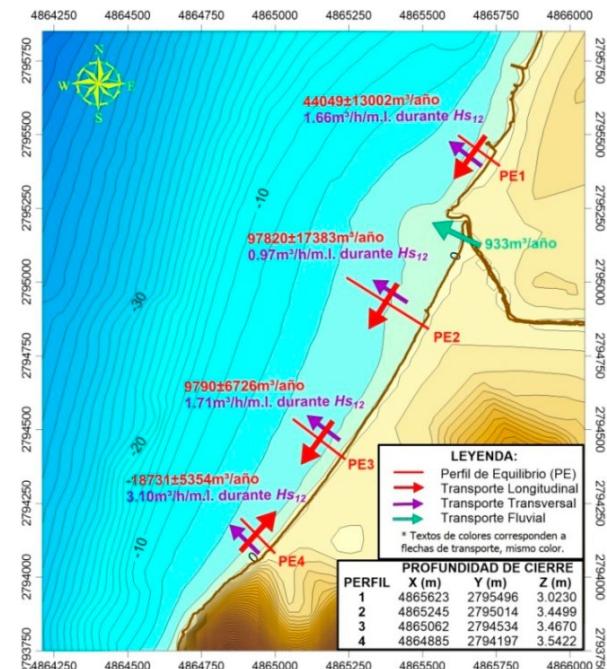
PE4 se localizaron en Playa Salguero. Se identificó y calculó la dirección de procedencia del frente de oleaje incidente a la playa, ángulo de orientación, tipo de rotura del oleaje o parámetro de Iribarren (1949), entre otros datos y parametrizaciones para cada sector.

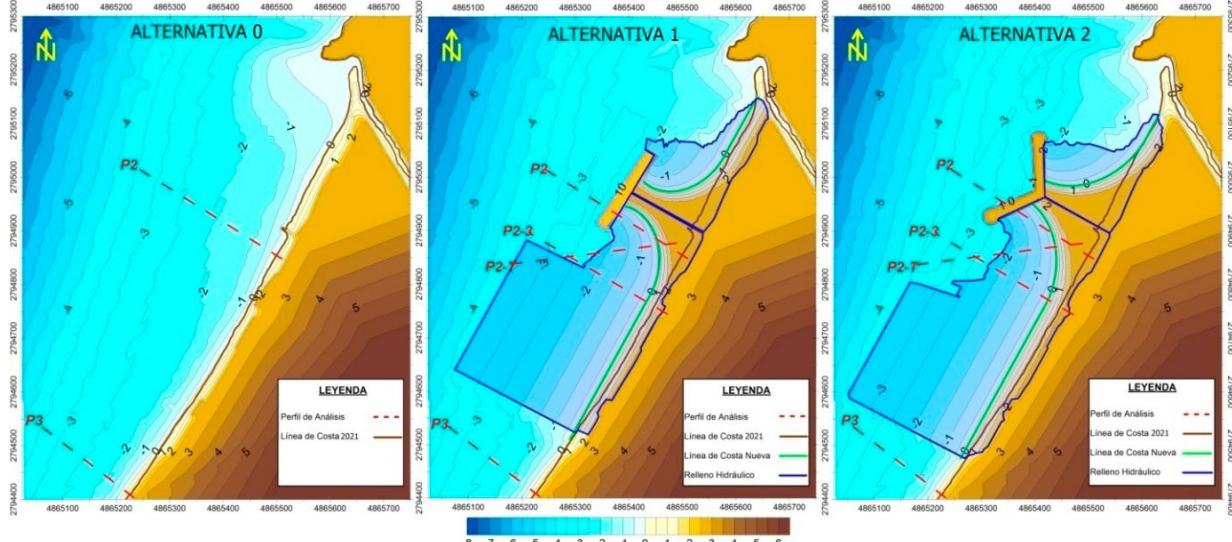
**Tabla 4.** Parametrización por sectores de acuerdo con perfil y planta de equilibrio.

	<b>PE1</b>	<b>PE2</b>	<b>PE3</b>	<b>PE4</b>
<b><math>Hs_{12}</math> [m]</b>	1.40	1.60	1.62	1.65
<b><math>Ts_{12}</math> [s]</b>	9.00	9.50	9.20	9.30
<b><math>h^*</math> (Birkemeier) [m]</b>	2.31	2.63	2.64	2.70
<b><math>h^*</math> (Hallermeier) [m]</b>	3.02	3.45	3.47	3.54
<b>Distancia LC-<math>h^*</math> [m]</b>	123.00	300.00	200.00	104.00
<b><math>m</math> [°], (<math>m</math>[%])</b>	1.41 (2.46)	0.66 (1.15)	0.99 (1.74)	1.95 (3.40)
<b><math>D_{50}</math>, (<math>D_{90}</math>) [mm]</b>	0.165 (0.369)	0.166 (0.437)	0.226 (0.449)	0.231 (0.464)
<b><math>\omega</math>[m/s]</b>	0.019	0.019	0.027	0.027
<b>A [<math>m^{1/3}</math>]</b>	-	0.077	0.101	0.144
<b>k</b>	-	0.440	0.500	0.700
<b>Frente de oleaje</b>	N52W	N61W	N56W	N48W
<b>θ de playa [°]</b>	218	209	214	222
<b><math>I_{rb}</math> [%](tipo rotura)</b>	95 ( <i>plunging</i> )	99 ( <i>spilling</i> )	91 ( <i>spilling</i> )	55 ( <i>plunging</i> )

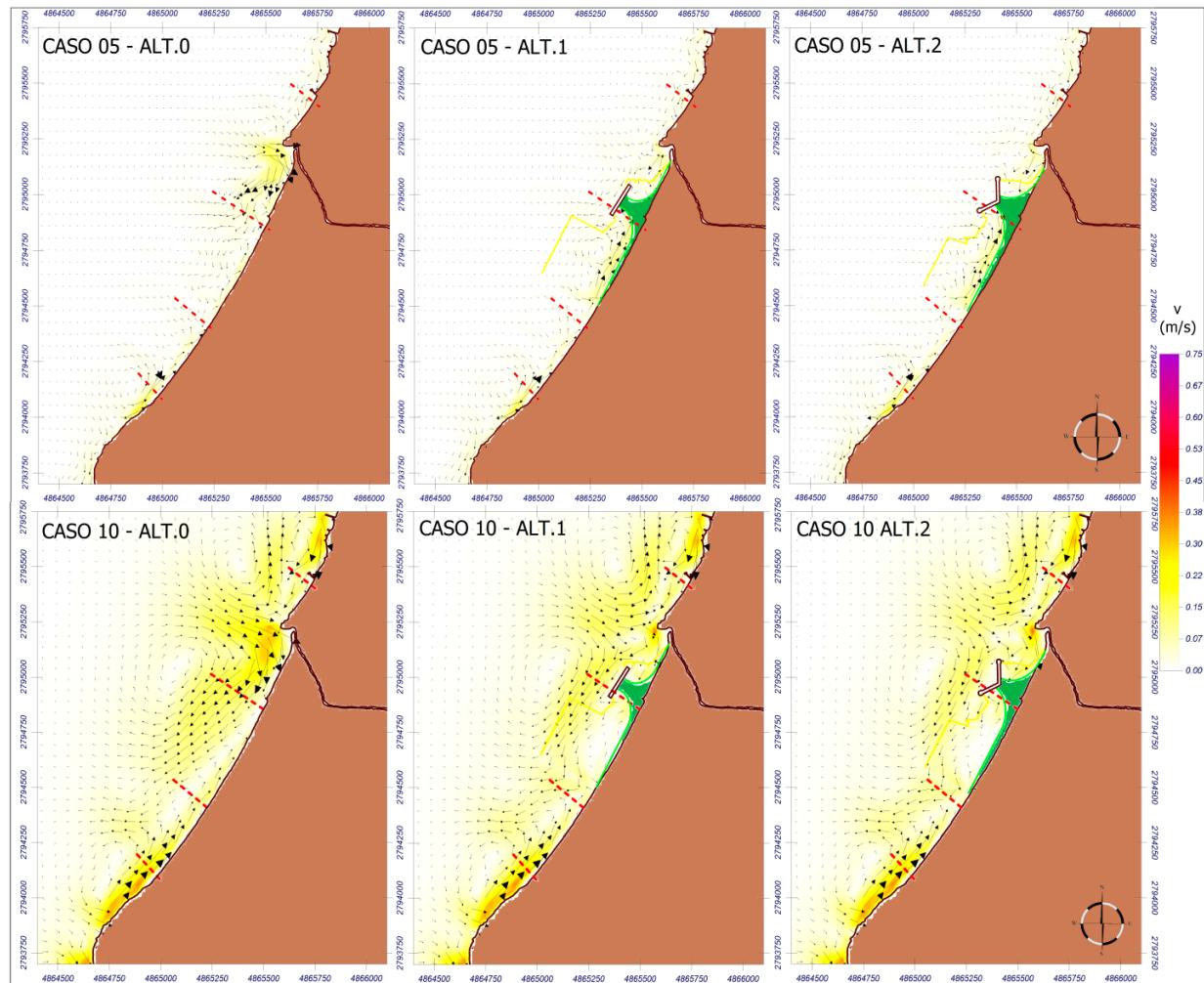
Se presenta en la Fig. 6 la sectorización de la zona de estudio, donde se apreciar la ubicación en planta de cada perfil de equilibrio (líneas rojas perpendiculares a la costa). Adicionalmente, se observa en la misma el modelo morfodinámico de funcionamiento de Playa Salguero, el cual asocia valores de órdenes de magnitud relacionados al transporte de sedimentos longitudinal con flechas rojas (deriva litoral), transversal con flechas moradas (pérdidas debido a episodios de tormenta) y aporte fluvial (flecha verde), culminando así la línea base del estudio. De todos los perfiles de equilibrio analizados llama la atención la alta tasa registrada de transporte longitudinal sobre PE2 (97820 m<sup>3</sup>/año), resultando ser el sitio con mayor grado de erosión. En dirección transversal a la costa es notorio el transporte reportado por PE4 y PE3 (3.10 y 1.71 m<sup>3</sup>/h/metro lineal de playa, respectivamente).

Se plantearon dos alternativas de solución (1 y 2) de dique exento tipo rompeolas, con relleno de playa en forma de tómbolo (164 818 m<sup>3</sup> y 210 363 m<sup>3</sup> de arena, respectivamente), conformado por sedimento similar al nativo ( $D_{50}$ , color y calidad ambiental). La alternativa 0 (no intervención) es la situación de control para establecer el análisis comparativo con respecto las propuestas (Fig. 7).

**Figura 6.** Sectorización y modelo morfodinámico de funcionamiento de Playa Salguero.



**Figura 7.** Alternativas de solución propuestas.



**Figura 8.** Comprobación hidrodinámica de alternativas de solución respecto a casos los 05 y 10.

Las alternativas de solución son comprobadas hidrodinámicamente de acuerdo con los casos de la Tabla 2. Se presentaron los resultados de vectores de corrientes correspondientes al caso 05, que bien representó el régimen medio de los datos, y el caso 10, el cual representó un evento extremo de periodicidad anual considerable (Fig. 8). Ambos casos coincidieron con la presencia de una corriente longitudinal que bordea la costa de norte a sur entre el río Gaira y el perfil de equilibrio 2 para la situación de control. En el caso extremo se observa como esta corriente adquiere coloración naranja, representativa de magnitudes entre 0.30 - 0.38 m/s, mientras que para el caso de régimen medio este valor se encuentra en torno a 0.07 0.15 m/s.

Las alternativas de solución (1 y 2) buscaron obstaculizar este flujo, imponiendo la estructura de tóbolo sobre su trayectoria, por consiguiente, reduciendo su intensidad y recorrido. Se observa que esto fue logrado, y en el caso del régimen medio incluso se observa una corriente que bordea la costa de sur a norte hacia el perfil de equilibrio 2 (sector del tóbolo) y tiene la capacidad de retornar sedimento al sitio en erosión.

## DISCUSIÓN

El análisis multitemporal de línea de costa evidenció tasas de retroceso que confirman la erosión en Playa Salguero, en contraste con la estabilidad observada en el sector norte (balneario El Rodadero). La escasa variación del litoral entre 1944 y la actualidad sugiere un equilibrio dinámico en las playas, con retrocesos no severos.

El estudio se basó en fotografías aéreas históricas del IGAC y ortofoto-mosaicos de la Dimar (Tabla 1), que además permitieron identificar el avance urbanístico hacia el litoral. Los sobrevuelos R-211 (1944) y M-15 (1954) mostraron ausencia de urbanización (el poblado de Gaira, situado a 800 m) y presencia de dunas y su vegetación asociada (INVEMAR, 2021), mientras que desde los vuelos C-2228 (1985), C-2289 (1987) y C-2451 (1991) se observaron edificaciones a 10 y 30 metros de la costa, y un espolón en Playa Salguero. El vuelo C-2721 (2004) reveló cuatro estructuras ortogonales al norte de la boca del río Gaira, y en la ortofoto de la Dimar (2021) se identificó un gran complejo habitacional justo al sur de la misma desembocadura, y un nuevo

espolón un poco más al sur. Estas evidencias oficiales reflejan un impacto por estrangulamiento costero y construcción sobre dunas, producto de la acelerada urbanización.

La selección de casos de oleaje espectral (Tabla 2) se fundamentó en el análisis estadístico de 116881 estados de mar direccionales entre 1979 y 2018, reducidos mediante *downscaling* a 224 estados representativos (0.2 %), optimizando tiempos y recursos computacionales.

Aunque los oleajes del noroeste y oeste representan solo el 3 % de ocurrencia anual, son críticos en diseño por su alta energía y escasa transformación en aguas someras. La circulación litoral en régimen medio y extremo mostró flujo predominante de norte a sur, especialmente cerca de la desembocadura del río Gaira, que se modifica por una contracorriente de sur a norte desde Punta Gloria, la cual cizalla con la predominante, redirigiendo el flujo en sentido offshore durante eventos extremos como tormentas tropicales y huracanes, retornando sedimento.

El perfil de equilibrio PE2 registró un transporte litoral longitudinal elevado (97820 m<sup>3</sup>/año), explicando la erosión en ese sector y siendo el más largo a su vez (300 m hasta la profundidad de cierre). Se diseñaron dos alternativas para mitigar la tendencia circulatoria norte-sur: la primera consiste de un dique exento recto y paralelo a la costa, mientras que la segunda se conforma de una estructura similar, con forma de V, para restringir aún más las corrientes longitudinales. Ambas cuentan con un relleno hidráulico de playa en forma de tóbolo con sedimento compatible. La selección se realizó mediante una tabla de criterios (Tabla 5), elaborada a través de la técnica de juicio de expertos dentro de CIOH-Smizc, cuantificando la viabilidad de cada opción.

Con relación al requerimiento de adaptación al cambio climático se tomó como referencia la diferencia de valores esperados de ascenso del nivel del mar para las décadas 2020-2040 (percentil de 5 %) en la estación más cercana que cuenta con datos (Cartagena, PSMSL ID 572), vía la Trayectoria Representativa de Concentración 8.5 o SSP5-8.5 (IPCC, 2014), equivalente a 0.116 m (Fox-Kemper *et al.*, 2021); (Kopp *et al.*, 2023); (Garner *et al.*, 2021). La anterior referencia se incluyó para que el diseño final de solución

contemple y asimile la magnitud del ascenso relativo del nivel del mar en la zona para el medio plazo.

Otros valores tenidos en cuenta para el nivel de referencia vertical fueron obtenidos directamente de datos de la presente investigación: oleaje extremal anual  $Hs_{12}$  (1.605 m), rango de marea astronómica (0.629 m), y marea meteorológica por encima de nivel medio del mar (0.286 m).

La sumatoria de las cuatro anteriores referencias verticales concedió una cota de 2.636 m sobre el cero del modelo (MLWS), que idealmente debía ser superada por el diseño de la playa dentro de la alternativa de solución. Las alternativas 1 y 2 fueron viables de acuerdo con el análisis de criterios efectuado, y de acuerdo con el presupuesto disponible en el momento se pudiera consolidar una u otra, teniendo en cuenta el aspecto de cantidades de obra.

**Tabla 5.** Criterios de diseño y evaluación de alternativas.

<b>Criterios de diseño</b>	<b>Descripción</b>	<b>Alternativa</b>		
		<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>
Generación de playa emergida/sumergida [0.30]	Avance de línea de costa del orden de 25 m respecto a la situación actual, reconstituyendo y reperfilando la playa tanto emergida como sumergida. Si se cumple se otorga 1.00, de lo contrario 0.00.	0.00	1.00	1.00
Reducción de pérdida neta de sedimento [0.30]	Disminución de corrientes longitudinales que atraviesan sector crítico de playa en erosión (PE2). A la alternativa que cumpla y presente mejor desempeño se otorga 1.00, y 0.90 a la siguiente, de lo contrario 0.00.	0.00	0.90	1.00
Adaptación al cambio climático (SSP5-8.5) al 2040 [0.20]	Asimilación de efectos de ascenso relativo del nivel del mar debido al cambio climático de acuerdo con el escenario SSP5-8.5 del IPCC al año 2040. En dicho sentido, las alturas de bermas de playa de las alternativas de solución se refieren al nivel vertical 2.636 m sobre el cero del modelo (M.L.W.S.), asignando valor de 0.00 a 1.00, de acuerdo con la relación de altura entre cotas.	0.57	0.76	0.76
Afectación paisajística [0.10]	Se produce afectación paisajística en las alternativas si incluyen relleno hidráulico de playa (afectación positiva, valor=+0.75) y/o colocación de estructuras rígidas como rompeolas (afectación negativa, valor=-0.25/estructura). Valor base=0.00.	0.00	0.50	0.50
Viabilidad económica [0.10]	La solución más costosa (Alternativa 2) recibe un valor de 0.00 para este criterio. La más económica (Alternativa 0) recibe un 1.00 para este criterio. La otra (Alternativa 1) se calcula por interpolación lineal.	1.00	0.50	0.00
<b>PUNTUACIÓN</b>	<b>0.3G+0.3R+0.2A+0.1P+0.1V</b>	<b>0.21</b>	<b>0.82</b>	<b>0.80</b>

## CONCLUSIONES

Si bien fueron evidentes los retrocesos de línea de costa en los últimos años, no se puede desconocer que existe una permisividad local en favor del desarrollo urbanístico inmediato al mar, que genera estrangulamiento costero. El estudio hidrodinámico y morfodinámico efectuado en la zona permitió establecer hallazgos y resultados

orientados a cuantificar la erosión costera, definiendo órdenes de magnitud y direcciones de transporte litoral.

Dos soluciones modelaron numéricamente y se compararon con un caso control, ambas con valoración positiva, de acuerdo con los criterios de diseño. El tómbolo de playa diseñado permite el avance de línea de costa desde 25 m, en

los extremos, hasta 140 m en el eje central; una obra blanda que interrumpe la corriente longitudinal responsable del mayor transporte litoral identificado. Por su parte, el dique exento o rompeolas funciona para rigidizar la saliente formada por el tóbolo al extremo de su eje central, disminuyendo la energía del oleaje incidente y transversal a la playa, procedente de las direccionalidades N, NW, WNW. Aunque la playa permanece expuesta a oleajes del oeste (W), estos son menos frecuentes y pueden manejarse con un plan de monitoreo y seguimiento, y trasvases de arena, según sea necesario.

Recomendaciones adicionales para agregar resiliencia al borde costero consisten en la conformación de una duna y siembra de vegetación nativa tanto en la playa emergida como sumergida. Las soluciones propuestas ofrecen diversificar el abanico de propuestas que existen para mitigar la erosión costera en Playa Salguero.

### **AGRADECIMIENTOS Y FUENTE FINANCIADORA**

Al Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH) por la financiación y levantamiento de información primaria para esta investigación.

### **CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES**

Conceptualización, F. A.; metodología, P. A. y F. A.; software, P. A.; validación, P. A.; análisis, P. A.; investigación, P. A.; recursos, J. D. y F. A.; curación de datos, P. A.; redacción - preparación del borrador original, P. A.; redacción - revisión y edición, F. A.; visualización, P. A. y F. A.; supervisión, J. D. y F. A.; administración del proyecto, J. D.; consecución de fondos, J. D. y F. A. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

### **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Bouws, E., Günther, H., Rosenthal, W. & Vincent, C. L. (1985). Similarity of the Wind Wave Spectrum in Finite Depth Water. *Journal of Geophysical Research*, 90, 975-986. <https://doi.org/10.1029/JC090iC01p00975>
- Caldwell, P., Merrifield, M. & Thompson, P. (2015). *Sea level measured by tide gauges from global oceans*. Obtenido de The Joint Archive for Sea Level holdings (NCEI Accession 0019568), Version 5.5, NOAA National Centers for Environmental Information, Dataset, doi:10.7289/V5V40S7W: <https://uhslc.soest.hawaii.edu/data>
- Camus, P., Méndez, F. J. & Medina, R. (2011a). A hybrid efficient method to downscale wave climate to coastal areas. *Coastal Engineering Journal*, 58(9), 851-862. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.05.007>
- Camus, P., Méndez, F. J., Medina, R. & Cofiño, A. S. (2011b). Analysis of clustering and selection algorithms for the study of multivariate wave climate. *Coastal Engineering Journal*, 58(6), 453-462. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.02.003>
- Castellanos, O., Mínguez, R., Tomás, A., Méndez, F., Losada, I., Medina, R., Camus, P., Menéndez, M. & Pérez, J. (2015). *Análisis Matemático y Estadístico de Variables Ambientales (AMEVA v.1.4.2)*. Santander, Cantabria, España.
- Coastal Engineering Research Center. (1984). *Shore Protection Manual (Vol. I)*. Washington D.C.: U.S. Government Printing Office. Dept. of the Army. Waterways Experiment Station. Corps of Engineers. CERC. Obtenido de <https://usace.contentdm.oclc.org/digital/collection/p16021coll11/id/1932>
- De Vriend, H. & Stive, M. (1987). Quasi-3D Modelling of Nearshore Currents. *Coastal Engineering*, 11, 565-601. [https://doi.org/10.1016/0378-3839\(87\)90027-5](https://doi.org/10.1016/0378-3839(87)90027-5)
- Dean, R. G. (1977). Equilibrium Beach Profiles: U.S. Atlantic and Gulf Coasts. University of Delaware, Department of Civil Engineering. Newark, Delaware: *Ocean Engineering Report No. 12*. Obtenido de <https://bpb-us-w2.wpmucdn.com/sites.udel.edu/dist/0/7241/files/2018/03/REPORT-12-1fp5sc6.pdf>
- Decreto 092 del 03 de abril. (2023). *Por medio del cual se declara la calamidad pública por erosión costera de la zona de Playa Salguero*. Santa Marta. Obtenido de [https://www.santamarta.gov.co/sites/default/files/dec\\_092\\_de\\_03\\_abr\\_2023.pdf](https://www.santamarta.gov.co/sites/default/files/dec_092_de_03_abr_2023.pdf)

- Díaz, G., y Requejo Landeira, S. (2011). *Programa para la determinación de las características del oleaje en rotura*. Santander, Cantabria, España.
- Dirección General Marítima-Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe. (2013). *Atlas Geomorfológico del Litoral Caribe Colombiano* (Vol. 8). Dimar-CIOH. Cartagena de Indias: Dimar, Serie Publicaciones Especiales CIOH.
- Fox-Kemper, B., Hewitt, H.T., Xiao, C., Aðalgeirsdóttir, G., Drijfhout, S.S., Edwards, T.L., Golledge, N.R., Hemer, M., Kopp, R.E., Krinner, G., Mix, A., Notz, D., Nowicki, S., Nurhati, I.S., Ruiz, L., Sallée, J.-B., Slanger, A.B.A. & Yu, Y. (2021). *Ocean, Cryosphere and Sea Level Change*. En IPCC, Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (págs. 1211-1362). Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.011>
- Garner, G.G., Hermans, T., Kopp, R.E., Slanger, A.B.A., Edwards, T. L., Levermann, A., Nowicki, S., Palmer, M. D., Smith, C., Fox-Kemper, B., Hewitt, H. T., Xiao, C., Aðalgeirsdóttir, G., Drijfhout, S. S., Golledge, N. R., Hemer, M., Krinner, G., Mix, A., Notz, D., Nurhati, I. S., Ruiz, L., Sallée, J.-B., Yu, Y., Hua, L., Palmer, T. & Pearson, B. (2021). *IPCC AR6 Sea Level Projections*. Version 20210809. Dataset accessed [2023-12-01]. Obtenido de <https://doi.org/10.5281/zenodo.5914709>
- GIOC. (2001). *Manual de Referencia - Petra 2.0*. Universidad de Cantabria, Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas, Santander. Obtenido de <https://smc.ihcantabria.es/SMC25/wp-content/uploads/2015/11/Manual-de-referencia-de-Petra.pdf>
- GIOC y DGCM. (2002). *Sistema de Modelado Costero, Versión 2.5*. Obtenido de SMC-IHCantabria: <https://smc.ihcantabria.es/SMC25/>
- González, M. & Raul, M. (2001). On the application of static equilibrium bay formulations to natural and man-made beaches. *Coastal Engineering Journal*, 43(3-4), 209-225. [https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(01\)00014-X](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(01)00014-X)
- Hallermeier, R. J. (1978). Uses for a calculated limit depth to beach erosion. Proceedings of the Sixteenth Coastal Engineering Conference. *American Society of Civil Engineers*, 1(16), Ch. 88, pp. 1493-1512. <https://doi.org/10.9753/icce.v16.88>
- Himmelstoss, E., Henderson, R., Kratzmann, M. & Farris, A. (2018). *Digital Shoreline Analysis System (DSAS) Version 5.0 User Guide*. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey. Open-File Report 2018-1179. <https://doi.org/10.3133/ofr20181179>
- Hsu, J. & Evans, C. (1989). Parabolic bay shapes and applications. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 87(4), 557-570. <https://doi.org/10.1680/iicep.1989.3778>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2024). *Consulta y Descarga de Datos Hidrometeorológicos*. Ideam. Obtenido de: <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>
- IHCantabria. (2013). Hipercubo MAXDISS. Versión 3.0. Santander, España.
- Instituto Colombiano de Geología y Minería / Ecopetrol ICP/Instituto de Investigaciones Marinas "José Benito Vives de Andrés". (2008). *Evolución Geohistórica de la Sierra Nevada de Santa Marta. Geomorfología de la zona costera y piedemonte occidental*. Convenio 006-05 Ingeominas - Ecopetrol ICP - Invemar. Santa Marta: Programa de Geociencias Marinas y Costera-GEO. Obtenido de <https://recordcenter.sgc.gov.co/B12/23008002524327/documento/Pdf/2105243271101000.pdf>
- Instituto de Investigaciones Marinas "José Benito Vives de Andrés" y Corporación Autónoma Regional del Magdalena. (2015). *Primer informe de actividades del convenio especial de cooperación No. 14 de 2014 celebrado entre Corpamag e Invemar, para entender diferentes tipos de emergencias ambientales*. Santa Marta.
- Instituto de Investigaciones Marinas "José Benito Vives de Andrés". (2021). *Concepto técnico*

sobre la problemática de erosión costera en playa Salguero, los daños ambientales causados por un espolón construido a la altura del edificio Playa Linda y las posibilidades de restauración ambiental de la playa. Santa Marta: CPT-GEO-003-21. Invemar. Obtenido de <https://alfresco.invemar.org.co/share/s/rILf7UBwRw--T5i5puWFzA>

IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* IPCC, [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds)], Geneva, Switzerland. Obtenido de <https://archive.ipcc.ch/report/ar5/syr/>

Kirby, J. T. (1986). Higher-Order Approximations in the Parabolic Equation Method for Water Waves. *Journal of Geophysical Research*, 91(C1), 933-952. <https://doi.org/10.1029/JC091iC01p00933>

Kopp, R.E., Garner, G.G., Hermans, T.H.J., Jha, S., Kumar, P., Reedy, A., Slanger, A. B. A., Turilli, M., Edwards, T. L., Gregory, J. M., Koubbe, G., Levermann, A., Merzky, A., Nowicki, S., Palmer, M. D. & Smith, C. (2023). The Framework for Assessing Changes To Sea-Level (FACTS) v1.0: a platform for characterizing parametric and structural uncertainty in future global, relative, and extreme sea-level change. *Geoscientific Model Development*, 16(24), 7461-7489. <https://doi.org/10.5194/gmd-16-7461-2023>

O'Reilly, W. C. & Guza, R. T. (1991). Comparison of Spectral Refraction and Refraction-Diffraction Wave Models. *Journal of Waterway Port, Coastal and Ocean Engineering*, 117(3), 199-215. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1991\)117:3\(199\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1991)117:3(199))

Pawlowicz, R., Beardsley, B. & Lentz, S. (2002). Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T\_TIDE. *Computers and Geosciences*, 28(8), 929-937. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(02\)00013-4](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(02)00013-4)

Restrepo, J. D. & Kjerfve, B. (2004). The Pacific and Caribbean Rivers of Colombia: Water Discharge, Sediment Transport and Dissolved Loads. In: Drude de Lacerda, L., Santelli, R.E., Duursma, E.K. & Abrão, J.J. (eds) *Environmental Geochemistry in Tropical and Subtropical Environments*. Environmental Science. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-07060-4\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-662-07060-4_14)

Ricaurte-Villota, C., Coca-Domínguez, O., González, M.E., Bejarano-Espinosa, M., Morales, D.F., Correa-Rojas, C., Briceño-Zuluaga, F., Legarda, G.A. & Arteaga, M.E. (2018). *Amenaza y vulnerabilidad por erosión costera en Colombia: enfoque regional para la gestión del riesgo*. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras "José Benito Vives de Andrés" - Invemar. Santa Marta, Colombia: Serie de Publicaciones Especiales de Invemar #33. Obtenido de <https://alfresco.invemar.org.co/share/s/vPDPEXpLRe07EsiOFqsq8g>

Thornton, E. B. & Guza, R. (1983). Transformation of Wave Height Distribution. *Journal of Geophysical Research*, 88(C10), 5925-5938. <https://doi.org/10.1029/JC088iC10p05925>

Winyu, R. & Tomoya, S. (1998). Energy Dissipation Model for Irregular Breaking Waves. *Coastal Eng. Journal*, 40(4), 327-346. <https://doi.org/10.1061/9780784404119.007>

WW3DG. (2019). The WAVEWATCH III® Development Group: User manual and system documentation of WAVEWATCH III® version 6.07. NOAA/NWS/NCEP/MMAB. Tech. Note 333, 326 pp. + Appendices. College Park, MD, USA. Obtenido de <https://github.com/NOAA-EMC/WW3/wiki/Manual>



ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

**Impacto de estructuras hidráulicas (tajamares) en la dinámica costera. Caso de estudio: desembocadura del río Magdalena, Colombia**

*Impact of fluvial hydraulic structures (jetties) on coastal dynamics. Case of study: mouth of Magdalena River, Colombia*

DOI: <https://doi.org/10.26640/22159045.2025.652>

Fecha de recepción: 2024-10-30 / Fecha de evaluación: 2025-08-29 / Fecha de aceptación: 2025-10-08

Ricardo José Molares Babra<sup>1</sup>

**Molares Babra, R. J. (2025).** Impacto de estructuras hidráulicas (tajamares) en la dinámica costera.

Caso de estudio: desembocadura del río Magdalena, Colombia. *Boletín Científico CIOH*, 44(2), 43-60. <https://doi.org/10.26640/22159045.2025.652>.

**RESUMEN**

Este estudio analiza los procesos de erosión costera en el delta del río Magdalena, tomando como base el análisis de imágenes satelitales y fotografías aéreas de los últimos 30 años. Se evidencia que la construcción de los espolones de Bocas de Ceniza en 1935 ha sido un factor clave en los procesos de erosión al oeste del río. A partir de imágenes satelitales y cartas náuticas de la época se documentan la evolución y los cambios en la costa del delta del río Magdalena, así como en sus principales formas costeras (ciénaga de Mallorquín, flecha de isla Verde y flecha de Puerto Velero). Los resultados muestran que entre 1935 y 2022, al este de los tajamares, la acreción ha sido limitada (+387 ha) debido a la extensión de las estructuras costeras, mientras que la erosión ha afectado una zona más al este (+1600 ha). Al oeste de los tajamares la erosión ha sido aún más marcada (-3336 ha), provocando un retroceso de la línea de costa a lo largo de 24.6 km desde la desembocadura del río y causando la desaparición de isla Verde. Este cambio en la morfología de la costa y del fondo marino permitió la sedimentación y formación de la flecha de Puerto Velero (+374 ha), que continúa en crecimiento, aunque se observa erosión (-163 ha) a sotavento de esta. La aplicación de la ecuación parabólica de Hsu indica que la línea de costa de la barra de Mallorquín ha alcanzado un estado de equilibrio estático, sugiriendo un transporte neto de sedimentos prácticamente nulo y una disminución en el suministro de sedimentos hacia el oeste. Esto podría incrementar la vulnerabilidad de la flecha de Puerto Velero a la erosión, ya que su crecimiento aún depende de los sedimentos provenientes del noreste. Así, la estabilidad de la barra de Mallorquín podría afectar la futura evolución de esta flecha costera. El análisis histórico también confirma la presencia de densos ecosistemas de manglar en el área antes de las obras de encauzamiento en la desembocadura del río Magdalena. Sin embargo, esta protección natural no fue suficiente para evitar la pérdida de 2566 ha, lo que sugiere que los manglares dejan de proporcionar una defensa efectiva contra la erosión costera cuando su capacidad de retención de sedimentos disminuye debido a la interrupción de su suministro. En contraste, la formación y crecimiento de la flecha de Puerto Velero no se vieron obstaculizados por la ausencia de estos ecosistemas, alcanzando un área de 374 ha con un avance de aproximadamente 141 m/año. En conclusión, los manglares representan una solución basada en la naturaleza para la protección costera que solo será efectiva si se restituye el suministro de sedimentos.

**PALABRAS CLAVES:** erosión costera, transporte de sedimentos, mangle, sedimentación deltaica.

<sup>1</sup> Orcid: 0000-0003-3384-1618. Universidad de la Costa. Programa de Doctorado en Desarrollo Sostenible. Correo electrónico: ricardomolares@yahoo.com



Publicado por la Dimar

## ABSTRACT

*This study analyses coastal erosion processes in Magdalena River delta, based on the analysis of satellite images and aerial photographs from the last 30 years. Evidence suggests that the Bocas de Ceniza jetties construction in 1935 has been a key factor in the coastal erosion processes to the west of the river. Using satellite images and nautical charts, the evolution and changes in the coast of the Magdalena River delta, as well as its main coastal landforms (Mallorquín swamp, Verde Island spit, and Puerto Velero spit), are documented. Results show that between 1935 and 2022, accretion has been limited (+387 ha) by the extension of the coastal structures, to the east of the jetties, while erosion has affected an area further east (+1600 ha). Erosion has been even more pronounced (-3336 ha) to the west of the jetties, retreating a 24.6 km of the coastline from the river mouth and the disappearance of Verde Island. This change, in the coast morphology and seabed, allowed sedimentation and formation of the Puerto Velero spit (+374 ha), which continues to grow, although erosion (-163 ha) is observed leeward. The application of Hsu's parabolic equation indicates that the Mallorquín bar coastline has reached a state of static equilibrium, suggesting nearly zero net sediment transport and a sediment supply decrease to the west. This could increase the vulnerability of the Puerto Velero spit to erosion, since its growth still depends on sediment from the northeast. Thus, the Mallorquín bar stability could affect the future evolution of this coastal spit. Historical analysis also confirms the presence of dense mangrove ecosystems in the area before the channelling works at the Magdalena River mouth. However, this natural protection was insufficient to prevent the loss of 2,566 ha, suggesting that mangroves cease to provide effective coastal protection when their sediment retention capacity decreases due to interrupted sediment supply. In contrast, the formation and growth of the Puerto Velero spit were not hindered by the absence of these ecosystems, reaching an area of 374 ha with a growth rate of approximately 141 m/year. In conclusion, mangroves represent a nature-based solution for coastal protection that will only be effective if the sediment supply is restored.*

**KEYWORDS:** Coastal erosion, sediment transport, mangroves, deltaic sedimentation.

## INTRODUCCIÓN

El análisis global de las líneas de costa, basado en imágenes satelitales entre 1984 y 2016, revela que el 24 % de las playas arenosas está sufriendo erosión a tasas superiores a 0,. m/año, mientras que el 28 % muestran acreción y el 48 % permanecen estables (Luijendijk *et al.*, 2018). A este fenómeno se suman las crecientes demandas del comercio mundial y del transporte multimodal, que han impulsado la construcción de tajamares en las desembocaduras de ríos para reducir la sedimentación en los canales de acceso marítimo. Estas estructuras, si bien logran mantener la navegabilidad, generan asimetrías en el balance sedimentario: provocan acumulación de sedimentos en la zona de barlovento y déficit en sotavento, ya que los sedimentos fluviales son arrastrados hacia aguas profundas (Komar, 1996).

Este problema es global y ha sido documentado en diversas desembocaduras y deltas tales como:

río Sheyang, China (Wang *et al.*, 2022); ensenadas en St. Lucie, Ocean City y las líneas costeras de Long Island, Nueva Jersey, Delmarva y Carolina del Sur en Estados Unidos han sido afectadas por tajamares (Galgano, 2009); estuario de Shiribetsu (Japón), estuario de Guadiana (España), estuario de Duero (Portugal), estuario de Patos (Brasil) (Franzen *et al.*, 2023); río Tweed (Australia) y río Nerang (India) (Boswood y Murray, 2001).

El cambio climático, en particular el aumento del nivel del mar, complica aún más la dinámica costera. Aunque la magnitud de este aumento es incierta, el último informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) proyecta que el nivel del mar podría elevarse entre 0.28 y 1.01 metros para el año 2100, dependiendo de los escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero (Calvin *et al.*, 2023). Este incremento afectará las costas no protegidas, acelerando su retroceso.

Sin embargo, las fuerzas que impulsan la erosión costera son complejas y específicas de cada región. Además, del aumento eustático del nivel del mar, factores locales como el hundimiento del terreno, la compactación y las interferencias humanas, como la construcción de represas, influyen en la disponibilidad de sedimentos. Estos factores, combinados con las corrientes de deriva litoral y la intervención humana mediante estructuras como espolones y tajamares, interrumpen los flujos sedimentarios y exacerbán los problemas de erosión.

En Colombia, la erosión costera afecta la región del Caribe. Un diagnóstico nacional reciente indica que 522 km de la costa Caribe, aproximadamente un tercio de su longitud, están impactados por la erosión (Posada Posada & Henao Pineda, 2008). En el departamento del Atlántico, el 55 % del litoral presenta niveles de amenaza alta y media, con sectores particularmente vulnerables como Astilleros y Bocatocino (Ricaurte-Villota *et al.*, 2018).

La construcción de los tajamares en Bocas de Ceniza, en la desembocadura del río Magdalena (Colombia), ha sido identificada como una de las principales causas del retroceso de la costa en la región, desde 1936. Este retroceso ha provocado la desaparición de isla Verde, la erosión de las playas de Puerto Colombia y de la barra de la ciénaga de Mallorquín, así como la formación de la flecha de Puerto Velero, alterando la morfología costera (Alvarado, 2005; Correa *et al.*, 2005; Koopmans, 1971; Martínez *et al.*, 1990; Molina *et al.*, 2001; Nuñez, 2004; Orejarena *et al.*, 2015; Rivillas-Ospina *et al.*, 2017; Restrepo y López, 2008, Andrade, 2023; Villate *et al.*, 2020) en el que variaciones interanuales de la descarga tienen una gran influencia (Ávila y Gallo, 2021; Higgins *et al.*, 2016; Restrepo *et al.*, 2017). Estos estudios, aunque en muchos casos cuantifican el retroceso de la línea de costa, lo hacen en sectores específicos de la costa y no calculan las áreas erosionadas (o sedimentadas), de tal forma que no es evidente el impacto en el delta del Magdalena; en muchos casos no consideran líneas de costa inmediatamente anteriores a la fecha de construcción de los tajamares de Bocas de Ceniza.

Aunque estas obras cumplieron con su objetivo original de evitar la sedimentación en el puerto de Barranquilla, su impacto en el

equilibrio sedimentario ha sido significativo, desprotegiendo zonas costeras y fomentando procesos erosivos (Andrade, 2023). En respuesta, se han implementado medidas de protección costera como espolones y rompeolas. Sin embargo, estas estructuras, aunque mitiguen el retroceso en ciertos sectores, no son sostenibles a largo plazo, especialmente frente al aumento del nivel del mar.

Las políticas ambientales nacionales y locales reconocen el problema de la erosión, pero las estrategias de mitigación se centran en la reducción de emisiones de GEI y en la protección de ecosistemas. Estas medidas, aunque importantes, son insuficientes y no abordan las causas profundas, como la interrupción del transporte litoral, que es clave para el mantenimiento de la línea de costa.

## ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se centra en el sistema deltaico y turbidítico del río Magdalena en plena costa caribeña colombiana. Con una cuenca de drenaje de  $2.57 \times 10^5 \text{ km}^2$ , el río Magdalena entrega el 26 % del agua dulce total ( $205 \text{ km}^3/\text{año}$ ) y el 38 % de la carga de sedimentos ( $144 \times 10^6 \text{ ton/año}$ ). El río Magdalena es considerado uno de los ríos con mayor descarga de sedimentos y agua dulce al océano del mundo (Restrepo y Kjerfve, 2000).

El río Magdalena crea un delta dominado por el río y el oleaje, en forma de arco con una superficie aproximada de  $1690 \text{ km}^2$  (Higgins *et al.*, 2016; J. C. Restrepo *et al.*, 2016). El delta tiene un canal de descarga principal (Bocas de Ceniza), una descarga distributiva importante en la bahía de Cartagena (Canal del Dique) y una compleja red de conexiones menores con la ciénaga Grande de Santa Marta (Restrepo *et al.*, 2016). Bocas de Ceniza está alineada con un cañón submarino empinado, el cañón del Magdalena. La morfología y arquitectura de este cañón está relacionada con el aporte sedimentario del río Magdalena (Ercilla *et al.*, 2002; Romero-Otero *et al.*, 2015; Vernette *et al.*, 1992). Los sedimentos depositados en el cañón alimentan un sistema turbidítico mediante procesos de deslizamientos y corrientes de turbidez, desencadenados por eventos sísmicos (Ercilla *et al.*, 2002; Kolla y Buffler, 1983; Restrepo, 2014; Romero-Otero *et al.*, 2015).

Para el estudio se consideraron accidentes geográficos específicos asociados al delta del río Magdalena. La ciénaga de Mallorquín es un elemento central de la investigación. Por otro lado, se consideró isla Verde, por su completa desaparición y la flecha de Puerto Velero, por su

aparición y crecimiento permanente durante los últimos 40 años. La costa al este de los tajamares de Bocas de Ceniza es de interés debido al proceso de sedimentación resultante de la construcción de las obras hidráulicas en la desembocadura del río Magdalena (Fig. 1).



**Figura 1.** Área de estudio. Isla Verde se resalta en rojo, debido a su desaparición después de 1935.

### Ecosistemas marino-costeros

La línea costera del delta del río Magdalena se enmarca en la Unidad Ambiental Costera (UAC) del río Magdalena, Complejo Canal del Dique – Sistema Lagunar de la Ciénaga Grande de Santa Marta, la cual se extiende desde la desembocadura del río Córdoba (departamento del Magdalena) hasta punta Comisario (departamento de Sucre). Incluye la isla Tierra Bomba, isla Barú y el archipiélago de Nuestra Señora del Rosario (MADS, 2013), cubriendo la línea costera de los departamentos del Magdalena a partir de la población de Ciénaga, y de los departamentos del Atlántico, Bolívar y Sucre.

Considerando características hidrológicas, ecosistémicas y geográficas de la UAC, esta se puede dividir varios sectores, donde se destacan dos que cubren el área de interés para el proyecto así:

- **Desembocadura río Córdoba – desembocadura río Magdalena.** En este sector, el bosque de manglar se ha ido recuperando por la ejecución de trabajos

hidráulicos en el complejo lagunar de la ciénaga Grande de Santa Marta en los años 90 y 2000, lo que incrementa la resiliencia de la línea de costa, aunque se sigue experimentando un déficit en el suministro de sedimentos, lo que origina procesos de erosión costera que ponen en riesgo infraestructura vial (por ejemplo, en el KM 19).

- **Desembocadura del río Magdalena – Punta Canoas.** Este sector carece de ecosistemas de manglar ya que en su mayoría ha desaparecido por la erosión. Tampoco existen pastos marinos o arrecifes de coral que podrían reducir la energía del oleaje y mitigar procesos de erosión. Por otra parte, existen dunas que aumentan la resiliencia costera ante eventos erosivos, producto de marejadas y tormentas; sin embargo, el sistema de dunas está experimentando un proceso de invasión de plantas que pone en peligro las especies nativas que recubren las dunas, lo que consecuentemente pone en riesgo estas estructuras costeras.

El caso de isla Verde es particularmente interesante, ya que, aunque estaba poblada

por ecosistemas de manglar, estos no fueron suficientes para protegerla del déficit sedimentario causado por la construcción de los tajamares de Bocas de Ceniza, lo que llevó a su desaparición. Según documentos de la época, en 1744 la isla consistía en extensos manglares anegadizos (Núñez, 2004).

La isla, por estar próxima a las Bocas de Ceniza, estaba cubierta de vastos y tupidos manglares que bordeaban varios caños laterales, como el Brazo de la Culebra y el Caño de la Piña; se destacaban varias especies de manglares como el mangle colorado (*Rhizophora mangle*), el mangle salado (*Avicennia nitida*), Laguncularia racemosa; en la parte de formación arenosa existían especies tales como el manzanillo (*Hippomane mancinella*), el cual era muy tóxico. Su extensa vegetación la complementaban montes espinosos que alcanzaban una altura promedio de 3 a 5 m, además vegetación de plantas halófilas, como *Batis maritima* y *Sesuvium portulacastrum* (Núñez, 2004).

Este tipo de ecosistema propio de las ensenadas y lagunas tropicales estaba además constituido por matorrales que se dispersaban de una manera extensiva. En 1947,

*Los manglares hoy han desaparecido casi por completo y solo quedan en esos parajes millares de troncos escuetos, con vestigios de la vegetación primitiva. La causa de esta alteración ecológica es, al parecer, atribuible a la obra indirecta del hombre; en efecto, la construcción del dique de piedra, que se extiende por toda la orilla del río Magdalena desde muy cerca de Las Flores hasta rematar en el malecón o tajamar occidental de las Bocas, cerró por completo el paso de las aguas hacia los esteros.* (Citado por Núñez, 2004).

En la flecha de Puerto Velero, al ser una formación joven, las principales especies de vegetación que dominan este ambiente eólico son *Sesuvium portulacastrum*, *Ipomoea pes-caprae*, *Cyperus ligularis* y *Calotropis procera*. Además, en la costa y en la zona posterior se observa una significativa acumulación de troncos transportados por la deriva litoral desde el río Magdalena. Estos troncos han facilitado la retención de sedimentos, favoreciendo la colonización de las especies predominantes en este sector, especialmente

*Sesuvium portulacastrum* e *Ipomoea pes-caprae*. En sectores más elevados, además de las dos especies anteriores, se puede encontrar la especie *Cyperus ligularis*, la cual se presenta en la base de formaciones de dunas (Villate et al., 2020).

## METODOLOGÍA

Para determinar el impacto de la ubicación de los tajamares de Bocas de Ceniza en la dinámica costera del delta del río Magdalena, se digitalizaron los litorales de imágenes satelitales de diferentes años, descargadas de Google Earth. Considerando las limitaciones temporales de las imágenes en relación con la fecha de construcción de los tajamares (1935), se utilizó la carta náutica Puerto Colombia – Santa Marta 5688 (ed. 1938). El levantamiento hidrográfico para esta carta se realizó a bordo del USS Nokomis entre 1935 y 1936, lo que se convirtió en la base para los cálculos, considerando que la finalización de la construcción de los tajamares fue para esa fecha, aunque hubo otras obras posteriores.

### Evaluación de la evolución del litoral en la zona del delta del río Magdalena

Se emplearon imágenes satelitales y cartografía náutica para evaluar la morfología y morfodinámica costera en las inmediaciones de la desembocadura del río Magdalena (Tabla 1). Las imágenes satelitales fueron descargadas utilizando Google Earth a una escala aproximada de 1:40000, georreferenciadas y digitalizadas con el software Surfer. La cartografía náutica empleada corresponde a la carta 5688, con una escala de 1:80000.

El análisis de la evolución temporal y espacial de la línea de costa se realizó comparando su posición en diferentes momentos antes y después de la construcción de los tajamares de Bocas de Ceniza (1935), tomando como referencia el periodo 1935-2021, subdividido en ventanas temporales determinadas por la disponibilidad de imágenes (Bombino et al., 2022). Para el caso de la flecha de Puerto Velero, cuyo origen es posterior a 1935, se consideró el periodo de 1986 a 2021.

La digitalización de la línea de costa, basada en fotointerpretación, permitió identificar y extraer esta línea de las diferentes imágenes disponibles. Debido a la variabilidad en las

condiciones oceanográficas y las fuentes de información (cartografía e imágenes satelitales), se eligió como referencia la línea de separación

entre las áreas húmedas y secas (Boak y Turner, 2005; Bombino *et al.*, 2022), que corresponde a la línea de más alta marea.

**Tabla 1.** Lista de imágenes y cartografía náutica usada para la digitalización de la línea de costa.

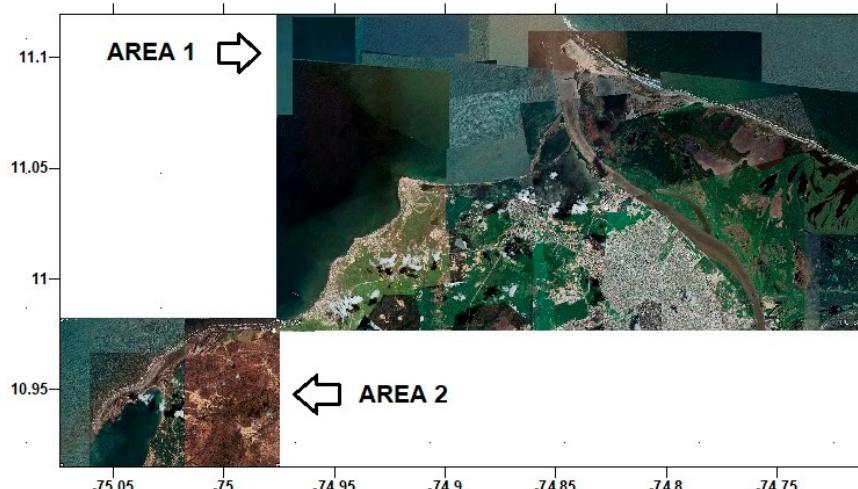
Imágenes / cartografía náutica	Fecha de adquisición / edición
Carta náutica Puerto Colombia-Santa Marta (5688). Ed.: 1938	1935
NASA Skylab Satellite	1973
Google Earth ciénaga de Mallorquín	1985, 2000, 2009, 2021
Google Earth Puerto Velero	1986, 1987, 1988, 1991, 1997, 2000, 2006, 2009, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2021

La evolución de la línea de costa y su variación en el tiempo se evaluó integrando los enfoques metodológicos de Aiello *et al.* (2013), Barbaro *et al.* (2019), Bombino *et al.* (2022). Para el caso de la flecha de Puerto Velero, el análisis abarcó el periodo 1986-2021, mientras que, para otras áreas de interés, se consideró la ventana 1935-2021.

La estimación de áreas costeras erosionadas o sedimentadas se realizó considerando el ancho de costa afectado por los cambios morfológicos observados entre las imágenes. Dado que en la zona de estudio la marea es de tipo micromareal, con un rango de variación de decenas de centímetros (Molares, 2004), se determinó que sus efectos sobre la posición del litoral son insignificantes.

Las imágenes fueron descargadas mediante Google Earth Pro (GEP) para dos áreas de interés (Fig. 2). La selección de estas áreas consideró tanto la cobertura como la disponibilidad de imágenes en el periodo de estudio, además de la facilidad de manejo, ya que el tamaño de cada imagen varió entre 30 y 60 MB, con una resolución de 7218 x 3912 píxeles.

La primera área abarcaba desde el este del tajamar occidental en el departamento del Magdalena hasta la bahía de Sabanilla al oeste del tajamar oriental (36 km de línea de costa). La segunda área, contigua a la primera, incluía la flecha de Puerto Velero, desde el borde oeste de la primera área hasta la ensenada Playa de las Damas al suroeste, cubriendo aproximadamente 20.5 km de línea de costa.



**Figura 2.** Cubrimiento de las áreas escogidas para la descarga de imágenes desde GEP para el análisis de línea de costa.

Para la georreferenciación, se definieron cuatro puntos de control en los vértices de cada imagen, correspondientes a las áreas previamente definidas (Tabla 2). En el área 1 se descargaron cuatro imágenes con un intervalo

aproximado de diez años entre ellas. En el área 2, debido a la alta dinámica de la flecha de Puerto Velero, se descargaron quince imágenes con intervalos de tiempo variables, dependiendo de su disponibilidad.

**Tabla 2.** Puntos de control (PC) en las cuatro esquinas de las imágenes para las dos áreas de descarga de imágenes desde Google Earth.

	Área 1		Área 2	
Punto	PC_NW	PC_NE	PC_NW	PC_NE
Lat	11.119639	11.119639	10.982091	10.982091
Long	-74.97755	-74.709157	-75.074066	-74.97499
Punto	PC_SW	PC_SE	PC_SW	PC_SE
Lat	10.976276	10.976276	10.915004	10.915004
Long	-74.97755	-74.709157	-75.074066	-74.97499

La imágenes aéreas y cartografía náutica empleada para el análisis de la línea de costa se relacionan en la Tabla 3.

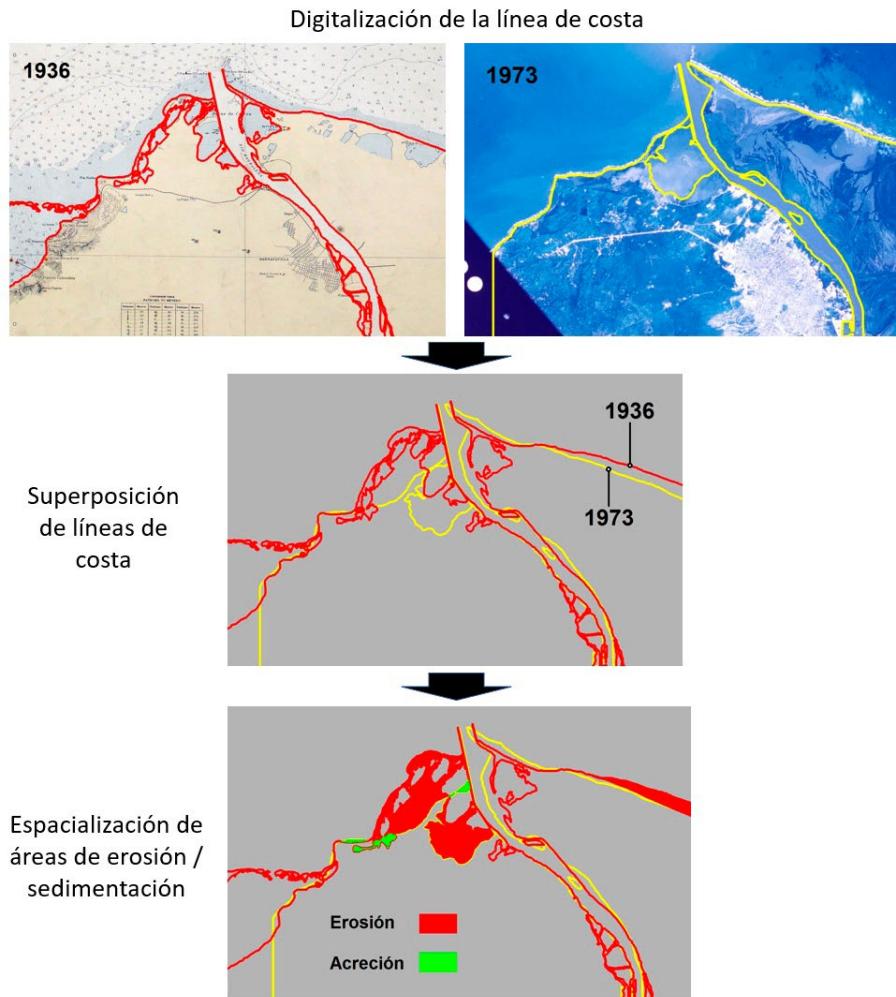
Una vez obtenidas las imágenes, los puntos de control fueron utilizados para su georreferenciación en Surfer, asegurando que las posiciones de los vértices (latitud y longitud) coincidieran con los puntos previamente definidos.

**Tabla 3.** Lista de imágenes de satélite y cartografía náutica usadas para la digitalización y cálculos de la dinámica de la línea de costa y erosión costera.

Imágenes / Cartas náuticas	Fecha de adquisición / levantamiento
Carta náutica Puerto Colombia - Santa Marta (5688). Ed.: 1938	1936
Carta náutica del río Magdalena-Puerto de Barranquilla - Servicio Hidrográfico de la Marina Francesa (edición 1938).	1936
NASA Skylab Satellite	1973
GEP imagen ciénaga de Mallorquín	1985, 2000, 2009, 2021
GEP image Puerto Velero	1986, 1987, 1988, 1991, 1997, 2000, 2006, 2009, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2021

Una vez digitalizadas todas las líneas de costa, se superpusieron en pares consecutivos en el tiempo, de acuerdo con la disponibilidad de imágenes satelitales y cartografía náutica. Definidas las áreas de erosión y sedimentación, se

procedió a calcularlas utilizando las herramientas de Surfer. De igual manera, se determinaron las distancias de avance o retroceso de la línea de costa correspondientes al periodo comprendido entre las líneas base (Fig. 3).



**Figura 3.** Metodología para la determinación de zonas de erosión y sedimentación en el área de estudio.

### Equilibrio morfodinámico

Con el propósito de conocer si la línea de costa alcanzó el equilibrio morfodinámico a barlovento del tajamar occidental, se aplicó el modelo parabólico empírico basado en la ecuación de forma de bahía parabólica (Hsu y Evans, 1989), que define la forma en planta de una playa crenulada en equilibrio estático, en la que un punto P en la costa curva se puede calcular mediante:

$$\frac{R_N}{R_0} = C_0 + C_1 \left( \frac{\beta}{\theta_N} \right) + C_2 \left( \frac{\beta}{\theta_N} \right)^2 \quad [1]$$

En la ecuación 1 los parámetros principales son el ángulo  $\beta$  (ángulo formado por la dirección

de la cresta de la ola y la línea de control, que une el punto de difracción con el punto donde comienza el tramo recto de la playa) y la longitud  $R_0$  (longitud de la línea de control). Se supone que la dirección de las olas es paralela a la sección recta de la playa. Con base en los parámetros de entrada datos, el modelo calcula, para el rango deseado del ángulo  $\theta_N$ , la longitud correspondiente  $R_N$  que genera la forma estable de la playa. Las tres constantes  $C$  se obtienen mediante análisis de regresión y dependen de  $\beta$ . En la ecuación los parámetros se utilizan como proporciones (por ejemplo,  $R_N / R_0$ ,  $\beta/\theta_N$ ), lo que permite que el modelo sea adimensional.

Por otra parte, se calcula la razón de indentación ( $a/R_0$ ), en donde la máxima indentación (o retracción)  $a$  es medida normal desde la línea

de control ( $R_0$ ) al punto del mayor retroceso de la línea de costa. La razón de la indentación con respecto a la línea de control ( $R_0$ ) teniendo en cuenta el ángulo  $\beta$ , resulta en un valor el cual en caso de ser menor que el valor crítico indicaría que la línea de costa es inestable y no ha alcanzado la estabilidad morfodinámica (Silvester y Hsu, 1993).

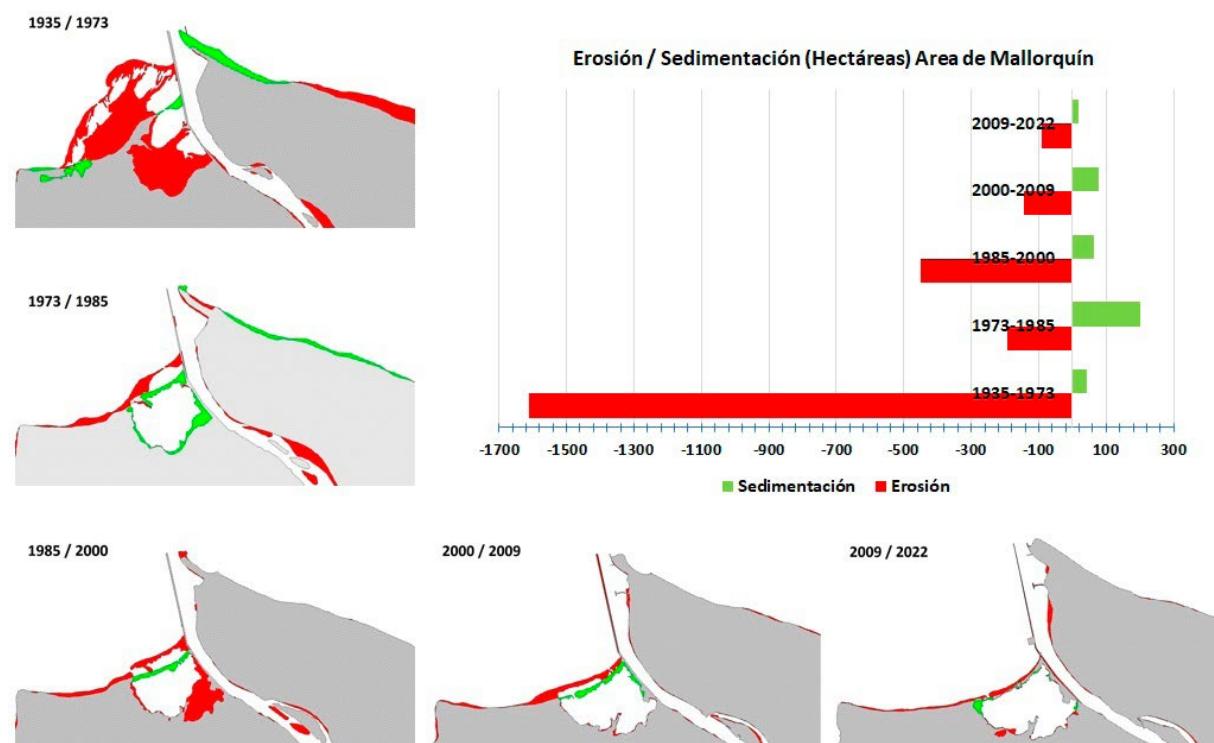
## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se muestran los principales resultados de la comparación y análisis de las líneas de costa de los diferentes años, considerando las principales

características costeras como son el litoral al este de la desembocadura del río Magdalena y al oeste, destacando la barra de la ciénaga de Mallorquín, isla Verde y la flecha de Puerto Velero.

### Barra de Mallorquín

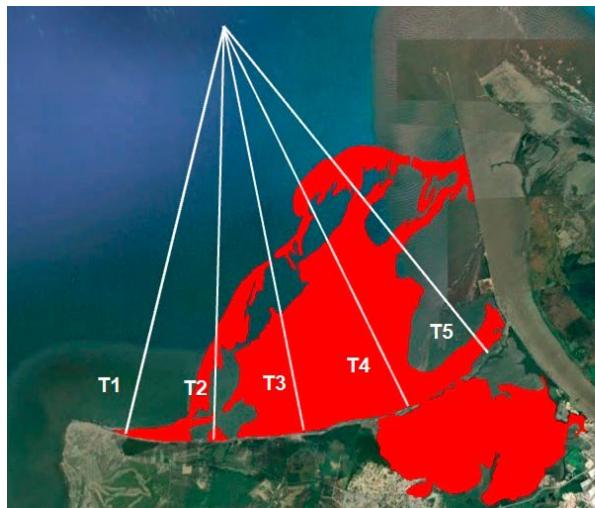
En 1935 se inició un importante proceso de erosión al oeste de la desembocadura del río Magdalena, que provocó la pérdida de 1600 ha entre 1935 y 1973 a un ritmo de 42 ha/año. Hasta la fecha este proceso de erosión continua, aunque ralentizado, con una tasa de erosión promedio de 17 ha/año entre 1973 y 2022 (Fig. 4).



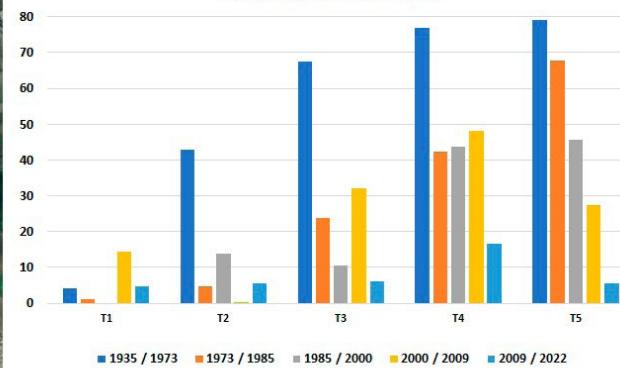
**Figura 4.** Áreas erosionadas (rojo) y sedimentadas (verde) frente a la ciénaga de Mallorquín durante diferentes períodos de tiempo entre 1935 y 2022.

En cuanto al ritmo de retroceso anual del litoral, este ha sido mayor en el extremo oriental de la barra de Mallorquín con una media anual (1935-2022) de 45 m/año, mientras que en el extremo oeste fue de 5 m/año; sin embargo,

se debe considerar que este proceso se ha ido desacelerando a una tasa de 18 m/año en el caso del transecto 5 (T5). En el resto de la barra los valores de las tasas son más pequeños (Fig. 5; Tabla 4).



Retroceso de la línea de costa (m/año)  
Barra ciénaga de Mallorquín



**Figura 5.** Rata de retroceso de la línea de costa frente a la ciénaga de Mallorquín a lo largo de cinco transectos y para diferentes lapsos de tiempo, entre 1935 y 2022.

**Tabla 4.** Rata de retroceso de la línea de costa (m/año) para los períodos y transectos indicados.

Lapso	T1	T2	T3	T4	T5	Promedio
1935-1973	4	43	68	77	79	54
1973-1985	4	15	24	42	68	31
1985-2000	0	14	11	44	46	23
2000-2009	14	0	32	48	27	24
2009-2022	5	6	6	16	6	8
Promedio	5	16	28	46	45	28

El litoral ha ido retrocediendo desde 1935, desde 391 m en el extremo occidental de la barra de la ciénaga (T1) hasta 4.8 km en la zona más próxima al tajamar occidental (T5) (Tabla 5), hasta alcanzar un estado morfodinámico más equilibrado, considerando la ralentización del proceso de erosión.

**Tabla 5.** Retroceso de la línea de costa (m) para los períodos y transectos indicados.

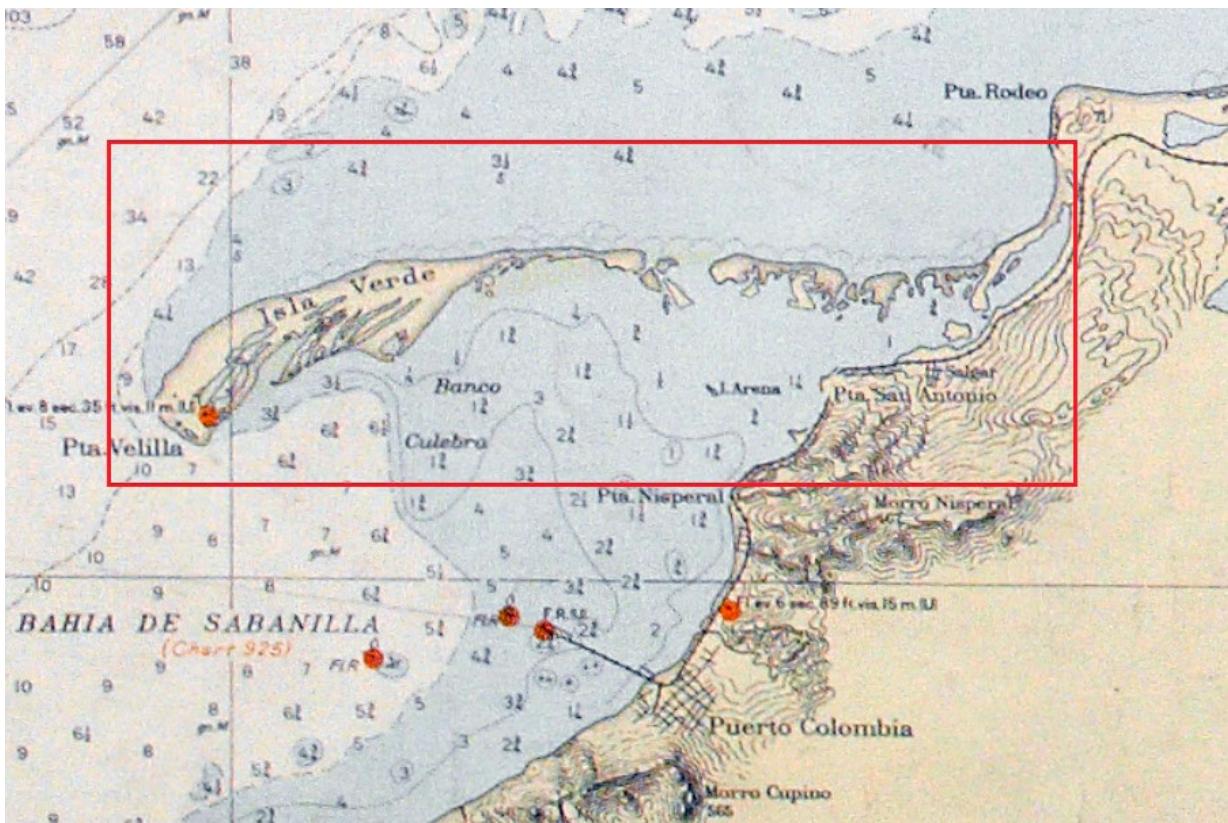
Lapso	T1	T2	T3	T4	T5
1935-1973	155	1634	2565	2918	3004
1973-1985	45	181	286	507	812
1985-2000	0	207	160	657	684
2000-2009	130	3	289	434	246
2009-2022	61	72	81	214	72
Total	391	2098	3381	4730	4818

### Isla Verde

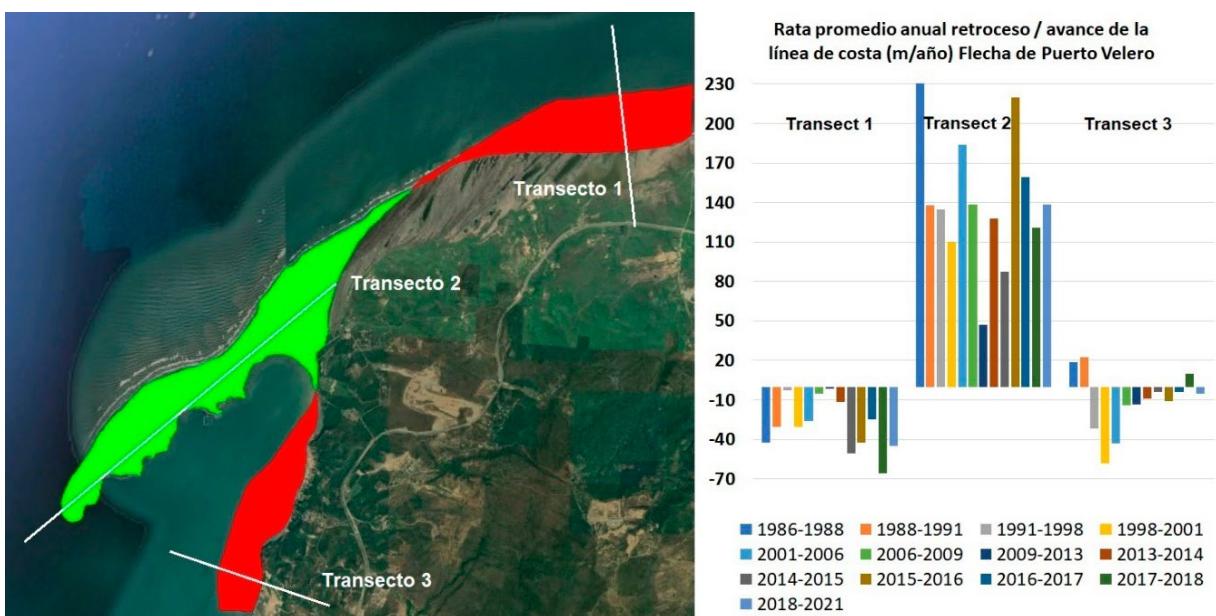
La inexistencia de cartografía náutica posterior a 1936 y antes de la disponibilidad de imágenes satelitales (1984) no permite establecer la morfodinámica de isla Verde y su proceso de desaparición. Se estima que el proceso de erosión costera provocó la pérdida de 516 ha (Fig. 6). La rápida y acelerada erosión de isla Verde inició en 1925 con las primeras obras de encauzamiento de la desembocadura del río Magdalena (Núñez, 2004).

### Flecha de Puerto Velero

Para analizar la morfodinámica de la flecha de Puerto Velero se amplió el área de interés a ambos lados de este, encontrándose tres sectores característicos. El primer (transecto 1) y tercer sector (transecto 3) al noreste y sur de la flecha, respectivamente, tienen características claramente erosivas, mientras que la flecha (transecto 1) ha sufrido una importante progradación a un ritmo promedio anual (1986-2022) de +141 m/año. A partir de 1988 la sedimentación se desaceleró hasta alcanzar un mínimo de +50 m/año en el período comprendido entre 2009 y 2013, aunque se desaceleró entre el período 1986 y 2013, donde disminuyó a +46 m/año. A partir de 2013 el proceso de sedimentación se aceleró hasta alcanzar +138 m/año en el período 2018-2021, pero en ocasiones las tasas de sedimentación aumentaron (Fig. 7). En 2022 la flecha alcanzó 4.8 km de largo.



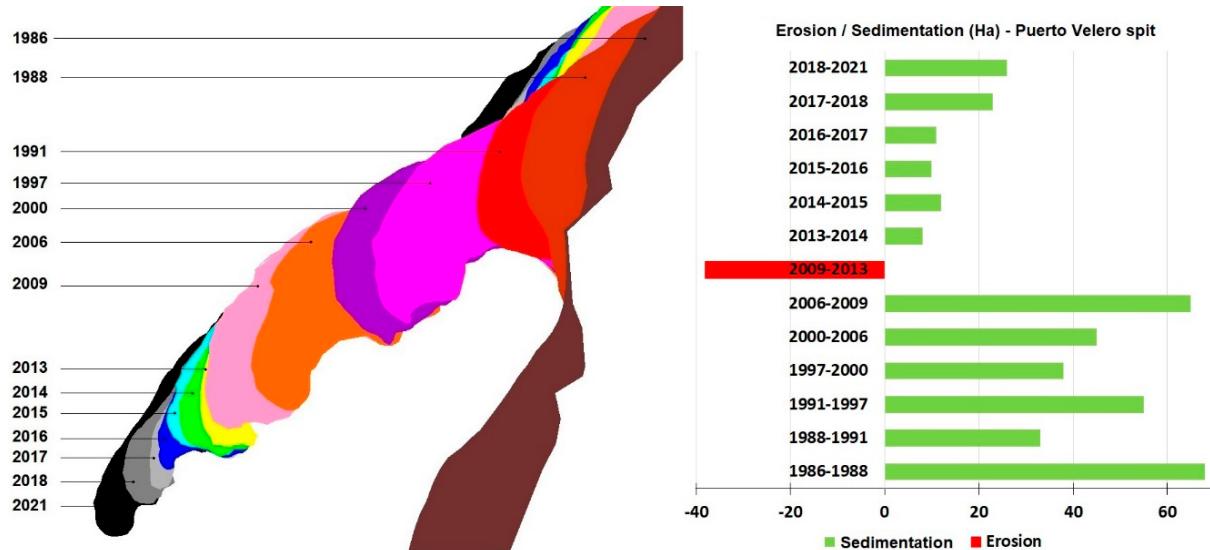
**Figura 6.** Se muestra isla Verde en la carta náutica de 1935 Puerto Colombia-Santa Marta. Carta náutica Puerto Colombia-Santa Marta (5688). Ed.: 1938.



**Figura 7.** Tasa media anual de retroceso y avance de la línea de costa a lo largo de los transectos indicados y para los períodos correspondientes.

La sedimentación ha sido predominante, aunque durante el periodo 2009-2013 se presentó erosión (Fig. 8); sin embargo, esto no limitó el crecimiento y proyección de la flecha, ya que

creció 50 m para el mismo período. Esto indica que el alargamiento de la flecha se produjo a expensas de su ancho.



**Figura 8.** Proceso de crecimiento de la flecha de Puerto Velero entre 1986 y 2021. A la derecha, áreas sedimentadas (verde) y erosionadas (rojo) (ha), según el análisis del borde costero para los períodos correspondientes.

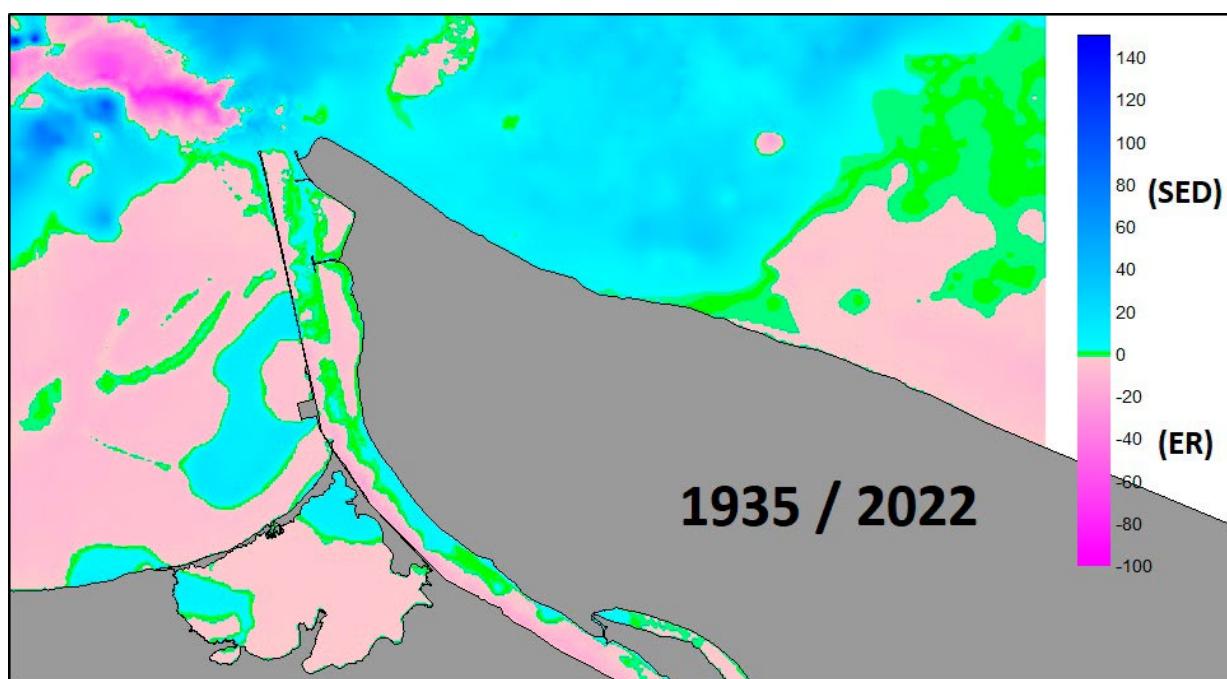
La erosión y sedimentación entre 1935 y 2022 para toda el área de interés se indica en la Figura 9.



**Figura 9.** Zonas de erosión (rojo) y acreción (verde) en el delta del Magdalena entre 1935-2022.

Para evaluar los cambios en el fondo se contó con levantamientos batimétricos realizados por la Autoridad Marítima Colombiana (Dimar). Los datos utilizados fueron levantamientos batimétricos de los primeros 30 km del río Magdalena (2021) y de las cartas náuticas colombianas: 612: Aproximación a Barranquilla (2011), 407: Puerto Colombia a Santa Marta (1989), 408: Punta Canoas-Puerto Colombia (1999), 253: Río Magdalena-Bocas de Cenizas (2021). Este dato se comparó con los datos batimétricos de la carta náutica de 1938 de Puerto Colombia-Santa Marta (5688) (Fig. 10).

La característica más destacada es la formación de un canal submarino frente a la desembocadura del río Magdalena, resultado de la erosión del fondo marino, que aumentó la profundidad entre 60 y 80 m. A ambos lados del canal se observa sedimentación que varía entre 10 y 30 m. Al oeste de los tajamares, frente a la ciénaga de Mallorquín, la erosión del fondo oscila entre 5 y 10 m. En contraste, al este, la zona muestra una sedimentación que alcanza hasta 20 m.



**Figura 10.** Zonas de sedimentación (azul) y erosión (fucsia) del fondo marino en las inmediaciones de la desembocadura del río Magdalena entre 1935-2021.

### Estados morfodinámicos

El resultado de la aplicación de la ecuación parabólica de Hsu (Hsu y Evans, 1989) indica que la línea de costa de la barra de Mallorquín se encuentra en equilibrio estático (Fig. 11), lo que sugiere que el transporte neto de sedimentos es prácticamente nulo y que las olas rompen de manera simultánea a lo largo de la playa. Además, al aplicar el concepto de indentación, la razón de indentación ( $a/R_0$ ) arroja un valor de 0.44; lo cual para un ángulo  $\beta$  de  $36.48^\circ$  confirma que la playa se encuentra en un estado de estabilidad morfodinámica (Silvester y Hsu, 1993).

En el caso de la flecha de Puerto Velero la dinámica de la línea de costa a lo largo de los transectos indicados en la Fig. 7 muestra un crecimiento continuo en el transecto 2, lo que indica que la flecha aún no ha alcanzado el equilibrio y, por lo tanto, se encuentra en un estado morfodinámico inestable. Por el contrario, en el transecto 3, al suroeste, la playa parece estar acercándose al equilibrio morfodinámico, ya que los datos sugieren que la tasa de retroceso de la línea de costa se está ralentizando, muy probablemente debido a la protección que ofrece la flecha a medida que sigue creciendo. En cambio, en el transecto 1 al noreste de la flecha, la línea

de costa permanece en un estado inestable, con una tendencia erosiva constante. Los resultados sugieren que la erosión en esta sección es la fuente de sedimentos para el crecimiento de la flecha, dado que el comportamiento erosivo en esta zona coincide con el proceso de progradación de la flecha.

Entre 1986 y 2013 el crecimiento de la flecha (transecto 2) se fue reduciendo en cada período, al igual que la tasa de erosión al noreste (transecto 1). Sin embargo, entre 2013 y 2021 se observó una aceleración tanto en el crecimiento de la flecha como en la erosión al noreste.



**Figura 11.** Aplicación de la ecuación parabólica de Hsu para determinar el estado morfodinámico de la barra de la ciénaga de Mallorquín.

## DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos evidencian que la modificación de la descarga del río Magdalena, particularmente por la construcción de los tajamares en Bocas de Ceniza, ha generado un déficit crónico de sedimentos en la zona costera adyacente. Este déficit ha desencadenado procesos erosivos significativos incluso en sectores con ecosistemas de manglar saludables y sin presión urbana directa, como Isla Verde y el borde costero de la ciénaga de Mallorquín, donde se registró una pérdida de 2566 hectáreas.

La presencia del manglar no fue suficiente para mitigar la erosión, lo que sugiere que su capacidad de protección costera depende críticamente del suministro sedimentario. En contraste, en Puerto Velero la ausencia del manglar no impidió la formación y crecimiento de una flecha litoral, alimentada por sedimentos erosionados de zonas a barlovento. Este comportamiento confirma que la disponibilidad de sedimentos es el factor determinante en la evolución morfodinámica de la costa.

El retroceso de la línea de costa en Mallorquín muestra una tendencia hacia el equilibrio morfodinámico bajo condiciones de déficit sedimentario, aunque eventos extremos podrían revertir esta estabilización. La aplicación de la ecuación parabólica de Hsu y el análisis de la razón de indentación respaldan esta interpretación.

Estos hallazgos refuerzan la hipótesis de que la interrupción del transporte de deriva litoral por estructuras rígidas como tajamares puede desencadenar procesos erosivos severos, incluso en presencia de ecosistemas naturalmente resilientes. La restauración del suministro sedimentario emerge como una condición necesaria para la recuperación costera, especialmente en zonas con manglar.

## **CONCLUSIONES**

El transporte de sedimentos a lo largo del litoral, a sotavento de la desembocadura del río Magdalena, se alimentaba de los sedimentos resuspendidos de la playa (por el oleaje) y del aporte de sedimentos del río, pero una vez construidos los tajamares de Bocas de Ceniza el suministro de sedimentos a la corriente de deriva litoral disminuyó.

Como consecuencia de esto y de forma inmediata comenzó la erosión del frente costero de la actual ciénaga de Mallorquín, así como la erosión de isla Verde. Una vez desaparecida isla Verde el puerto de Puerto Colombia paralizó operaciones debido al desmejoramiento de la condición del mar en el sector del muelle, casi 50 años después de que la flecha de Puerto Velero iniciará su formación por la migración de sedimentos erosionados desde la desembocadura del río Magdalena. A sotavento de la flecha, la falta de sedimentos, debido a la interrupción del transporte de deriva litoral originó un proceso de erosión.

Durante el período 1935-2022 al este de la desembocadura del Magdalena se produjo la acumulación de arenas en un área de 387 ha, controlada por la extensión del tajamar oriental; por otra parte, se evidenció un proceso de erosión más al este, el cual llevó a la pérdida de 1600 ha, también por reducción en el suministro de sedimentos y asociados a otros procesos relacionados con la reducción de las estructuras

de intercambio de masas de agua de la ciénaga Grande de Santa Marta, por la construcción de la carretera entre Barranquilla y Santa Marta.

Al oeste de los tajamares la erosión es predominante, alcanzado en los últimos 87 años la pérdida de terreno costero en aproximadamente 3336 ha. Esto produjo el retroceso del litoral a lo largo de 24.6 km después de la desembocadura del río Magdalena y la desaparición de isla Verde. Los cambios en el fondo y en la morfología de la costa permitieron el proceso de sedimentación y la formación de la flecha de Puerto Velero que cubre un área de 374 ha, con una longitud de 4.8 km, manteniendo su crecimiento. Al oeste de la flecha y, por interrupción del transporte de deriva asociado al crecimiento de la flecha, el proceso de erosión ha llevado a la pérdida de 163 ha.

En el caso de la ciénaga de Mallorquín el retroceso de la línea de costa se ha ralentizado desde un promedio de -54 m/año entre 1935-1973 a 8 m/año en el periodo 2009-2022, indicando que la línea de costa está encontrando el estado de equilibrio bajo las condiciones de déficit sedimentario, lo que es confirmado mediante la aplicación de la ecuación parabólica de Hsu y el cálculo de la razón de indentación. Sin embargo, condiciones de oleaje extremas, repetitivas y por encima del régimen climático anual podrían llevar a la pérdida de la ciénaga por la erosión de la barra de Mallorquín, en caso de que no se restituya el suministro sedimentario.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a la Dirección General Marítima (Dimar) y, especialmente, al Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH) por el aporte de información batimétrica, registros meteorológicos y de boyas de oleaje. Asimismo, al programa de Doctorado en Desarrollo Sostenible de la Universidad de la Costa, ya que fue en el marco de este en el que se desarrolló la presente investigación.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Aiello, A., Canora, F., Pasquariello, G., & Spilotro, G. (2013). Shoreline variations and coastal dynamics: A space-time data analysis of the Jonian littoral, Italy. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 129, 124–135. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2013.06.012>

- Andrade, C. (2023). *The artificial modification of the coastal geography between Bocas de Ceniza and the Bay of Cartagena. Consequences on the current human geography on the Colombian Caribbean coast. - La modificación artificial de la geografía costera entre Bocas de Ceniza y la Bahía de Cartagena - Consecuencias en la geografía humana actual en la costa Caribe colombiana*. 52, 63–81.
- Alvarado, M. (2005). Cartagena y el plan de restauración ambiental del canal del Dique y Barranquilla, y las obras de profundización del canal navegable de acceso a la zona portuaria: visión general. In Juan D. Restrepo (Ed.), *Los sedimentos del río Magdalena: reflejo de la crisis ambiental* (1st ed., pp. 217–254). EAFIT.
- Ávila, B., & Gallo, N. (2021). Morphological behavior of the Magdalena River delta (Colombia) due to intra and interannual variations in river discharge. *Journal of South American Earth Sciences*, 108, 103215. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103215>
- Boak, E. H., & Turner, I. L. (2005). Shoreline definition and detection: A review. In *Journal of Coastal Research* (Vol. 21, Issue 4, pp. 688–703). <https://doi.org/10.2112/03-0071.1>
- Bombino, G., Barbaro, G., D'Agostino, D., Denisi, P., Foti, G., Labate, A., & Zimbone, S. M. (2022). Shoreline change and coastal erosion: The role of check dams. First indications from a case study in Calabria, southern Italy. *Catena*, 217. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106494>
- Boswood, P. K., & Murray, R. J. (2001). *World-wide sand bypassing systems: data report (Compiled 1997)*. [www.env.qld.gov.au](http://www.env.qld.gov.au)
- Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P. W., Trisos, C., Romero, J., Aldunce, P., Barrett, K., Blanco, G., Cheung, W. W. L., Connors, S., Denton, F., Diongue-Niang, A., Dodman, D., Garschagen, M., Geden, O., Hayward, B., Jones, C., ... Ha, M. (2023). IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. (P. Arias, M. Bustamante, I. Elgizouli, G. Flato, M. Howden, C. Méndez-Vallejo, J. J. Pereira, R. Pichs-Madruga, S. K. Rose, Y. Saheb, R. Sánchez Rodríguez, D. Ürge-Vorsatz, C. Xiao, N. Yassa, J. Romero, J. Kim, E. F. Haites, Y. Jung, R. Stavins, ... C. Péan, Eds.). <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Correa, I. D., Alcántara-Carrió, J., & González, D. A. (2005). Historical and Recent Shore Erosion along the Colombian Caribbean Coast. *Journal of Coastal Research*, 49, 52–57.
- Ercilla, G., Alonso, B., Estrada, F., Chiocci, F. L., Baraza, J., & Farran, M. L. (2002). The Magdalena Turbidite System (Caribbean Sea): present-day morphology and architecture model. *Marine Geology*, 185(3–4), 303–318. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(02\)00182-2](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(02)00182-2)
- Galgano, F. A. (2009). *Middle States Geographer* (Vol. 42).
- Higgins, A., Restrepo, J. C., Ortiz, J. C., Pierini, J., & Otero, L. (2016). Suspended sediment transport in the Magdalena River (Colombia, South America): Hydrologic regime, rating parameters and effective discharge variability. *International Journal of Sediment Research*, 31(1), 25–35. <https://doi.org/10.1016/J.IJSRC.2015.04.003>
- Hsu, J. R. C., & Evans, C. (1989). Parabolic bay shapes and applications. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 87(4), 557–570. <https://doi.org/10.1680/iicep.1989.3778>
- Kolla, V., & Buffler, R. T. (1983). Morphologic, acoustic, and sedimentologic characteristics of the Magdalena Fan. *Geo-Marine Letters*, 3(2), 85–91. <https://doi.org/10.1007/BF02462452>
- Komar, P. D. (1996). Tidal-Inlet Processes and Morphology Related to the Transport of Sediments. *Journal of Coastal Research*, 23–45. <http://www.jstor.org/stable/25736067>
- Koopmans, B. N. (1971). *Interpretación de fotografías áreas en morfología costera : relacionada con proyectos de ingeniería* (1st ed.). Centro Interamericano de Fotointerpretación.
- Luijendijk, A., Hagenaars, G., Ranasinghe, R., Baart, F., Donchyts, G., & Aarninkhof, S. (2018).

- The State of the World's Beaches. Scientific Reports, 8(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24630-6> PMid:29703960 PMCid:PMC5923213
- MADS. (2013). *Decreto 1120 del 2013. Por el cual se reglamentas las Unidades Ambientales.* (1120; p. 10).
- Martinez, J. O., Pilkey, O. H., & Neal, W. J. (1990). Rapid formation of large coastal sand bodies after emplacement of Magdalena river jetties, northern Colombia. *Environmental Geology and Water Sciences*, 16(3), 187-194. <https://doi.org/10.1007/BF01706043>
- Molares, R. J. (2004). Clasificación e identificación de las componentes de marea del Caribe colombiano. *Boletín Científico CIOH*, 22, 105-114. <https://doi.org/10.26640/22159045.132>
- Molina, A., Molina, C., Thomas, Y. F., & Molina, L. E. (2001). Comportamiento de la línea de Costa del Caribe Colombiano (Sector entre Barranquilla, desde Bocas de Ceniza hasta la Flecha de Galerazamba 1935-1996). *Bol. Cient. CIOH*, 19, 68-79. [https://doi.org/10.26640/01200542.19.68\\_79](https://doi.org/10.26640/01200542.19.68_79)
- Núñez, H. (2004). La desaparición de Isla Verde. Un desastre ecológico del siglo XX en el Caribe colombiano. *Huellas - Universidad Del Norte*, 60, 27-33.
- Orejarena, A., Afanador, F., Ramos, I., Conde, M., & Restrepo, J. (2015). Evolución morfológica de la espiga de Galerazamba, Caribe colombiano Galerazamba Spit morphological evolution, Colombian Caribbean. *Bol. Cient. CIOH*, 33, 123-144. [https://doi.org/10.26640/01200542.19.68\\_79](https://doi.org/10.26640/01200542.19.68_79)
- Posada Posada, B. O., & Henao Pineda, W. (2008). *Diagnóstico de la erosión en la zona costera del Caribe colombiano.* Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras - Invemar. <http://hdl.handle.net/1834/6682>
- Restrepo, J. C. (2014). "Dinámica Sedimentaria en Deltas Micromareales-Estratificados de Alta Descarga: Delta del Río Magdalena (Colombia-Mar Caribe)" Asesores. Universidad del Norte.
- Restrepo, J. C., Orejarena R, A. F., & Torregroza, A. C. (2017). Suspended sediment load in northwestern South America (Colombia): A new view on variability and fluxes into the Caribbean Sea. *Journal of South American Earth Sciences*, 80, 340-352. <https://doi.org/10.1016/J.JSAMES.2017.10.005>
- Restrepo, J. C., Schrottke, K., Traini, C., Ortíz, J. C., Orejarena, A., Otero, L., Higgins, A., & Marriaga, L. (2016). Sediment transport and geomorphological change in a high-discharge tropical delta (Magdalena River, Colombia): Insights from a period of intense change and human intervention (1990-2010). *Journal of Coastal Research*, 32(3), 575-589. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-14-00263.1>
- Restrepo, J. D. & Kjerfve, B. (2000). Magdalena river: Interannual variability (1975-1995) and revised water discharge and sediment load estimates. *Journal of Hydrology*, 235(1-2), 137-149. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00269-9](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00269-9)
- Restrepo, J. D. & López, S. A. (2008). Morphodynamics of the Pacific and Caribbean deltas of Colombia, South America. *Journal of South American Earth Sciences*, 25(1), 1-21. <https://doi.org/10.1016/J.JSAMES.2007.09.002>
- Ricaurte-Villota, C., Coca-Domínguez, O., González, M. E., Bejarano-Espinosa, M., Morales, D. F., Correa-Rojas, C., Briceño-Zuluaga, F., Legarda, G. A., & Arteaga, M. E. (2018). *Amenaza y vulnerabilidad por erosión costera en Colombia: enfoque regional para la gestión del riesgo.*
- Rivillas-Ospina, G. D., Ruiz-Martínez, G., Silva, R., Mendoza, E., Pacheco, C., Acuña, G., Rueda, J., Félix, A., Pérez, J., & Pinilla, C. (2017). Physical and morphological changes to wetlands induced by coastal structures. In *Coastal Research Library* (Vol. 21, pp. 275-315). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-56179-0\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-319-56179-0_9)
- Romero-Otero, G. A., Slatt, R. M., & Pirmez, C. (2015). Evolution of the Magdalena deepwater fan in a tectonically active setting, offshore Colombia. In *AAPG Memoir* (Vol. 108, pp. 675-707). American Association of Petroleum Geologists. <https://doi.org/10.1306/13531953M1083656>

- Silvester, R., & Hsu, J. R. C. (1993). Coastal stabilization: Innovative concepts: Richard Silvester and John R.C. Hsu. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1992, xiv + 578 pp. (hardcover) ISBN 0-13-14310-9. *Sedimentary Geology*, 88(1-2), 153-154. [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(93\)90155-X](https://doi.org/10.1016/0037-0738(93)90155-X)
- Vernette, G., Mauffret, A., Bobier, C., Briceno, L., & Gayet, J. (1992). Mud diapirism, fan sedimentation and strike-slip faulting, Caribbean Colombian Margin. *Tectonophysics*, 202(2-4), 335-349. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(92\)90118-P](https://doi.org/10.1016/0040-1951(92)90118-P)
- Villate, D. A., Portz, L., Manzolli, R. P., & Alcántara-Carrió, J. (2020). Human Disturbances of Shoreline Morphodynamics and Dune Ecosystem at the Puerto Velero Spit (Colombian Caribbean). *Journal of Coastal Research*, 95(sp1), 711-716. <https://doi.org/10.2112/SI95-138.1>
- Wang, Y. H., Wang, Y. H., Deng, A. J., Feng, H. C., Wang, D. W., & Guo, C. S. (2022). Emerging Downdrift Erosion by Twin Long-Range Jetties on an Open Mesotidal Muddy Coast, China. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(5). <https://doi.org/10.3390/jmse10050570>

## REPORTE DE CASO

# Manglares, playas y pastos marinos de la isla de San Andrés. Mapas comunitarios para comprender su valor

*Mangroves, beaches, and sea grasses of San Andres Island. Community maps to understand their value*

DOI: <http://doi.org/10.26640/22159045.2025.651>

Fecha de recepción: 2024-10-11 / Fecha de evaluación: 2025-08-29 / Fecha de aceptación: 2025-10-03

Johanna Paola Echeverry Hernández<sup>1</sup>, Angélica Paola Quintero Alvarado<sup>2</sup>, Alejandra Robles Sánchez<sup>3</sup>, John Henry Dorado Roncancio<sup>4</sup>, Clara Marcela López<sup>5</sup>, Luis Felipe Santos Becerra<sup>6</sup>, Julián Prato-Valderrama<sup>7</sup>, Jairo Humberto Medina Calderón<sup>8</sup>

## CITAR COMO:

Echeverry, P., Quintero, A., Robles, A., Dorado, J., López, C., Santos, L., Prato-Valderrama, J. y Medina, J. (2025). Manglares, playas y pastos marinos de la isla de San Andrés. Mapas comunitarios para comprender su valor. *Boletín Científico CIOH*, 44(2), 61-76. <http://doi.org/10.26640/22159045.2025.651>

## RESUMEN

La ciencia es social y, como toda actividad humana, no está exenta de la influencia de la cultura que rodea a los científicos que la realizan. Quienes la ejecutan son parte de la sociedad y los objetivos siempre son solucionar un problema o una necesidad de la comunidad. Para lograrlo se requiere la construcción de conocimiento, no solo del científico, sino también de aquel producido por otros actores de la comunidad. Con la realización de este proyecto, un grupo de estudiantes de la Universidad Nacional de Colombia incluyeron a estudiantes de grado noveno de los colegios Flowers Hill y Luis Amigó de secundaria de la isla de San Andrés, en la etapa final del ciclo del conocimiento acerca de los ecosistemas marino-costeros: aprender y compartir (en doble vía) a través de la creación de mapas como lenguaje de comunicación visual.

**PALABRAS CLAVES:** cartografía, ecosistema marino, ecosistema costero, manglar, pasto marino, playa, mapa, Caribe, Colombia.

## ABSTRACT

*Science is social, and like any human activity, it is not exempt from the influence of the culture that surrounds the scientists who carry it out. Those who execute it are part of society and the objectives are always to solve a problem or need in the community. To achieve this, it is necessary to build knowledge, not only scientific knowledge, but also that which is produced by other members of the community. With the completion of this project, a group of students from the Universidad Nacional de Colombia included high school students from Flowers Hill and Luis Amigó Schools in San Andres Island, in the final stage of the cycle of knowledge about marine-coastal ecosystems: learning and sharing (in two-way) through the creation of maps as a visual communication language.*

**KEYWORDS:** Cartography, marine ecosystems, coastal ecosystems, mangroves, sea grasses, beaches, maps, Caribbean, Colombia.

<sup>1</sup> Orcid: 0000-0002-0067-6102. Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá. Correo electrónico: [jpecheverryh@unal.edu.co](mailto:jpecheverryh@unal.edu.co)

<sup>2</sup> Orcid: 0009-0002-4457-3815. Universidad Nacional de Colombia, Sede Caribe. Correo electrónico: [aquinteroar@unal.edu.co](mailto:aquinteroar@unal.edu.co)

<sup>3</sup> Orcid: 0000-0001-6798-6167. Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá. Correo electrónico: [arobless@unal.edu.co](mailto:arobless@unal.edu.co)

<sup>4</sup> Orcid: 0000-0001-9480-2095. Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá. Correo electrónico: [jhdorador@unal.edu.co](mailto:jhdorador@unal.edu.co)

<sup>5</sup> Orcid: 0000-0001-9480-2095. Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá. Correo electrónico: [clmlopezsa@unal.edu.co](mailto:clmlopezsa@unal.edu.co)

<sup>6</sup> Orcid: 0000-0003-3307-093X. Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá. Correo electrónico: [lfsantosb@unal.edu.co](mailto:lfsantosb@unal.edu.co)

<sup>7</sup> Orcid: 0000-0003-4409-0792. Universidad Nacional de Colombia, Sede Caribe. Correo electrónico: [jprato@unal.edu.co](mailto:jprato@unal.edu.co)

<sup>8</sup> Orcid: 0000-0003-2512-0474. Universidad Nacional de Colombia, Sede Caribe. Correo electrónico: [jhmedinac@unal.edu.co](mailto:jhmedinac@unal.edu.co)



Publicado por la Dimar

## INTRODUCCIÓN

Existen diversas definiciones sobre el concepto de cartografía social, aunque la mayoría coincide en un mismo punto: la cartografía social es una herramienta metodológica para el análisis del entorno mediante el acercamiento de la comunidad a su espacio geográfico, socioeconómico e histórico-cultural, que permite crear conocimiento integral de un territorio, utilizando instrumentos técnicos y vivenciales. A través de ella se reafirma la pertenencia a un territorio y se despierta un interés por la solución de sus problemas (Piñeiro Alonso *et al.*, 2023), y es útil para que los ocupantes del territorio puedan dimensionar la distribución de sus recursos y los límites probables de aprovechamiento de los mismos (Guevara-Vargas y Mancera-Pineda, 2015), por ser capaz de generar conocimientos que permiten comprender el territorio (González-Torres, *et al.*, 2024).

Aunque los mapas no son un recurso exclusivo de la humanidad, pues muchas especies animales, además del ser humano, también elaboran mapas de los cuales depende su supervivencia, para nosotros han constituido una forma de lenguaje utilizada desde los inicios de nuestra historia para plasmar visiones, religiones, sueños, miedos, ideas y poderes (Brotton, 2014). Incluso, a través de mapas se iniciaron rebeliones y conquistas, como los mapas hechos en las trenzas de las esclavas en las que se comunicaban rutas de escape (National Geographic, 2023) y los mapas hechos canciones de los pueblos polinesios para comunicar la ubicación de nuevas islas (Romera Castillo, 2022).

Históricamente, la humanidad elaboraba sus mapas de forma participativa en la que quienes conocían o habían transitado un territorio aportaban sus experiencias y visión para su construcción. Más recientemente, con la aparición de herramientas tecnológicas remotas para la observación de la Tierra y la captura de variables ambientales esto se desdibujó, haciendo que los mapas “oficiales” de los países sean construidos únicamente por “expertos”. La elaboración de mapas como una imagen estática y sesgada, de acuerdo con el conocimiento de académicos, sin la intervención directa de la comunidad, se configura como un ejercicio que oculta las realidades territoriales concretas que suelen ser complejas (Betancurth *et al.*, 2019).

Hoy en día, se está acostumbrado a ver, usar y convivir con mapas diariamente, como producto de una evolución cartográfica que partió en las paredes de cuevas; luego tallados en piedras o minerales; más tarde hechos a mano en cuero o papel, y ahora hechos en códigos binarios para usarlos de forma digital. Al principio los cartógrafos eran personas de élite con capacidades excepcionales; actualmente, los mapas se usan como un idioma universal que guía, ubica, da respuestas a las preguntas ¿cómo?, ¿cuándo?, ¿dónde? y ¿por qué?; enseña cómo era el pasado; muestra el presente, y ayuda a predecir el futuro. Hoy todos son cartógrafos.

La historia de la cartografía muestra que no es posible plasmar el entorno en mapas hechos solo con una visión, con la visión de un solo cartógrafo o científico, porque el espacio es un lugar vivo que se alimenta de lo natural y lo humano. Es por esto que, después de muchos errores y aciertos, hoy se cree en el poder de la cartografía social como un lenguaje de comunicación universal, en el que todos los actores del territorio plasman sus visiones, sueños, experiencias y expectativas con respecto a un evento o situación, logrando un entendimiento integral para una toma de decisiones acertada.

El presente estudio tuvo un doble objetivo que se cumplió a través de la creación de mapas. Por un lado, los expertos transmitieron a los jóvenes los conocimientos que han adquirido a lo largo de las investigaciones realizadas en la isla de San Andrés, acerca de los ecosistemas marino-costeros presentes en ella; y, por el otro, los estudiantes enseñaron a los académicos la visión, experiencias, vivencias y expectativas de su comunidad con respecto a los ecosistemas con los que diariamente conviven y de los que reciben beneficios tangibles e intangibles. Involucrando a la comunidad en la ciencia, mediante proyectos en los que los científicos toman en cuenta la voz y los saberes ancestrales y sociales, se buscó completar el ciclo del conocimiento que suele iniciar con su generación y producción, pasando por su socialización y aplicación, y finalizando con su aprendizaje y reaprendizaje.

A través de este ejercicio de mapeo participativo se integraron conocimientos y saberes de los estudiantes y profesores de posgrado, que desarrollan sus proyectos de investigación en la

Isla, pero que no son parte de ella como habitantes, con los actores del territorio, con el objetivo de fortalecer la producción de conocimiento sobre tres ecosistemas, a partir de sus singularidades sociales y naturales (Bonfá-Neto y Suzuki, 2023).

### **LA CARTOGRAFÍA SOCIAL PARA LA PRODUCCIÓN COLECTIVA DE CONOCIMIENTO**

Quienes trabajan en territorios realizando trabajo de campo, sin importar la disciplina, sabrán que existen contantes quejas de las comunidades frente a los modos intrusivos con que se lleva a cabo la producción de conocimiento, basado, generalmente, en profundas colonialidades del poder/saber/ser. Cuando se adelantan procesos de cartografía social esta se convierte en el instrumento para la producción de un conocimiento basado en diálogos, con apertura a formas de conocer y experimentar los territorios en un espacio de encuentro y mediación de significados en los cuales los sujetos involucrados comparten, aportan, enseñan y aprenden (Montoya Arango *et al.*, 2014).

La cartografía social permite visualizar e integrar conocimientos y perspectivas, priorizando los intereses de la comunidad sobre los individuales y tomando partido para entender y/o afrontar las problemáticas. Al aplicarla en procesos de educación ambiental comunitaria se promueve una nueva relación entre los actores sociales y su entorno, ya que se suma una nueva visión a la previamente adquirida en sus experiencias y vivencias, sobre los procesos ecológicos, territoriales, económicos, sociales y culturales (Gallardo Milán *et al.*, 2020).

Incluir la cartografía social en los procesos sociales que vinculan a la academia con la comunidad que habita territorios que han sido, por décadas, objeto de sus investigaciones, promueve el reconocimiento de los saberes locales, la descripción de problemáticas ambientales específicas y el intercambio de conocimientos entre diversos actores sociales (Bustamante Toro y López Castaño, 2024).

En el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina la comunidad ha sido ampliamente involucrada en procesos sociales, científicos y ambientales, como en el programa 'Ciencia

para la paz', promovido por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (MinCiencias); el programa 'Ondas', a cargo de la Universidad Nacional de Colombia - Sede Caribe (UNal), y las expediciones Seaflower, coordinadas por la Comisión Colombiana del Océano (CCO). El proyecto 'Cartografía social para la protección de los ecosistemas marinos y costeros de la Reserva de la Biosfera Seaflower' busca hacer parte de estas iniciativas de involucramiento de la comunidad, introduciendo a estudiantes adolescentes de colegios públicos de la isla a ser parte de procesos iniciales de Investigación-Acción Participativa (IAP), partiendo de investigación académica y científica tradicional (llevada a cabo por estudiantes y docentes de la UNal, en el marco de sus procesos investigativos) y transformándola en preguntas dentro de un proceso en el que tanto los investigadores como los adolescentes identifican problemáticas y plantean soluciones a ellas (Zapata y Rondán, 2016).

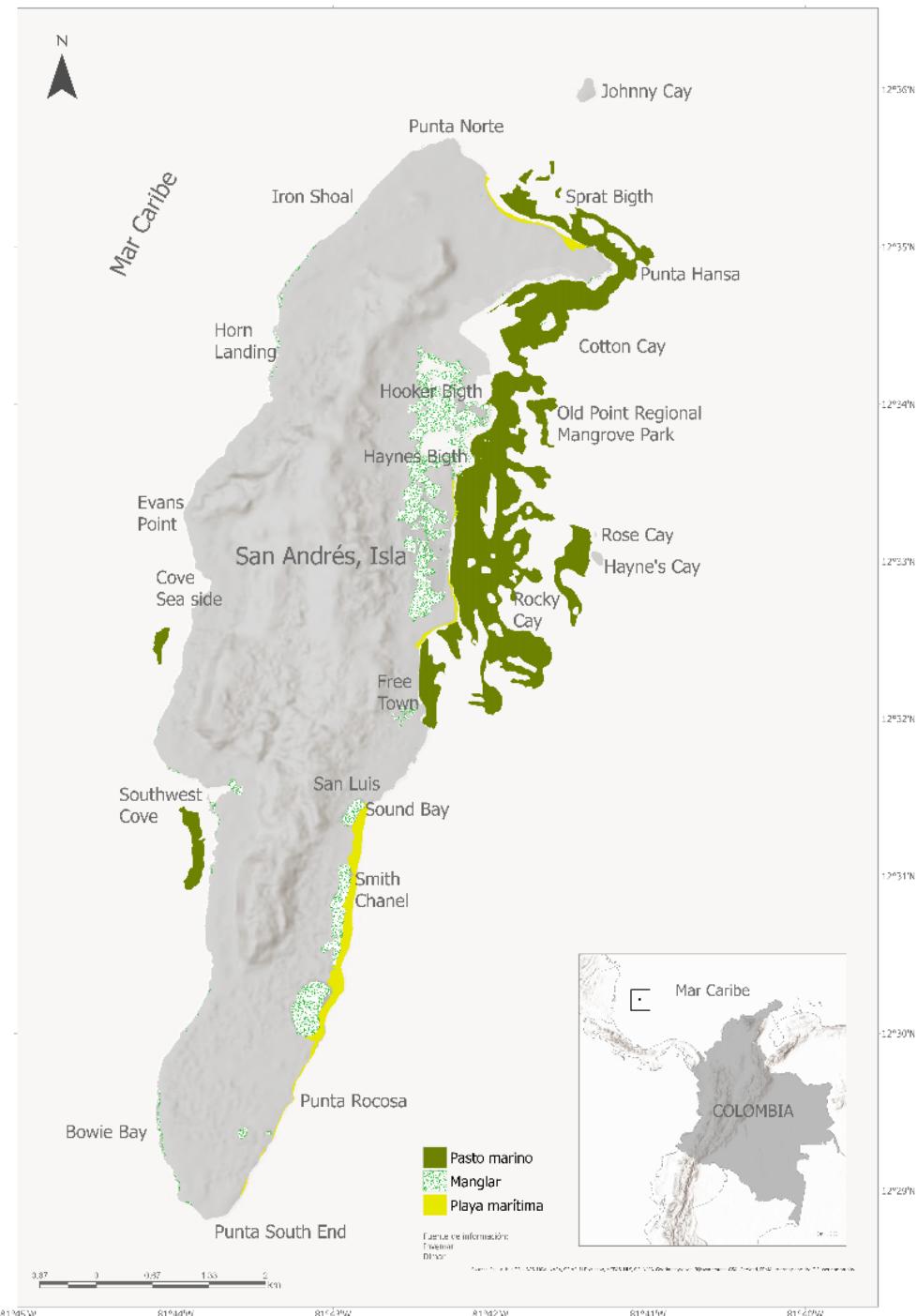
### **ÁREA DE ESTUDIO**

La isla de San Andrés es una isla oceánica, perteneciente al archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, el departamento más grande de Colombia, si se considera su área marina de 350 000 km<sup>2</sup>, sus tres islas principales y habitadas, y siete islas cayo, cuya superficie total es de 52.5 km<sup>2</sup> (Gómez Cubillos *et al.*, 2015). La isla de San Andrés es la de mayor extensión, con un área aproximada de 27 km<sup>2</sup> (Gómez López *et al.*, 2012). La economía en la isla gira alrededor de las actividades relacionadas con el turismo, el comercio y la pesca (Aguilera Díaz, 2010).

Declarada en el año 2000 como Reserva de Biósfera Seaflower por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (Unesco), cuenta con un área aproximada de 2033.97 ha de pastos marinos, 6.37 km de extensión de playas de arena y 209.72 ha de bosques de manglar (Gómez Cubillos *et al.*, 2015). Las playas se ubican en el sector norte y oriental de la isla, con amplitudes entre los 10 m y 15 m, y pendientes del frente de playa, entre 8° y 10°, con rasgos erosivos; los bosques de manglar son de borde y de cuenca, y se concentran en seis áreas principales, la mayoría sobre el costado oriental, donde se encuentran las especies *Rhizophora mangle* (mangle rojo), *Laguncularia*

*racemosa* (mangle blanco), *Conocarpus erectus* (mangle botón) y *Avicennia germinans* (mangle negro); y las praderas de pastos marinos que se encuentran ubicadas predominantemente en el

costado nororiental de la isla, con presencia de las especies *Thalassia testudinum*, *Syringodium filiforme*, *Halodule wrightii* y *Halophila decipiens* (Gómez Cubillos et al., 2015) (Fig. 1).



**Figura 1.** Mapa de la isla de San Andrés, zona de estudio del proyecto de cartografía social.

## METODOLOGÍA

El conocimiento que se logra desde la ciencia y desde la tecnología ha sido muy valioso para comprender y proteger el archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina. Sin embargo, este conocimiento no lo es todo y muchas veces la ciencia se cierra a la comunidad en dos momentos: al construirla y al difundirla.

El conocimiento tradicional es generado por los habitantes del territorio, quienes conviven diariamente con los ecosistemas, recibiendo de forma directa sus servicios ecosistémicos y las amenazas a los que se ven expuestos, constituyéndose como los portadores de la información más relevante, siendo crucial el intercambio de conocimiento con la población adolescente pues son y serán los herederos del territorio.

El proyecto de transferencia de conocimientos entre la academia y la comunidad surge del compromiso intrínseco de un grupo de estudiantes y docentes de biología marina de la UNal, que han investigado durante muchos años los ecosistemas marino-costeros del archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, bajo el precepto de que los problemas de investigación reales y específicos deben involucrar a los actores sociales, considerando sus características espaciales, demográficas, sociales, económicas y culturales (Mundo Hernández, *et al.*, 2022).

Para esto, el proyecto se continúa desarrollando con aportes de las ciencias sociales como la geografía, ciencias naturales como la biología y las tecnologías como los vehículos aéreos no tripulados, constituyendo una propuesta teórico-práctica de una herramienta de investigación, que permite a quienes la vivencian observar, aprender y representar las dinámicas territoriales en las que están insertos, desde la complejidad y la dialéctica que las caracteriza (Suárez, 2017).

La cartografía social la realizó un grupo de jóvenes estudiantes de noveno grado, que conocen y viven la isla de diversas formas de acuerdo con sus orígenes, que incluyen raízales o continental. Las sesiones de cartografía se realizaron al iniciar y finalizar la exploración de los ecosistemas marino-costeros de playa, bosque de manglar y praderas de pastos marinos

con el objetivo conocer sus conocimientos, sus experiencias previas y la valoración que les dan, y, al mismo tiempo, transmitir el conocimiento que los investigadores han adquirido gracias al estudio de la isla.

Durante el mapeo individual, previo a la visita a cada ecosistema, cada participante recibió un papel grande y marcadores para mapear las actividades que realizaban en la isla, en las que tuvieran contacto con estos ecosistemas, incluyendo rutas y lugares que visitan con frecuencia en donde han podido interactuar con ellos. Utilizaron colores y símbolos para ilustrar cómo se sienten en los diferentes espacios que utilizan. Posteriormente, se analizaron los mapas para encontrar lugares comunes y diferentes entre todos, y se expuso y discutió el resultado del ejercicio. Después de la visita a los ecosistemas y aprender/enseñar sobre ellos, los estudiantes realizaron un mapa grupal en el que los adolescentes trabajaron juntos para dibujar un nuevo mapa. Este nuevo mapa plasmó el entorno ideal del ecosistema, que puede o no coincidir con lo que observaron en la visita. Se expusieron los mapas a los demás participantes, reflexionando sobre la situación de cada ecosistema.

El proyecto entonces se dividió en dos secciones: (i) exploración y conocimiento de los ecosistemas y (ii) realización de la cartografía. A continuación, se presentan cada una de ellas.

### **Cartografía social**

Imponer un orden espacial a todo lo que rodea a las personas es uno de los medios más sorprendentes mediante los cuales se reconoce la existencia de diferencias culturales entre una sociedad y otra, así como la forma en la que los miembros de esas sociedades viven y reproducen sus relaciones sociales. La cartografía social es la creación de mapas cuyo propósito es representar aspectos específicos de la sociedad en un momento y lugar determinados (Vaughan, 2018), considerando las visiones de quienes habitan y viven los territorios, para finalmente integrarlos a las visiones de los gobernantes y la academia.

El componente de cartografía social busca generar un mecanismo participativo y de intercambio de conocimientos, memorias y saberes, para empoderar a la comunidad con

herramientas para el manejo ambiental de los ecosistemas estratégicos marino-costeros de la Reserva de Biósfera Seaflower, con miras a su entendimiento, protección y restauración.

Para esto se tomaron los tres ecosistemas estratégicos anteriormente expuestos en tres sectores de la isla, todos ubicados al costado este. Para el trabajo con el manglar se seleccionó el Parque Regional Manglares de Old Point (81°42'30"W – 12°33'42"N), los pastos se desarrollaron el área intermareal del barrio Los

Almendros (81°42'5"W – 12°34'35"N) y para las playas se seleccionó el sector de Sound Bay (81°42'15"W – 12°32'36"N).

La creación de mapas como herramienta de comunicación de saberes se realizó con base en la metodología propuesta en el proyecto '*Because I am a Girl*' (Plan International, 2015), en el que se plantea el mapeo social participativo como una herramienta para comunicar y analizar problemas en una comunidad desde la óptica de los adolescentes.

**Tabla 1.** Metodología aplicada para el desarrollo de la cartografía social.

#### **Ejercicio 1. Mapeo individual previo**

Cada participante recibió una hoja grande y marcadores para completar el ejercicio. Mapearon las actividades que realizaban en la isla en las que tenían contacto con estos ecosistemas, incluyendo rutas y lugares que visitaban con frecuencia, donde podían haber interactuado con ellos. Utilizaron colores y símbolos para ilustrar cómo se sentían en los diferentes espacios que habitualmente usaban. Posteriormente, se analizaron los mapas para identificar lugares comunes y diferencias entre todos, y se expusieron y discutieron los resultados del ejercicio.

##### **A. Discusiones preliminares**

Se utilizaron temas de conversación previamente preparados. El objetivo de las discusiones preliminares fue lograr que los adolescentes pensaran en los ecosistemas que conocen o visitan con frecuencia, y en las razones por las cuales acuden a ellos, con el fin de estar preparados para completar el ejercicio de mapeo:

- ¿Dónde se puede encontrar el ecosistema?
- ¿Qué tan distante está el ecosistema a su casa?
- ¿Cuándo lo han visitado y qué actividades han hecho en él?
- ¿Existe algún lugar, donde esté presente el ecosistema, al que no se les permita ir o ingresar?

##### **B. Ejercicio de mapeo individual**

Se distribuyeron materiales y se explicó el ejercicio de mapeo. Como mínimo los participantes debían marcar tres elementos en sus mapas:

1. Los ecosistemas que visitan normalmente, señalados con diversos símbolos elegidos por los propios participantes. Esto podía incluir el ecosistema en sí, escuelas, tiendas, parques, áreas de juego, vías, mercados, zonas residenciales, entre otros.
2. Las rutas que toman para llegar a dichos lugares.
3. Cómo se sienten en ellos, representado mediante distintos colores o símbolos. Las "experiencias" podían incluir sentirse seguros, inseguros, divertidos, miedosos o cualquier otra sensación que decidieran los participantes. A cada experiencia se le asignó un color o símbolo diferente, y esto se marcó en el mapa para facilitar su interpretación por parte de otras personas.

##### **C. Presentación de mapas**

Después del ejercicio de mapeo individual se expusieron los mapas. Los participantes se explicaron entre sí sus mapas y leyendas. Luego reflexionaron acerca de las diferentes visiones y experiencias en torno a un mismo ecosistema, y discutieron por qué creen que estas diferencias existen.

Finalmente, se reunieron los grupos de adolescentes para iniciar la exploración del ecosistema.

## Ejercicio 2. Mapa grupal del ecosistema ideal

Este mapa se realizó después de la exploración de cada ecosistema.

Después de visitar los ecosistemas y aprender o enseñar sobre ellos, los participantes trabajaron juntos para dibujar un nuevo mapa. Dependiendo de la cantidad de adolescentes se conformaron grupos de trabajo. Este nuevo mapa representó el entorno ideal del ecosistema, que podía o no coincidir con lo observado durante la visita. Los mapas fueron expuestos ante los demás participantes, reflexionando sobre la situación de cada ecosistema.

### A. Mapeo del ecosistema ideal

Los participantes dibujaron su ecosistema ideal en el mapa grupal grande y compartieron sus ideas sobre los diferentes elementos del mapa, poniéndose de acuerdo sobre lo que debía incluirse.

### B. Presentación de mapas

Una vez elaborados los mapas grupales de su ecosistema ideal se analizó por separado a cada grupo en relación con el mapa que habían construido. Se les pidió que explicaran el mapa de su ecosistema ideal, y se discutió por qué eligieron incluir los diferentes elementos en él.

Posteriormente, se les solicitó que reflexionaran sobre sus mapas individuales y discutieran en qué se diferencian de los mapas ideales. También se abordó qué cambios se podrían realizar en los ecosistemas para acercarse a esa visión ideal.

### Ecosistemas marino-costeros

Los ecosistemas trabajados en este estudio fueron bosques de manglar, pastos marinos y playas, en una isla en la que además de existir presiones naturales de origen meteorológico y geofísico, también se enfrentan a amenazas de tipo antrópico que generan deterioro en los recursos naturales, representados tanto por elementos biofísicos como por sus atributos, valores, bienes y servicios (Guevara-Vargas y Mancera-Pineda, 2015). Por ser el turismo la principal actividad económica de la isla, gran parte de la amenaza por actividades antrópicas se origina allí, pero ¿la percepción y valoración que dan los pobladores a los ecosistemas marino-costeros ha contribuido a su protección o se suma también a las presiones que los amenazan?

**a. Explorando los bosques de manglar.** El reconocimiento y la apropiación del territorio desempeñan un papel fundamental en la conservación de los ecosistemas, ya que lo que se valora tiende a cuidarse y protegerse. Sin embargo, en el caso de los bosques de manglar las características únicas que los distinguen pueden generar percepciones negativas entre las comunidades locales, rechazo y dificultan el establecimiento de un vínculo directo, lo que resulta en un desconocimiento generalizado de su importancia.

Para mitigar esta brecha de conocimiento se realizó una aproximación con la comunidad para intercambiar saberes, haciendo una aproximación a los estudiantes con la experiencia denominada 'El Viaje hacia el ecosistema de los bosques de manglar'. Este espacio se desarrolló en el sendero construido para el turismo ecológico en el Parque Natural Regional Manglares de Old Point (Prmop). A lo largo de su recorrido se desarrollaron diferentes actividades relacionadas con la funcionalidad del ecosistema, la caracterización topográfica, las variables intrínsecas del bosque, las especies y los principales tensores y amenazas.

Previo al inicio de la actividad se indicó a los estudiantes realizar un mapa donde plasmaron su ubicación geográfica con respecto a los manglares del Prmop y el conocimiento sobre los ecosistemas de manglar que tenían previo a la actividad.

Partiendo de la información plasmada en los mapas se preguntó a los estudiantes sobre su conocimiento de los bosques, si desde su perspectiva espiritual y cultural tenían alguna conexión con este ecosistema, o si los consideraban importantes en su cotidianidad.

Con este preámbulo se dio inicio al desarrollo de una carrera de observación para reafirmar y contribuir el conocimiento sobre los ecosistemas de manglar. Esta actividad fue realizada por dos equipos de estudiantes. Al iniciar, se dio una charla introductoria sobre el parque, la importancia de los servicios ecosistémicos de los bosques de manglar, las especies que los componen y se compartieron con los estudiantes algunos conceptos claves para el reconocimiento del bosque. Con esta información se desarrollaron cinco momentos a lo largo del recorrido:

- 1. Sopa de letras sobre conceptos:** se pidió a cada equipo que resolviera una sopa de letras con palabras relacionadas a términos intrínsecos del bosque de manglar dentro de las que se encontraban: ecosistema, inundación, manglar, raíz, salado, tropical, halófita, descomponedores, pantanos y neumatóforos.
- 2. Actividad de falso y verdadero:** se planteó un listado de frases sobre la funcionalidad y productividad del manglar para que los estudiantes evaluaran e indicaran, con respecto a su conocimiento, si estaban correctamente escritas o si su fundamento era verdadero o falso.
- 3. Teléfono roto:** para el desarrollo de la actividad de teléfono roto se dio a los estudiantes el nombre de cuatro especies de manglar.
- 4. Identificación de especies:** con la charla de recorrido y la introducción realizada se dio a los estudiantes papeles con el nombre común de las especies y carácter diagnóstico, y se les pidió que con dicha información identificarán las especies.
- 5. Escalera de manglar:** por último, se desarrolló un juego de escalera para identificar las principales amenazas que sortean los bosques de manglar, dentro de las que se identificaron la tala, la deforestación y los eventos naturales como huracanes y ciclones.

En la medida que se desarrollaban las actividades, se les daba una frase para que al terminar elaboraran una oración que reuniera todos los conceptos trabajados. Con esta actividad concluyó el ejercicio.

Al terminar los estudiantes reconocieron las especies presentes en el bosque, las principales características e importancia de los manglares para las islas, de las cuales concluyeron que funcionan como barreras protectoras para los huracanes, áreas de protección y alimento para especies como aves, cangrejos y peces de interés comercial, así como ecosistemas importantes para mitigar el cambio climático.

Es importante resaltar que a partir de esta actividad se contribuyó a un reconocimiento del territorio y al desarrollo de saberes que permitirán generar conciencia en las nuevas generaciones acerca de la importancia de estos ecosistemas y la necesidad de conservarlos y cuidarlos.

- b. Conociendo y valorando los pastos marinos.** Las praderas marinas a menudo se pasan por alto, se confunden con otros organismos como macroalgas, considerándolos como un problema que está distorsionando la vista del mar y en general, afectando el paisaje (Furness y Project Seagrass, 2013). Por este motivo, se pretendió trabajar sobre este ecosistema y llevar el océano a las aulas, compartir conocimientos y conocer sus experiencias para así, inspirar y motivar a una nueva generación de amantes del océano que sean conscientes de su entorno, los efectos de sus acciones y de cómo tomar decisiones positivas y sostenibles.

La idea original partió de realizar actividades en función del trabajo desde el borde de la zona intermareal, en una franja donde se encontrarán praderas en una jornada de trabajo, brindando a los participantes contacto directo con el ecosistema y un espacio cómodo para desarrollar las actividades. Se inició escuchando a los estudiantes sobre su conocimiento acerca de los pastos marinos, los servicios que prestaban y de estos cuáles eran usados por sus familiares o ellos; asimismo, su conocimiento sobre su distribución en la isla y la percepción que tenían acerca del ecosistema. Como base de la enseñanza dirigida, se tomó como guía las actividades propuestas por Furness y Project Seagrass (2013) para el trabajo con adolescentes.

El intercambio de conocimientos inició comprendiendo el significado de los pastos

marinos para los participantes, respondiendo preguntas como: ¿qué son y qué no son?, ¿cuál es su importancia (servicios ecosistémicos), amenazas percibidas y cómo podemos ayudarlos?

El título de la actividad fue 'A la caza de especies', dada la importancia de identificar la fauna presente en los pastos para protegerla, identificarla y conocer sus hábitos, a partir de tarjetas para la identificación de especies con información clave como el nombre común, un dibujo lineal y características relevantes para su identificación e importancia.

La actividad se desarrolló en el malecón del barrio Los Almendros. Se realizó una charla introductoria donde se les mostró las diferencias que existen entre los pastos marinos y las macroalgas allí presentes. Con la participación de los estudiantes, se identificaron los servicios ecosistémicos que brindan y su importancia para la isla. Se dispuso de material de apoyo (fichas de identificación) para reconocer la fauna presente, que fueron ubicadas a lo largo del recorrido.

Para realizar la actividad a cada participante se le entregó una hoja con el nombre de una de las especies que se encontraba en las fichas. Se conformaron dos grupos, cada grupo se ubicó en un extremo del malecón (barrio Los Almendros y frente a la Gobernación) y se desplazaron hacia el lado opuesto, leyendo la descripción de cada ficha y teniendo particular atención en la ficha que coincidía con la especie recibida inicialmente.

Al finalizar el recorrido, usando las tarjetas recibidas a cada participante, el instructor conformaba dos círculos (uno dentro del otro) y pedía que los participantes se ubicaran frente a frente. Una vez en frente de su compañero debían decir el nombre de la especie que les correspondió y explicar su descripción a su respectivo compañero, de tal manera que todos los participantes reconocerían las especies clave del ecosistema a partir de lo recordado en las fichas y reforzado por lo comentado con sus compañeros.

Con la información recogida se procedió a elaborar los mapas cartográficos correspondientes a las praderas de pastos

marinos en la isla, con el fin de compartir la experiencia y la visión que se tiene sobre ellas.

**c. Playas marítimas más allá de la diversión.**

Comúnmente, las playas son consideradas lugares de recreación, lugares para jugar bajo el sol, el mar y la arena, ignorando que son más que eso. Las playas son ecosistemas que sustentan diversas comunidades biológicas y comprenden una infraestructura ecológica esencial que proporciona numerosos servicios ecosistémicos a las personas además de la recreación, como aprovisionamiento biótico y abiótico, regulación, mantenimiento y cultura (Harris y Defeo, 2022).

Lamentablemente, en la isla de San Andrés el desarrollo urbano y turístico ha incrementado la demanda de la zona costera, generando un cambio en la dinámica, que, sumado con las causas naturales, ha causado procesos erosivos (Gómez López *et al.*, 2012) y, por lo tanto, pérdida de playas. Adicionalmente, las barreras coralinas y sistemas arrecifales de corales se han deteriorado, permitiendo que la energía del oleaje impacte con mayor fuerza las playas, aumentando su pérdida (Prato *et al.*, 2020).

Las actividades de comparación de sitios se diseñaron para resaltar las diferencias entre un paisaje marino de arena desnuda que presenta afectación por erosión y un entorno en condiciones aceptables de estabilidad del suelo. En este ecosistema se buscó entender la relación de los jóvenes con sus playas y despertar en ellos conciencia sobre la importancia de las playas para el equilibrio biológico, social, cultural y económico de la isla.

Al inicio se pidió a los estudiantes plasmar en mapas los sentimientos y emociones que en ellos despiertan su relación con las playas. Luego se les explicó la importancia de este ecosistema para la isla, para las especies y para la protección de sus hogares. Finalmente, se realizaron actividades en busca del conocimiento de las características técnicas de este ecosistema. Se realizó la medición del ancho de dos playas, una estable y otra con procesos erosivos; se realizó el cálculo del perfil de las playas, y, para finalizar, se realizó la búsqueda y recolección de plásticos.

**d. Sistemas de aeronaves no tripuladas como herramienta de conservación.** El uso de drones como herramienta técnica para realizar cartografía de forma rápida, eficiente y económica, puede promover la participación comunitaria y la educación ambiental. La visualización de imágenes aéreas y mapas cartográficos puede servir como una poderosa herramienta de sensibilización, permitiendo a las comunidades locales comprender mejor la importancia de los ecosistemas marino-costeros y su papel en la protección del medio ambiente.

En el marco del proyecto se llevó a cabo un taller de drones destinado a fortalecer el conocimiento y las habilidades de la comunidad local en el uso de tecnología innovadora para la conservación ambiental. Este taller, que promovió el intercambio de conocimientos entre la comunidad y la academia, proporcionó a los participantes una sólida introducción al mundo de los sistemas de aeronaves no tripuladas (UAS, por sus siglas en inglés).

El taller abarcó una amplia gama de temas relacionados con los drones, comenzando con una comprensión básica de qué son y su evolución a lo largo de la historia. Los participantes aprendieron sobre la clasificación de los drones según su estructura y su uso, lo que les permitió entender la diversidad de estas tecnologías y sus aplicaciones potenciales en el ámbito ambiental.

Una parte fundamental del taller fue la exploración de cómo los drones pueden ser utilizados como herramientas para el monitoreo y la conservación de los ecosistemas marino-costeros. Los participantes adquirieron conocimientos sobre fotogrametría a partir de imágenes capturadas por drones, lo que les permitió comprender cómo estas imágenes pueden ser procesadas para generar información detallada sobre el paisaje y los cambios ambientales. Además, se abordaron aspectos legales y regulatorios relacionados con el vuelo de drones en Colombia, incluyendo las prohibiciones, las condiciones climáticas y la normativa vigente. Esta información fue crucial para garantizar que los participantes comprendieran los requisitos y las responsabilidades asociadas con el uso

seguro y legal de los drones en actividades de monitoreo ambiental.

Durante el taller se presentaron algunos programas de planificación de vuelos y procesamiento de imágenes, brindando a los participantes la oportunidad de familiarizarse con herramientas prácticas para la operación eficiente de drones y el análisis de datos geoespaciales.

Para poner en práctica los conocimientos adquiridos se llevó a cabo un ejercicio práctico en las instalaciones del Jardín Botánico de San Andrés. Los participantes planificaron y ejecutaron un vuelo automatizado de un dron, utilizando las técnicas aprendidas durante el taller. Posteriormente, procesaron las imágenes capturadas para generar un mapa en tres dimensiones que proporcionó una representación visual y detallada del entorno natural circundante.

Al finalizar cada jornada los estudiantes organizadores y líderes de cada componente analizaron los resultados, tanto de las conversaciones y discusiones con los estudiantes participantes, como de los mapas realizados individual y colectivamente.

Por tratarse de información no-numérica, este análisis de datos se realizó de forma cualitativa para cada ecosistema, respondiendo las preguntas previamente diseñadas en el formato de la Tabla 2. Al finalizar, se analizaron en conjunto los tres análisis independientes (uno por cada ecosistema), para definir el resultado global del conocimiento y percepciones de los adolescentes habitantes de la isla, frente a sus ecosistemas marino costeros.

Este análisis concluyó con un proceso de categorización semicuantitativa de datos cualitativos, asignando categorías de "alto", "medio", "bajo" al nivel de conocimiento, percepciones y experiencias identificados a través de los mapas y charlas grupales.

**Tabla 2.** Formato de preguntas de la Universidad Nacional de Colombia.



## Cartografía social

Innovación social colectiva en la protección y recuperación de los ecosistemas estratégicos marino costeros de la reserva de biosfera Seaflower a través de intercambio de conocimientos comunidad-academia y cartografía social

### Detalles del grupo

Ecosistema	
Fecha de la actividad	
Número de participantes	
Rango de edad de los participantes	
Colegio al que pertenecen	
Duración de la actividad	
Facilitadores	
Nombre de los participantes	

De acuerdo con las discusiones preliminares, describa las respuestas dadas por los participantes con respecto a su conocimiento previo sobre el ecosistema.

De acuerdo con las discusiones preliminares, describa las respuestas dadas por los participantes con respecto a su relación cotidiana con el ecosistema.

De acuerdo con los mapas individuales, ¿cómo influye el ecosistema en la vida y actividades de los participantes?

De acuerdo con los mapas grupales, ¿qué tan distante está el estado actual del ecosistema con el que ellos consideran ideal?

Describa el ecosistema ideal de los participantes, anotando los factores clave que consideren que deberían ser mejorados. ¿Qué ideas tenían y cómo las representaron? Sea lo más específico posible.

Describa las reflexiones de los participantes sobre cómo se comparan sus mapas individuales preliminares con los del ecosistema ideal. ¿En qué se diferenciaban estos mapas de los mapas ideales? ¿Qué cambios sugirieron que podrían ser hechos en la gestión de los ecosistemas para acercarnos a la visión ideal?

Describa lo que ustedes, como parte de la academia, aprendieron sobre la relación comunidad-ecosistema con el desarrollo de este proyecto de cartografía social.

Describa los aportes puntuales que ambas partes (comunidad y academia) dieron al conocimiento del ecosistema en el desarrollo del proyecto de cartografía social.

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

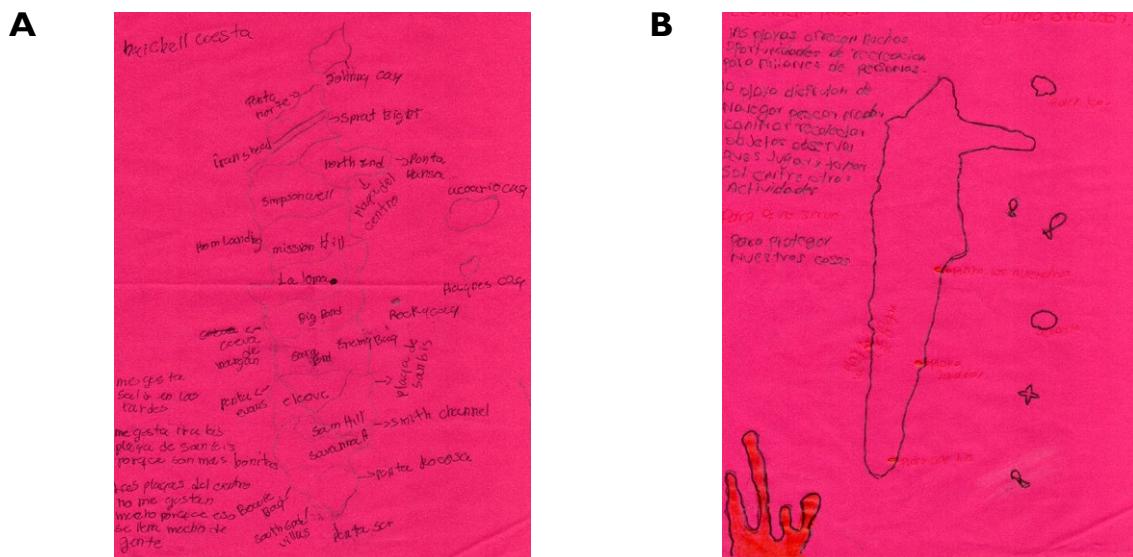
La cartografía social es una herramienta de aprendizaje de doble vía. Al realizarla se deja de lado la idea, en ocasiones muy arraigada, de que únicamente a través de la ciencia se accede a la verdad. Con la realización de este proyecto no solo se llevaron a la práctica las fases finales del ciclo de vida del conocimiento en las que este se transfiere y se aplica, sino que también se le dio un giro al conocimiento al incorporar la opinión, las expectativas, las sensaciones y las vivencias de una parte de la población que, generalmente, es vista como objetivo de enseñanza y no como fuente de saberes.

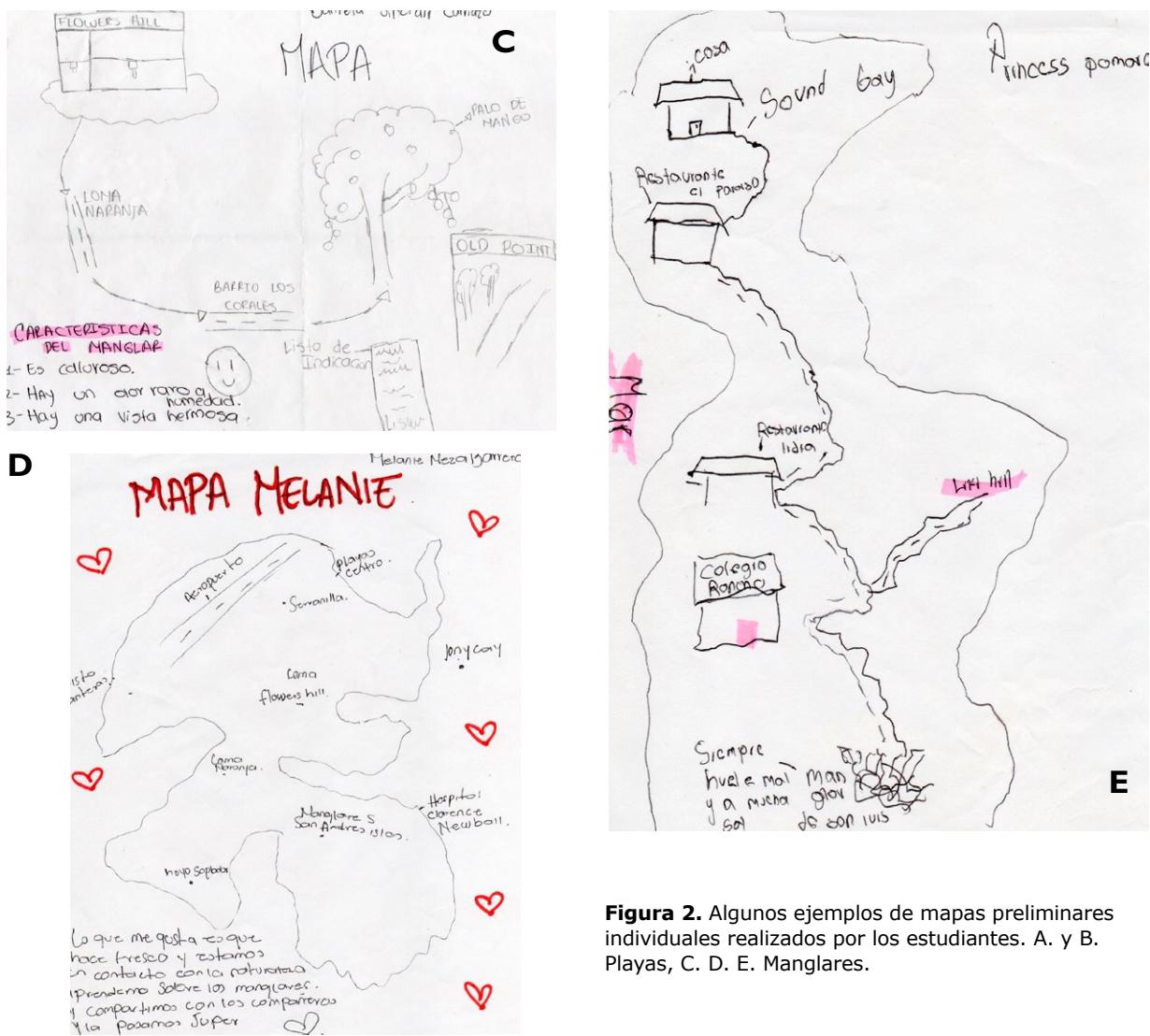
A través de los mapas elaborados por los estudiantes (Fig. 2), junto con los diálogos que se generaron alrededor de ellos, fue posible para los facilitadores comprender cómo se relacionan los pobladores jóvenes de la isla con los ecosistemas que la academia ha investigado desde un enfoque científico. Los mapas que se presentan a continuación son una muestra del total realizado en el desarrollo del proyecto; por lo tanto, no se analizará su contenido ni su interpretación de manera individual. Los resultados del análisis conjunto de la totalidad de los mapas se presentan en la Tabla 3.

Al finalizar cada jornada y a partir de lo plasmado en los mapas, de las respuestas dadas por los estudiantes a diversas preguntas que se les realizaron, y de las actitudes de los

estudiantes frente a las actividades realizadas en las jornadas, fue posible comprender cómo viven los adolescentes de la isla estos ecosistemas, y a partir de este diagnóstico es posible generar estrategias futuras en las que sus visiones, intereses, conocimientos, e incluso la carencia de estos, sean considerados en nuevos proyectos científicos que se desarrollen alrededor de los ecosistemas estratégicos. El diagnóstico obtenido incluyó las siguientes consideraciones: conocimiento previo sobre el ecosistema, relación cotidiana con el ecosistema, influencia del ecosistema en la vida y actividades de los participantes, distancia entre el estado actual del ecosistema con el que ellos consideran ideal, ecosistema ideal de los participantes, comparación de sus mapas individuales preliminares con los del ecosistema ideal, aprendizajes de los facilitadores sobre la relación comunidad-ecosistema con el desarrollo de este proyecto de cartografía social, aportes puntuales que ambas partes (comunidad y academia) dieron al conocimiento del ecosistema durante el desarrollo del proyecto de cartografía social.

En la Tabla 3 se presenta el diagnóstico que se realizó a partir de las actividades y la cartografía individual preliminar. Aunque los estudiantes conocían la existencia de los ecosistemas en la isla, no eran conscientes de sus servicios ecosistémicos, su importancia y su valor. El ecosistema con el que más interacción y al que más aprecio manifestaron fue la playa, por la posibilidad de recreación que brinda.





**Figura 2.** Algunos ejemplos de mapas preliminares individuales realizados por los estudiantes. A. y B. Playas, C. D. E. Manglares.

**Tabla 3.** Diagnóstico previo sobre el conocimiento y percepción sobre los ecosistemas de la isla con base en la interacción y los mapas realizados.

Ecosistema	Nivel de conocimiento	Percepción
Manglar	Bajo	<p>El conocimiento de los estudiantes era mínimo. No conocían las especies, la definición de ecosistema, los servicios ecosistémicos ni la ubicación de los ecosistemas de manglar en la isla; sin embargo, reconocían su existencia como parte del paisaje.</p> <p>Algunos estudiantes sabían que los manglares se encuentran en zonas costeras del país.</p> <p>La mayoría no tenía contacto directo con el manglar en sus actividades diarias.</p> <p>A pesar de que existe una mínima o nula interacción con el ecosistema, podían plasmar en mapas la ubicación de sus casas y colegio con respecto al bosque más cercano.</p>

Ecosistema	Nivel de conocimiento	Percepción
<b>Playa marina</b>	Medio	<p>Los estudiantes tenían conocimientos sobre las playas; sin embargo, solo conocían su servicio ecosistémico de turismo y recreación.</p> <p>Tenían una idea errónea de la interacción playas-construcciones, porque no las percibían como una barrera que previene la intrusión marina, sino como una amenaza por la arena y salinidad.</p> <p>Interactuaban diariamente con las playas cercanas a sus hogares y eran vitales para sus actividades de esparcimiento. Conocían muy bien la ubicación de las playas en toda la isla y sus nombres.</p> <p>La influencia de las playas en ellos es positiva. Las perciben como un lugar de paz y relajación, incluso un estudiante manifestó que la playa es un refugio para él cuando tiene problemas con su familia.</p> <p>No percibían las problemáticas de erosión y contaminación por plástico. Sin embargo, en la actividad de recolección de basura en un minuto, dimensionaron la gran problemática de plásticos.</p>
<b>Pastos marinos</b>	Medio	<p>Los estudiantes consideraban los pastos marinos como un ecosistema incómodo, no interactuaban con él por temor a los erizos y medusas.</p> <p>Este ecosistema no influye en su cotidianidad, no interactúan con él al punto de evitarlos, buscando espacios en donde no se encuentren cuando van a nadar. Manifestaron que prefieren playas libres de pastos.</p> <p>Creían que se distribuyen alrededor de toda la isla y sabían que son hábitat de diferentes especies de interés comercial. Lo distinguían de otros ecosistemas como playas y manglares, pero lo confundían con macroalgas.</p> <p>Consideran que el ecosistema se encuentra en buen estado y no necesita mayor atención. El conocimiento e interés por este ecosistema fue limitado, lo que puede estar relacionado con su afectación a la conservación y protección por parte de la población.</p>

## CONCLUSIONES

La respuesta de los estudiantes y los maestros que participaron en este estudio fue muy positiva, lo que confirma una de las hipótesis planteadas al surgir la idea de desarrollar este proyecto: cuando se le pide a un adolescente o a un adulto que hagan un mapa, lo harán con gusto, considerando que la creación y el uso de mapas, ya sean mentales o manuales, constituye una parte esencial de la condición humana, utilizada desde los orígenes para comunicar ideas, deseos y conocimientos.

Sin embargo, los resultados de los análisis implementados no fueron alentadores. Las ideas y conocimientos plasmados en los mapas y compartidos en las conversaciones evidenciaron grandes vacíos de conocimientos sobre los

ecosistemas marino-costeros de pastos marinos, playas y manglares, así como el poco interés en los servicios ecosistémicos que les prestan a ellos, a sus familias y a su comunidad.

Los estudiantes sabían en dónde se encuentran las playas y manglares de la isla, eran capaces de ubicarlos espacialmente en el mapa y conocían la toponomía de la mayoría de ellos. En cuanto a los manglares tenían conocimientos sobre su presencia en las zonas costeras continentales del país y comprendían su importancia para la sobrevivencia de muchas especies; sin embargo, manifestaban tener poco contacto con ellos. En contraste, las playas fueron altamente valoradas, pero únicamente por sus servicios recreativos, viendo en ellas lugares de relajación, diversión y escape de problemas familiares. Sin embargo, de acuerdo con sus respuestas, existía un absoluto

desconocimiento sobre su origen, funcionamiento, importancia y problemáticas. Finalmente, como era de esperarse, el conocimiento más bajo lo presentaron los pastos marinos, a tal punto que manifestaron considerarlos incómodos y en cierta medida negativos.

Se logró identificar cuál es el ecosistema más conocido por los adolescentes, cuál es el menos conocido, cuál consideran es el más importante desde sus propias visiones, cuál es el que menos relevante, cuál fue el que generó más impacto al transmitirles los conocimientos y cuál les despertó menor interés. Más allá de estos hallazgos, se entendió hacia dónde debe enfocarse el esfuerzo científico, que muchas veces queda atrapado en las esferas académicas y, con gran esfuerzo, llega a tomadores de decisiones y gobernantes. En raras ocasiones, dicho esfuerzo involucra de forma real y participativa a las comunidades jóvenes, quienes algún día deberán hacerse cargo de la protección y recuperación de sus ecosistemas vitales.

Involucrar a los jóvenes en la generación de la ciencia y el conocimiento es una estrategia fundamental para garantizar la continuidad de iniciativas de monitoreo, protección y restauración ecológica; por lo que se considera estratégico para la isla continuar realizando proyectos de este tipo, que despierten el interés de los jóvenes y que, además, brinden a la academia visiones holísticas que sirvan de base para generar nuevas y mejores iniciativas enfocadas en la comunidad.

Trabajar de la mano con adolescentes habitantes de la isla de San Andrés fue una experiencia muy gratificante y enriquecedora para la academia. Estudiantes de nivel posgrado de la UNal, que desde diferentes enfoques y disciplinas han investigado los ecosistemas marino-costeros estratégicos de playas, pastos marinos y bosques de manglar y sus servicios ecosistémicos, descubrieron una nueva visión de algo que se creía comprender.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos a los estudiantes (y a sus padres), docentes y directivos de los colegios Flowers Hill y Luis Amigó por apoyar esta iniciativa y participar, activamente, en la transferencia de conocimientos entre la comunidad y la academia.

## **FUENTE FINANCIADORA**

Proyecto 317010010-Extensión Solidaria 2022 'Innovación social colectiva en la protección y recuperación de los ecosistemas estratégicos marino-costeros de la Reserva de Biósfera Seaflower, a través de intercambio de conocimientos comunidad-academia' Universidad Nacional de Colombia.

## **CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES**

Aguilera Díaz, M. (2010). *Documentos de trabajo sobre economía regional. Geografía económica del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina*. Cartagena de Indias: Banco de la República. <https://doi.org/10.32468/dtsru.133>

Bird, E. (2008). *Coastal Geomorphology. An introduction*. West Sussex: Wiley.

Bonfá-Neto, D. y Suzuki, J. C. (2023). Cartografía social participativa como metodología de investigación territorial: un estudio de caso en el Pacífico afrocolombiano. *Perspectiva Geográfica*, 1-22. <https://doi.org/10.19053/01233769.14529>

Bustamante Toro, C. A. y López Castaño, C. E. (2024). La cartografía social en clave de educación ambiental para comprender la escuela-territorio. *Territorios* (50), 1-17. <https://doi.org/10.12804/revistas.urosario.edu.co/territorios/a.11660>

Davidson-Arnott, R. (2010). *Introduction to Coastal Processes and Geomorphology*. New York: CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511841507>

Gallardo Milán, O. A., Martínez Gallardo, L. y Reyes Bermúdez, Á. (2020). Educación ambiental y cartografía social: experiencias en una comunidad de Holguín, Cuba. *Sociedad & Natureza*. <https://doi.org/10.14393/SN-v32-2020-49908>

Gómez Cubillos, C., Licero, L., Perdomo, L., Rodríguez, A., Romero, D., Ballesteros-Contreras, D.,... Ricaurte, C. (2015). *Portafolio "Áreas de arrecifes de coral, pastos marinos, playas de arena y manglares con potencial de restauración en Colombia"*. Santa Marta: Serie

- de Publicaciones Generales de Invemar.
- Gómez López, D., Segura-Quintero, C., Sierra-Corra, P. y Garay-Tinoco, J. (2012). *Atlas de la Reserva de Biósfera Seaflower. Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina*. Santa Marta: Serie de Publicaciones Especiales de Invemar # 28 .
- González-Torres, X. B., Méndez Prada, M. C. y Cruz Cabrera, B. C. (2024). Aplicación de la cartografía social. El caso de los socios cooperativos del sector pesquero del estado de Oaxaca. *Entramado*, 1-20. <https://doi.org/10.18041/1900-3803/entramado.2.11305>
- Guevara-Vargas, L. A. y Mancera-Pineda, J. E. (2015). Evaluación de amenazas antropogénicas en ecosistémicas en ecosistémicas de playa en San Andrés, una isla pequeña del Caribe suroccidental. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 33-54. <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2015.44.1.19>
- Harris, L. & Defeo, O. (2022). Sandy shore ecosystem services, ecological infrastructure, and bundles: New insights and perspectives. *Ecosystem Services*. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2022.101477>
- Montoya Arango, V., García Sánchez, A. y Ospina Mesa, C. (2014). Andar dibujando y dibujar andando: cartografía social y producción colectiva de conocimientos. *Nómadas*, 191-205.
- Mundo Hernández, J. J., Flores Lucero, M. D. y Guevara Romero, M. L. (2022). *Territorios y ciudades sostenibles. Propuestas a partir de la vinculación entre la academia y la comunidad*. Puebla, México: Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- National Geographic. (04 de 06 de 2023). *Mapas trenzados: así ocultaban las mujeres esclavas sus rutas de escape*. Obtenido de <https://www.ngenespanol.com/historia/trenzas-africanas-escape-esclavos/>
- Plan International. (2015). *Because I am a Girl. The state of the World's girls 2015. The unfinished business of girls' rights*. United Kingdom: Plan International.
- Romera-Castillo, C. (2022). *AntropOcéano. Cuidar los mares para salvar la vida*. Barcelona: Planeta.
- Zapata, F. y Rondán, V. (2016). *La Investigación-Acción Participativa. Guía conceptual y metodológica del Instituto de Montaña*. Lima, Perú: Instituto de Montaña.

# Boletín Científico CIOH

CARIBE Y PACÍFICO

Cartagena de Indias, D.T. y C., Colombia

Vol. 44 N.º 2. Diciembre 2025

<b>Impactos de la Oscilación del Sur de El Niño en la variabilidad hidroclimática de una cuenca andina tropical a partir de conjuntos de datos finos espacializados</b> José A. Posada-Marín, Sharon A. Sánchez-Muñoz, Melisa K. Toro-Martínez	<b>3 - 23</b>
<b>Alternativas de solución para la mitigación del fenómeno erosivo en Playa Salguero, Caribe colombiano</b> Pablo Andrés Avendaño Castro, José Andrés Díaz Ruiz, Fernando Afanador Franco	<b>25 - 41</b>
<b>Impacto de estructuras hidráulicas (tajamares) en la dinámica costera. Caso de estudio: desembocadura del río Magdalena, Colombia</b> Ricardo José Molares Babra	<b>43 - 60</b>
<b>Manglares, playas y pastos marinos de la isla de San Andrés. Mapas comunitarios para comprender su valor</b> Johanna Paola Echeverry Hernández, Angélica Paola Quintero Alvarado, Alejandra Robles Sánchez, John Henry Dorado Roncancio, Clara Marcela López, Luis Felipe Santos Becerra, Julián Prato-Valderrama, Jairo Humberto Medina Calderón	<b>61 - 76</b>

**Ministerio de Defensa Nacional Dirección General Marítima**  
Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe-CIOH  
El Bosque, Isla Manzanillo, Escuela Naval “Almirante Padilla”  
Cartagena de Indias, D.T. y C.  
Teléfono: (605) 669 44 65



Centro de Investigaciones Oceanográficas  
e Hidrográficas del Caribe

Centro de Investigaciones Oceanográficas  
e Hidrográficas del Pacífico

[www.dimar.mil.co](http://www.dimar.mil.co)

<http://ojs.dimar.mil.co/index.php/CIOH/index>