

Boletín Científico CIOH

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



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
Vol. 42 Núm. 1. Páginas 3 a 59. Junio 2023

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

No. 42 Núm. 1
Junio de 2023

**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)

No. 42 (1), páginas 3-59, junio de 2023

DIRECTOR GENERAL MARÍTIMO

Vicealmirante John Fabio Giraldo Gallo

DIRECTOR BOLETÍN CIENTÍFICO CIOH

Capitán de Navío José Andrés Díaz Ruiz

Director CIOH

EDITORA JEFE

Martha Lucero Bastidas Salamanca, M.Sc.
Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH)

COORDINADORA EDITORIAL

Angélica María Castrillón-Gálvez
Máster en Edición de Publicaciones Dimar

COMITÉ EDITORIAL-MIEMBROS EXTERNOS

Roberto Enrique Lastra Mier, Ph.D.
Grupo de investigación en Derecho y Territorio. Grupo de investigación INVIUS

Facultad de Ciencias Jurídicas. Universidad del Atlántico

Luis Jesús Otero Díaz, Ph.D.

Grupo de investigación en Geociencias GEO4

Universidad del Norte

Yanis Cruz Quintana, Ph. D.

Grupo de Investigación en Sanidad Acuicola, 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 HIDROMAR-IREHISA

Facultad de Ingeniería. Universidad del Valle

Francisco Javier Briceño Zuluaga, Ph.D.

Facultad de Ciencias Básicas y Aplicadas

Universidad Militar Nueva Granada

Mónica María Zambrano Ortiz, Ph.D.

Corporación Académica Ambiental

Universidad de Antioquia

José Manuel Gutiérrez Salcedo, Ph.D.

Programa de Biodiversidad y Ecosistemas Marinos
Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras

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)

COMITÉ EDITORIAL-MIEMBROS INTERNOS

Capitán de Navío José Andrés Díaz Ruiz

Director CIOH

CUBIERTA

Actividades de levantamientos en litorales.

COMITÉ CIENTÍFICO

Prof. (emérito) Erik Desmond Barton, Oceanografía,
Instituto Oceanográfico Vigo, España,

Prof. (emérito) Georges Vernet, Geología Marina,
Universidad de Bourdeaux

Prof. (emérito) Yves Francois Thomas, Sensores Remotos,
Universidad de París 1, Sorbone

Prof. Alejandro Orfila, Ph.D., Oceanografía,
Universidad de Islas Baleares, España

Prof. Juan Camilo Restrepo López, Ph.D.,
Ciencias del Mar, Universidad del Norte, Barranquilla

Prof. Vladimir Giovanni Toro Valencia, Ph. D.,
Oceanografía Física, Universidad de Antioquia, Turbo

Prof. Rafael Ricardo Torres Parra, Ph.D., Nivel del Mar,
Universidad del Norte, Barranquilla

Prof. Julián Augusto Reyna Moreno, M.Sc., Oceanografía,
Pacific University, Guayaquil, Ecuador

Álvaro Duarte Méndez, M.Sc.,

Manejo de Zonas Costeras, consultor independiente

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

El Boletín Científico CIOH es una revista científica seriada, especializada en las diferentes áreas de investigación de las ciencias del mar (oceanografía, hidrografía, manejo integrado de zonas costeras, protección del medio marino, etc.), 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 Centro Colombiano de Datos Oceanográficos (Cecoldo) (<https://cecoldo.dimar.mil.co/web/>). 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

EDITORIAL

Ciencia y soberanía: contribuciones científicas desde el Boletín Científico del CIOH a la defensa de Colombia ante la Corte Internacional de Justicia de La Haya

Science and Sovereignty: Scientific contributions from the CIOH Scientific Bulletin to the defense of Colombia before the International Court of Justice in The Hague

DOI: <https://doi.org/10.26640/22159045.2023.622>

José Andrés Díaz Ruiz¹

CITAR COMO:

Díaz Ruiz, J. A. (2023). Ciencia y soberanía: contribuciones científicas desde el Boletín Científico del CIOH a la defensa de Colombia ante la Corte Internacional de Justicia de La Haya. *Bol. Cient. CIOH*, 42(1): 3-6. ISSN en línea 2215-9045. DOI: <https://doi.org/10.26640/22159045.2023.622>

El jueves 13 de julio de 2023, la Corte Internacional de Justicia (CIJ) en La Haya hizo pública su sentencia negando las pretensiones que había formulado Nicaragua que solicitaba se le reconocieran derechos de plataforma continental extendida más allá de las 200 millas náuticas de su costa, todas ellas dentro de la zona económica exclusiva (ZEE) y la plataforma continental generadas por el archipiélago de San Andrés y la costa continental de Colombia.

La nación entera, desde el Gobierno, sus instituciones y la opinión pública en general, ha reconocido la enorme importancia que significó el aporte de los oceanógrafos e hidrógrafos de la Armada Nacional de Colombia (ARC) en la preparación y elaboración de los documentos científicos, técnicos, cartas náuticas oficiales, mapas submarinos de alta resolución, etc., utilizados en la defensa de Colombia ante las demandas y pretensiones de Nicaragua.

En palabras de la jueza china de la CIJ en un aparte de su dictamen:

"[...] 54. Refutando el reclamo de Nicaragua, los informes periciales de Colombia presentan los análisis de la evidencia científica recopilada de fuentes públicas **y de la Armada de Colombia** sobre la prolongación natural del lecho y subsuelo del mar desde el territorio

terrestre de Nicaragua hacia y debajo del mar Caribe. **La conclusión clave de los informes que es relevante para el presente caso es que el borde de la prolongación natural del territorio terrestre nicaragüense en el mar Caribe no es el escarpe Hess (el límite sur de la elevación Nicaragüense), según lo asumido por el Solicitante (Nicaragua), sino que es el lineamiento del escarpe Pedro Bank-depresión Providencia**, que separa el borde sur de la elevación Nicaragüense, propiamente dicha, de la elevación Nicaragüense Inferior. Según los expertos de Colombia, el alcance del margen continental de Nicaragua es mucho más pequeño de lo que sugieren los expertos de Nicaragua **y, en consecuencia, la masa terrestre de Nicaragua no se extiende dentro de las 200 millas náuticas desde la costa continental de Colombia.**"

Esta argumentación es el resultado de la excelente labor desarrollada por los científicos e investigadores de la Armada de Colombia (ARC) y que la Jueza llama "expertos de Colombia", quienes han realizado estas investigaciones desde el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH), de la Dirección General Marítima (Dimar), y parte de ellas han sido publicadas en el Boletín Científico CIOH desde hace varias décadas.

¹ Orcid: 0009-0006-0681-0268. Director Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe. Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla", isla de Manzanillo, barrio El Bosque, Colombia. Correo electrónico: jefcioh@dimar.mil.co

Fiel al alcance de esta revista, el Bol. Cient. CIOH, a través del acceso abierto a sus contenidos -bilingües- ha permitido visibilizar el trabajo de los investigadores del CIOH, la academia y otras instituciones, en temas relacionados con **oceanografía física** (Dagua, Torres y Monroy, 2018; Monroy y Zambrano, 2017; Rangel *et al.* 2015; Andrade y Barton, 2013; Torres y Lonin, 2007; Molaes *et al.* 2004; Molaes, 2004; Andrade, Giraldo y Lonin, 1996; Garay *et al.* 1988; González, 1987); **oceanografía química y contaminación** (Garay y Castro, 1993; Garay y Gutiérrez, 1984); **hidrografía y geomorfología** (Andrade, 2005; Tabares, Soltau y Díaz, 1996; Soltau, Díaz y Molina, 1993; Elhuyar, 1988), **riesgos costeros** (Andrade, 2022; Rey *et al.* 2019; Echeverry y Marriaga, 2013; Andrade y Pinzón, 2011; Díaz y Andrade, 2011; Plazas, Ortiz y Lizcano, 2011; Collazos, Ospina y Muñoz, 2007); **biología marina** (De La Hoz y Betancur, 2019; Lonin, Prada y Castro, 2010; Prada *et al.* 2009; Taylor *et al.* 2007; Téllez, Márquez y Castillo, 1988); **planificación espacial** (Rueda, 2017; Molina *et al.* 2003), **dinámica costera** (Lonin *et al.* 2022; Fajardo y Lonin, 2021; Zambrano y Andrade, 2011); **energías renovables** por gradiente térmico (Torres y Andrade, 2006), y, recientemente, **patrimonio cultural sumergido** (Moreno y Báez, 2021). Artículos publicados

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrade, C. A. (2005). Surveying a natural deep sediment trap in the south-western Caribbean. *Bol. Cient. CIOH*, 23: 129-133. <https://doi.org/10.26640/22159045.143>
- Andrade, C. A. (2022). Colombian Caribbean warming and the intensity of hurricanes between June and December 2020. *Bol. Cient. CIOH*, 41(2): 55-65. <https://doi.org/10.26640/22159045.2022.602>
- Andrade, C. A., Giraldo, L. Lonin, S. (1996). Nota sobre la circulación de las aguas en el bajo Alicia y el sector de San Andrés Islas. *Bol. Cient. CIOH*, 17: 27-36. <https://doi.org/10.26640/22159045.82>

en este producto de nuevo conocimiento, que aportaron a la base sobre la cual la posición colombiana fue creada y defendida. Es un humilde y valioso aporte hecho desde nuestro Boletín Científico CIOH a esa gran satisfacción que hoy llena de júbilo al país entero.

Como Director del CIOH hago un reconocimiento público y felicito al personal científico del Centro de Investigaciones y a toda su red de colaboradores, que de una u otra forma contribuyeron desde este Bol. Cient. CIOH con sus artículos que sumaron y conformaron la base sobre la cual la ARC tiene el mayor valor para la patria, para la nación que defendió exitosamente con su conocimiento el territorio marítimo de Colombia de los intereses externos que lo amenazaron.

¡La razón de ser de una armada es ganar la guerra en el mar! Hoy se puede afirmar que la Armada de Colombia, en su bicentenario, ganó una guerra en el Caribe utilizando como arma la ciencia, el rigor técnico y al Boletín Científico CIOH como parte de este componente.

Capitán de Navío José Andrés Díaz Ruiz

Director del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe

- Andrade, C. A.; Pinzon, V. (2011). Efectos de la sobreelevación del nivel del mar por el cambio climático en las playas de los cayos del archipiélago de San Andrés, mar Caribe Colombia. *Bol. Cient. CIOH*, 29: 60-72. <https://doi.org/10.26640/22159045.229>
- Andrade, C. A.; Barton, E. D. (2013). Sobre la existencia de una celda de circulación atmosférica sobre el Caribe y su efecto en las corrientes de Ekman en el mar Caribe suroccidental. *Bol. Cient. CIOH*, 31: 73-94. <https://doi.org/10.26640/22159045.252>
- Collazos, G.; Ospina, H.; Muñoz, A. (2007). Estudio descriptivo de la influencia del huracán Beta en las islas de Providencia y Santa Catalina. *Bol. Cient. CIOH*, 25: 61-70. <https://doi.org/10.26640/22159045.163>

- Dagua, C.; Torres, R.; Monroy, J. (2018). Condiciones oceanográficas de la reserva de biosfera Seaflower 2014–2016. *Bol. Cient. CIOH*, 37: 53-74. <https://doi.org/10.26640/22159045.2018.449>
- De La Hoz, L.; Betancur, S. (2019). Nuevo registro de la especie *Cladopyxis hemibrachiata* del grupo dinoflagelado para la reserva de la biósfera Seaflower, Caribe colombiano. *Bol. Cient. CIOH*, 38(1): 41-43. <https://doi.org/10.26640/22159045.2019.466>
- Díaz, J. A.; Andrade, C. A. (2011). Variaciones de la línea de costa en cayo Serrana y estrategias para su conservación ante las amenazas de origen natural. *Bol. Cient. CIOH*, 29: 72-86. <https://doi.org/10.26640/22159045.230>
- Echeverry, J. P.; Marriaga, L. (2013). Descripción fisiográfica de la isla de San Andrés: aproximación inicial al entendimiento integral de la problemática erosiva. *Bol. Cient. CIOH*, 31: 49-72. <https://doi.org/10.26640/22159045.251>
- Elhuyar, M. (1988). Estudio geomorfológico y sedimentológico del complejo carbonatado de las islas Providencia y Santa Catalina. *Bol. Cient. CIOH*, 8: 35-70. <https://doi.org/10.26640/22159045.28>
- Fajardo, O.; Lonin, S. (2021). Dinámica costera en la barrera arrecifal localizada en el sector nororiental de la isla de San Andrés, Caribe colombiano. *Bol. Cient. CIOH*, 40(2): 13-33. <https://doi.org/10.26640/22159045.2021.525>
- Garay, J.; Castillo, F.; Andrade, C.; Aguilera, J.; Niño, L.; De La Pava, M.; López, W. Márquez, G. (1988). Estudio oceanográfico del Caribe colombiano en el área del archipiélago de San Andrés y Providencia y cayos adyacentes. *Bol. Cient. CIOH*, 9: 3-73. <https://doi.org/10.26640/22159045.33>
- Garay, J.; Gutiérrez, H. (1984). Contribución al estudio oceanográfico químico del archipiélago de San Andrés y Providencia. *Bol. Cient. CIOH*, 5: 25-59. <https://doi.org/10.26640/22159045.16>
- Garay, J.; Castro, A. (1993). Niveles de hidrocarburos del petróleo en la isla de San Andrés, Caribe colombiano. *Bol. Cient. CIOH*, 13: 85-101. <https://doi.org/10.26640/22159045.57>
- González, E. (1987). Oceanografía física descriptiva del archipiélago de San Andrés y Providencia, con base en el análisis de los cruceros Océano IV a IX. *Bol. Cient. CIOH*, 7: 40-55. <https://doi.org/10.26640/22159045.24>
- Lonin, S.; Prada, M.; Castro, E. (2010). Simulación de dispersión de las larvas de caracol pala *Strombus gigas* en la reserva de biósfera Seaflower, Caribe occidental colombiano. *Bol. Cient. CIOH*, 28: 8-24. <https://doi.org/10.26640/22159045.212>
- Lonin, S.; Adames, R.; Payares, J., Marriaga, L. (2022). Patrones de oleaje a partir de un modelo óptico en la isla Cayos de Serranilla, Caribe colombiano. *Bol. Cient. CIOH*, 41(1): 63-72. <https://doi.org/10.26640/22159045.2022.603>
- Molares, R. (2004). Clasificación e identificación de las componentes de marea del Caribe colombiano. *Bol. Cient. CIOH*, 22: 105-114. <https://doi.org/10.26640/22159045.132>
- Molares, R.; Vanegas, T.; Bustamante, J.; Andrade, C. (2004). Aspectos oceanográficos de las aguas sobre la depresión Providencia en mayo de 2004. *Bol. Cient. CIOH*, 22: 11-25. <https://doi.org/10.26640/22159045.124>
- Molina, A.; Niño, L.; Sierra, L.; García, C.; Velasco, S. (2003). La caracterización como base para el manejo integrado de las islas. *Bol. Cient. CIOH*, 21: 114-133. <https://doi.org/10.26640/22159045.120>
- Monroy, J.; Zambrano, A. (2017). Aspectos físicos del agua de mar entre las islas de Providencia y cayo Bajo Nuevo durante la época de lluvias de 2016. *Bol. Cient. CIOH*, 35: 3-12. <https://doi.org/10.26640/22159045.428>
- Moreno, M.; Báez, L. (2021). Expedición Seaflower: el paisaje cultural marítimo de Providencia y Santa Catalina. Resultados preliminares. *Bol. Cient. CIOH*, 40(1): 83-90. <https://doi.org/10.26640/22159045.2021.566>
- Plazas, J. M.; Ortiz, J. C., Lizcano, O. (2011). Evaluación de la actividad ciclónica y el impacto del oleaje en la isla de San Andrés desde 1851 hasta 2010. *Bol. Cient. CIOH*, 29: 8-26. <https://doi.org/10.26640/22159045.226>

- Prada, M.; Castro, E.; Pomare, C.; Bent, K.; Pomare, M. (2009). Identificando patrones espaciales y temporales de la abundancia de langosta en el archipiélago de San Andrés: una experiencia de comanejo. *Bol. Cient. CIOH*, 27: 156-166. <https://doi.org/10.26640/22159045.208>
- Rangel, O. E.; Herrera, E.; Palomino, A.; Herrera, G.; Andrade, C. A. (2015). Análisis de rasgos del clima hidrodinámicos encontrados en el Atlas de los datos oceanográficos de Colombia 1922-2013. *Bol. Cient. CIOH*, 33: 3-17. <https://doi.org/10.26640/22159045.275>
- Rey, W.; Monroy, J.; Quintero-Ibáñez, J.; Escobar, G.; Salles, P.; Ruiz-Salcines, P.; Appendini, C. (2019). Evaluación de áreas susceptibles a la inundación por marea de tormenta generada por huracanes en el archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, Colombia. *Bol. Cient. CIOH*, 38(2): 57-68. <https://doi.org/10.26640/22159045.2019.465>
- Rueda, S. (2017). Medidas regionales de planeamiento espacial marino para mejorar la sostenibilidad del área marina protegida de Seaflower en el mar Caribe colombiano. *Bol. Cient. CIOH*, 35: 41-62. <https://doi.org/10.26640/22159045.431>
- Soltau J.; Díaz, J.; Molina, C. (1993). Descripción del proyecto carta batimétrica de las aguas económicas exclusivas de Colombia en la zona de San Andrés, Providencia y los cayos. *Bol. Cient. CIOH*, 14: 157-169. <https://doi.org/10.26640/22159045.68>
- Tabares, N.; Soltau, J.; Díaz, J. (1996). Caracterización geomorfológica del sector suroccidental del mar Caribe. *Bol. Cient. CIOH*, 17: 3-16. <https://doi.org/10.26640/22159045.80>
- Taylor, E.; Hernández, D.; Howard, F.; Peñaloza, G.; Posada, S.; Howard, N.; Robinson, R.; Prada, M. (2007). Impactos en los arrecifes de coral ocasionados por el huracán Beta en la plataforma insular de Old Providence y Santa Catalina. *Bol. Cient. CIOH*, 25: 71-77. <https://doi.org/10.26640/22159045.164>
- Téllez, C.; Márquez, G.; Castillo, F. (1988). Fitoplancton y ecología en el archipiélago de San Andrés y Providencia: Crucero Océano VI en el Caribe colombiano. *Bol. Cient. CIOH*, 8: 3-26. <https://doi.org/10.26640/22159045.26>
- Torres, R. R.; Andrade, C. A. (2006). Potencial en Colombia para el aprovechamiento de la energía no convencional de los océanos. *Bol. Cient. CIOH*, 24: 11-25. <https://doi.org/10.26640/22159045.145>
- Torres, R. R.; Lonin, S. (2007). Estudio del espectro de oleaje en el Caribe observado con boyas y su representación en el espectro JONSWAP. *Bol. Cient. CIOH*, 25: 8-18. <https://doi.org/10.26640/22159045.158>
- Zambrano, J. A.; Andrade, C. A. (2011). Cambios en la línea de costa del cayo Serranilla entre 1944 y 2009, archipiélago de San Andrés, Colombia. *Bol. Cient. CIOH*, 29: 87-103. https://doi.org/10.26640/01200542.29.87_103

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA

Estudio de la tasa de sedimentación y erosión en el sector La Barra del canal navegable en San Andrés de Tumaco, Nariño*Study of the sedimentation and erosion rates of the La Barra sector of the San Andrés de Tumaco navigable channel, Nariño*DOI: <https://doi.org/10.26640/22159045.2023.611> Fecha de recepción: 2023-02-01 / Fecha de aceptación: 2023-06-16Yessica Carolina Cantero Mosquera¹, Carlos A. Astaiza², Ángela M. Mesías³, Paola Andrea Quintero Rodríguez⁴**CITAR COMO:**

Cantero, Y. C.; Astaiza, C. A.; Mesías A. M.; Quintero, P. A. (2023). Estudio de la tasa de sedimentación y erosión en el sector La Barra del canal navegable en San Andrés de Tumaco, Nariño. *Bol. Cient. CIOH*, 42(1): 7-25. ISSN en línea 2215-9045. DOI: <https://doi.org/10.26640/22159045.2023.611>

RESUMEN

El seguimiento de la evolución del fondo marino en canales navegables permite garantizar la navegación segura. En esta investigación se estimó la tasa de sedimentación y erosión a partir de datos batimétricos multihaz en el canal navegable de San Andrés de Tumaco (Nariño), específicamente en el sector denominado La Barra, para diferentes períodos entre 2019 y 2021. Además, se realizó el trazado de las líneas de costa para los años 2019, 2020 y 2021 con el objetivo de identificar la dinámica costera en la desembocadura de los esteros más cercanos al área de estudio y su relación como fuente de aportes de sedimentos. Por último, se analizaron datos de precipitación con el fin de relacionarlos como una variable forzante de transporte y aporte de sedimentos continentales en la bahía de Tumaco. Producto de estos análisis, en el sector La Barra se obtuvo el mayor volumen acumulado de sedimentación, con 188 881 m³ y de erosión con 150 245 m³, debido a que es el período más amplio observado. Adicionalmente, se calculó la tasa promedio de sedimentación de 24409 m³/mes, sin considerar el período más amplio. En el análisis espacio temporal de la línea de costa se evidenciaron sectores con cambios de acreción, retroceso y nulos o constantes; sin embargo, predominaron los procesos de acreción, asociados a acumulación de sedimentos continentales. Por otra parte, la relación entre la precipitación y el volumen acumulado de sedimentación en el sector La Barra se representó con la ecuación $S = 56.591p + 15529$, y con el volumen acumulado de erosión $E = 48.749p - 5263.6$. Basados en la estimación de la tasa de sedimentación/erosión, la dinámica costera y su correlación con la precipitación, como variable influyente en el transporte de sedimentos generadora de cambios morfológicos del fondo marino, las autoridades tomadoras de decisiones pueden proponer un ajuste en los procesos de remoción sobre el sector La Barra, que contribuya a una navegación segura en el canal de acceso al segundo puerto más importante del Pacífico colombiano.

PALABRAS CLAVE: batimetría, erosión, sedimentación, canal navegable, TIN, cambios morfológicos, transporte de sedimentos, Tumaco.

¹ Orcid: 0000-0003-4057-188X. Investigadora Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico (CCCP). Correo electrónico: y.carolmosquera@gmail.com

² Orcid: 0000-0003-0040-3902. Investigador Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico (CCCP). Correo electrónico: castaiza31@gmail.com

³ Orcid: 0000-0002-4129-0927. Investigadora Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico (CCCP). Correo electrónico: amesias@dimar.mil.co

⁴ Orcid: 0000-0002-4559-2375. Investigadora Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (Ungrd). Correo electrónico: paoadri123@gmail.com



Publicado por la Dimar

ABSTRACT

Monitoring the evolution of the seafloor in navigable channels ensures safe navigation. In this research, the sedimentation and erosion rates were estimated using multibeam bathymetric data in the navigable channel of San Andrés de Tumaco - Nariño, specifically in the sector known as "La Barra," for different periods between 2019 and 2021. Additionally, the coastline was traced for the years 2019, 2020, and 2021 to identify coastal dynamics at the estuary mouths closest to the study area and their relationship as sediment sources. Lastly, precipitation data were analyzed to establish its correlation as a forcing variable for sediment transport and continental sediment input into Tumaco Bay. As a result of these analyses, the sector of La Barra exhibited the highest accumulated sedimentation volume of 188 881 m³ and erosion volume of 150 245 m³, attributed to the longest observed period. Additionally, the average sedimentation rate was calculated as 24409 m³/month, excluding the longest period. The spatiotemporal analysis of the coastline revealed sectors with accretion, retreat, or which are stable or constant, with accretion processes predominating due to continental sediment accumulation. Furthermore, the relationship between precipitation and the accumulated sedimentation volume in La Barra sector is represented by the equation $S = 56.591p + 15529$, and for the accumulated erosion volume, $E = 48.749p - 5263.6$. Based on the estimation of sedimentation/erosion rates, coastal dynamics, and their correlation with precipitation as an influential variable in sediment transport, which generates morphological changes in the seafloor, decision-making authorities can propose adjustments in removal processes in the La Barra sector to ensure safe navigation in the access channel to Colombia's second most important Pacific port.

KEYWORDS: Bathymetry, erosion, sedimentation, navigation channel, TIN, morphological changes, sediment transport, Tumaco.

INTRODUCCIÓN

Los océanos y mares son instrumentos económicos orientados a la operación de la navegación, donde la seguridad marítima tiene como propósito evitar accidentes, proteger la vida humana y el medio ambiente (Rojas *et al.* 2018). La región Pacífica tiene potencial para proyectarse a economías globales, lo que involucra mejorar el diseño en las rutas de navegación y garantizar la seguridad en las mismas, lo que exige estrategias e investigación que mitiguen riesgos antrópicos y naturales en el desarrollo de la actividad marítima.

Conocer las características geográficas, geológicas y geofísicas del fondo marino y litoral permite describir la dinámica en los canales de navegación y sectores aledaños, determinar factores que aceleran o retardan los procesos de sedimentación y/o erosión. Las fuentes principales de sedimentos marinos son de origen continental, los cuales son transportados como residuos al mar por los ríos. El propio océano ocasiona sedimentación debido a restos de organismos que viven en él, volcanes submarinos, a causa de corrientes y desintegración por acción química y gases procedentes de la atmósfera (Cifuentes, Torres y Frías, 1997).

El sistema económico basado en la actividad marítima ha tenido un aumento significativo, representado en el crecimiento del número de actividades comerciales y portuarias que incrementan el tráfico marítimo; pensar en un evento que implique retrasar o detener dichas actividades despierta un interés por los procesos que pueden afectar la navegabilidad (Cifuentes y Mejía, 2015). En la actualidad, con el desarrollo tecnológico, las actividades marítimas tienen más recursos a su alcance para garantizar la navegación segura. Las campañas de levantamiento hidrográfico se realizan cada vez más bajo estándares que propenden mayor precisión, dándole prioridad a la información de los canales navegables, que son parte del eje económico nacional; de allí que cuando se identifican procesos de sedimentación acelerados, procede un seguimiento para determinar la necesidad de hacer remoción de estos.

En el municipio de Tumaco se ubica el segundo puerto más importante de la costa Pacífica colombiana; en el cual se ha identificado un cambio en la morfología debido a la acumulación acelerada de sedimento en el sector denominado La Barra, que hace parte de su canal navegable (Tejada *et al.* 2003). Como medida de prevención

que garantice la navegabilidad, los entes encargados diseñaron una trampa de sedimentos para mitigar la afectación por la acumulación de estos sobre el canal (Barajas y García, 2014). Adicionalmente, el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico (CCCP) realiza campañas de levantamiento hidrográfico periódico y el Instituto Nacional de Vías (Invias) realiza dragados de remoción de sedimentos en el sector.

Los datos proporcionados por las campañas de levantamiento hidrográfico son el insumo para actualizar la cartografía de todo el territorio colombiano en el ámbito marítimo y fluvial (Dimar, 2021). Los navegantes emplean la información suministrada en las cartas náuticas para definir sus rutas de acuerdo con sus necesidades y los requerimientos mismos de la embarcación. Para proporcionar seguridad a los navegantes, la periodicidad en la actualización de la información considera la incidencia de factores que aceleren el proceso de sedimentación. Debido a su ubicación geográfica, la dinámica morfológica de la bahía de Tumaco está influenciada por la cantidad de ríos y/o vertientes de estos que desembocan en la costa (Niño y Oviedo, 2018), relacionados también con variables atmosféricas como la precipitación (Gómez y Peñaranda, 2012). Las mareas semidiurnas, las corrientes y el oleaje que entra en la bahía provenientes del suroeste (SW) y el sur-suroeste (SSW), las cuales tienen afectación en el transporte de sedimentos (Restrepo, Otero y López, 2009), son los encargados de transportar los sedimentos que aporta el río Mira (con caudal medio anual de 868 m³/s y es la corriente más grande de agua cercana a la zona de estudio) durante la época de lluvias, período en el que presenta su mayor caudal (MADS-Invenmar, 2012. En Barajas y García, 2014).

De acuerdo con la información disponible, fue posible analizar y hacer seguimiento para determinar un valor aproximado de la tasa de sedimentación en el sector La Barra, en períodos entre 2019 y 2021; inspeccionar los cambios en la línea de costa de los esteros que desembocan próximos a la zona de estudio, con imágenes satélites, e identificar la incidencia de la precipitación en los procesos de sedimentación y erosión, determinando un factor de correlación entre las variables.

ÁREA DE ESTUDIO

El Pacífico colombiano actualmente cuenta con dos puertos marítimos, el puerto de Buenaventura y el puerto de Tumaco, siendo este último el segundo en importancia para el desarrollo de las actividades marítimas (Gómez y Peñaranda, 2012). Se encuentra ubicado geográficamente en la bahía de Tumaco (Nariño), rodeado de la desembocadura de los ríos Chagüí, Colorado, Curay, Imbipí, Llanaje, Rosario y Tablones (Niño y Oviedo, 2018). El área de estudio se localiza sobre el canal de acceso al puerto de Tumaco, el cual tiene una extensión aproximada de 8500 m (BAGGERWERKEN DECLOEDT y ZN|Colombia, 2020), específicamente en el sector denominado La Barra, con un área de 619 611 m² y una longitud de 1750 m. En el sector La Barra periódicamente se realizan dragados del fondo marino, con el propósito de mantener la profundidad de navegación requerida por el puerto. En la zona de dragado se diferencian tres partes: la barra longitudinal de sedimentos, la trampa de sedimentos y el canal navegable (Fig. 1).

A nivel regional, geológicamente el Pacífico colombiano hace parte del bloque Norandino, el cual se encuentra dominado por un borde activo o convergente producto de la interacción entre las placas de Nazca y Suramericana, compuesto por la plataforma continental, el talud y la fosa Colombo-Ecuatoriana (Collot, Sallares y Pazmiño, 2009). Regionalmente, la bahía de Tumaco está condicionada por procesos tectónicos y geológicos que interviene en su dinámica geomorfológica; por ejemplo, sobre la bahía evidencia la continuidad de dos anticlinales y un sinclinal en dirección NE, también, hacia el SW de la bahía la presencia de la falla Tumaco en dirección N45W, y al N finaliza en la punta de Cascajal la falla Remo Lino-Charco (Correa y González, 1989).

Adicionalmente, la bahía de Tumaco está asociada a deltas desarrollados sobre un sustrato rocoso constituido por rocas sedimentarias neógenas, que afloran en el sector de costa acantilada y que condicionan el transporte de sedimentos a lo largo de la línea de costa, el cual sirve además de separación a dos sistemas deltaicos al norte el sistema deltaico del río Patía y al sur el sistema deltaico del río Mira (Nivia, Pérez y Sepúlveda, 2003). Localmente, se

generan geformas como islas, espigas y pilares, entre otras, con mayor predominancia de las planicies costeras, que a su vez se constituyen por

plataformas intermareales no vegetadas, planos de inundación y planos y llanuras con vegetación halófila (Bermúdez, Álvarez y Niño, 2014).

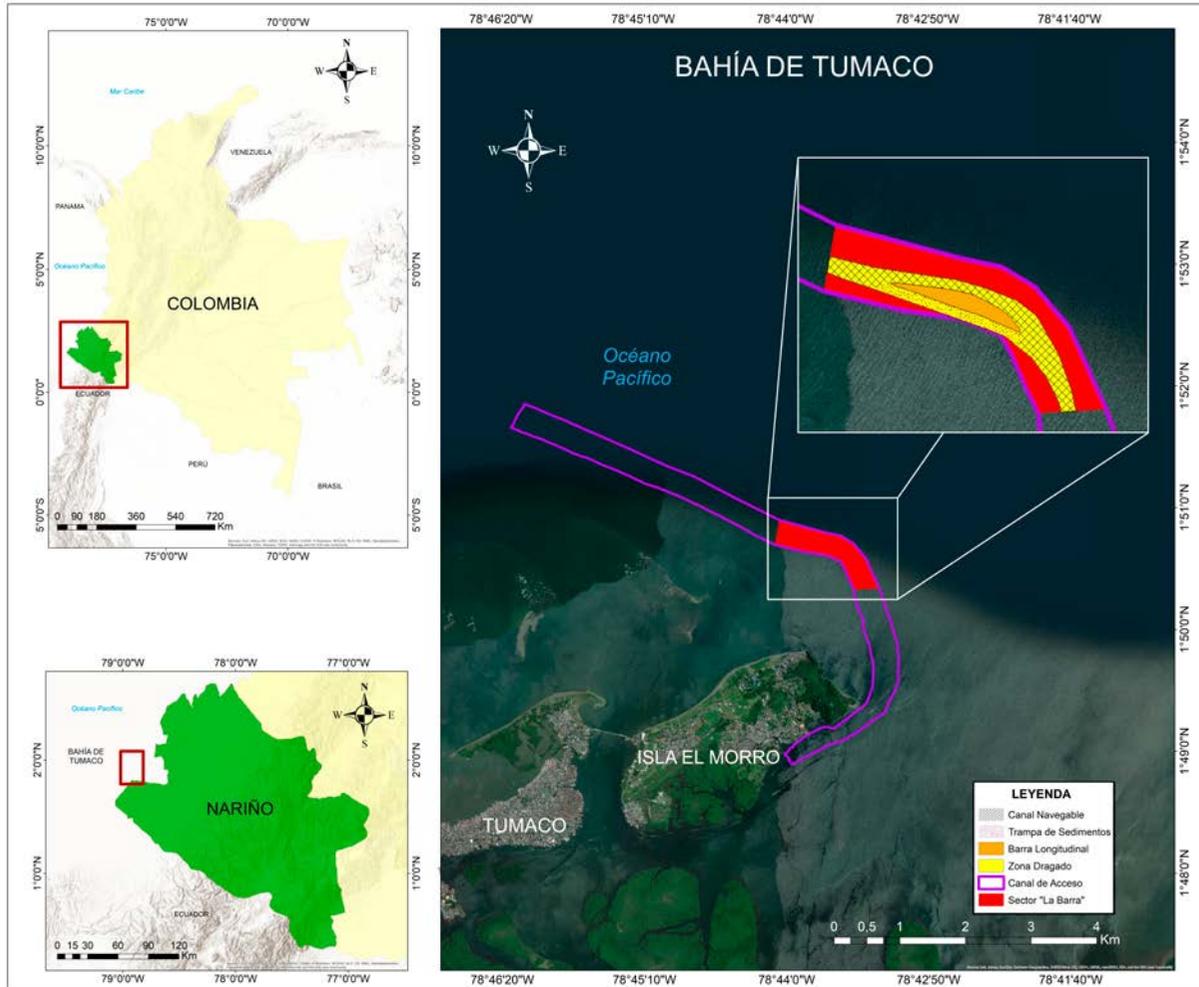


Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio.

METODOLOGÍA

Cambios morfológicos del fondo

Se accedió a la base de datos disponible de batimetrías, entre los años 2019 a 2021, de la oficina de levantamientos hidrográficos del CCCP. La información batimétrica dentro de los espacios marítimos y fluviales bajo la jurisdicción de la Dirección General Marítima (Dimar) cumple las especificaciones técnicas durante la adquisición, procesamiento y cartografía, de acuerdo a la Resolución N°. 157 del 2011-Dimar, la cual se

rige bajo los estándares mínimos establecidos en las normas de la Organización Hidrográfica Internacional (OHI) para los levantamientos hidrográficos, 5ª Edición de febrero del 2008 (Dimar, 2011).

Los levantamientos se realizaron a bordo de la unidad ARC "Isla Cascajal", empleando una ecosonda multihaz REASON SEABAT 7125 y el sistema global de navegación por satélite (GNSS) TRIMBLE R10, configurado en modo diferencial (utiliza dos equipos simultáneamente; una estación de referencia y una móvil) y RTK

(correcciones en tiempo real transmitidas por redes de estaciones permanentes). Todos los datos están referidos al datum vertical del nivel medio de las bajamares de sicigia (MLWS, por sus siglas en inglés), determinado por investigadores de los centros de investigaciones de la Dimar (Álvarez *et al.*, 2018; Pulido *et al.*, 2013).

Los archivos de batimetría analizados no son homogéneos espacialmente, por ello se definió un borde que permite extraer una zona común para todos los levantamientos y así tener la misma información batimétrica para la comparación espacio-temporal. Con las batimetrías se hizo un análisis mediante una comparación TIN, la cual es una representación de la geoforma por medio de redes irregulares de triángulos (ESRI, 2016). Este tipo de modelos es usado para el modelado de alta precisión de áreas pequeñas, por lo que es aplicado en la ingeniería, donde resultan útiles porque permiten realizar cálculos de área planimétrica, área superficial y volumen.

Se realizó una operación denominada diferencia TIN a TIN en el software Hypack® para determinar un valor aproximado de erosión y/o sedimentación acumulada entre las batimetrías contiguas. Con el objetivo de facilitar

su entendimiento, la información se presenta en unidades de volumen acumulado mensualmente; sin embargo, no se debe tomar como un valor de erosión y/o sedimentación mensual acumulada fija, debido a que mes a mes puede variar por factores oceanográficos y meteorológicos propios de la zona. También se definieron líneas transversales para hacer seguimiento de los cambios.

Dinámica de la línea de costa

Con el fin de identificar la relación existente entre los cambios morfodinámicos de la línea de costa en los esteros cercanos al área de interés, con los cambios morfológicos en el fondo marino del sector La Barra y su posible influencia de aportes de sedimentos continentales, se identificó y se digitalizó la línea de costa usando fotointerpretación de imágenes satelitales (Castañeda, 2017). Los esteros seleccionados fueron: Guandaraja, Natal, Aguacalara, Trapiche y Resurrección (Fig. 2), los cuales, en una escala regional, pertenecen a la zona hidrográfica río Mira Mataje, subzona río Mira y a una escala local, a la cuenca sistema de esteros del río Mira (Corponariño, 2007).

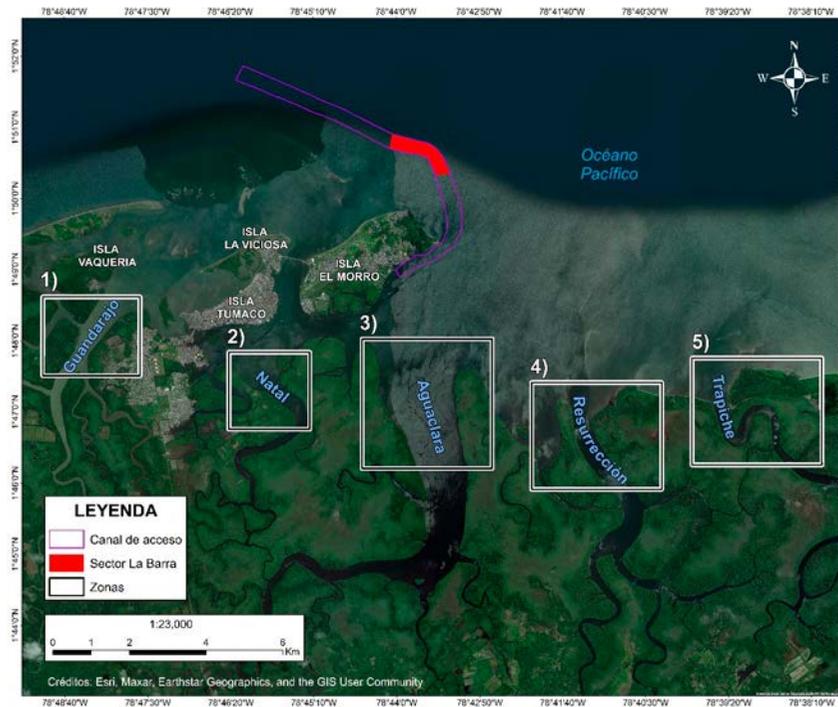


Figura 2. Ubicación geográfica del área de estudio y zonas de análisis de dinámica de línea de costa en los esteros del sistema de esteros del río Mira.

Para determinar procesos de erosión y sedimentación en las zonas de los esteros se utilizaron las líneas de costa referentes a los años en que se ejecutaron los levantamientos batimétricos analizados en esta investigación. A través del portal de datos Earth Explorer del Servicio geológico de Estados Unidos (USGS,

por sus siglas en inglés) (Survey, 2021) se seleccionaron tres imágenes satelitales LANDSAT 8 OLI/TIRS C1 LEVEL desde el 2019 hasta el 2021, procurando escoger aquellas con menor nubosidad para apreciar visualmente el límite costero (Guido *et al.*, 2009) (Tabla 1).

Tabla 1. Imágenes satelitales empleadas para trazar la línea de costa.

No.	Fecha	Nombre del archivo con las imágenes	Resolución
1	2019/03/02	LC08_L1TP_010059_20190302_20190309_01_T1	30 m
2	2020/03/04	LC08_L1TP_010059_20200304_20200314_01_T1	30 m
3	2021/03/23	LC08_L1TP_010059_20210323_20210402_02_T1	30 m

Las imágenes satelitales fueron procesadas en el software ArcMap, empleando las bandas RGB 6, 5, 4, con una escala de trabajo durante la digitalización de 1:60000. Una vez digitalizadas las líneas de costa, se calcularon las áreas de acreción o retroceso entre los periodos 2019-2020 y 2020-2021, con el fin de conocer el comportamiento costero de manera cuantitativa.

Comportamiento de la precipitación

Para el análisis de la precipitación en la zona de estudio, se consultaron los datos proporcionados por las estaciones cercanas pertenecientes al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam). Sin embargo, debido a la discontinuidad en los datos mensuales de estas estaciones, se optó por emplear aquellos medidos en la estación pluviométrica más cercana a la zona de estudio y perteneciente a la Dimar (Fig. 1). La elección de esta estación se basó en su ubicación geográfica dentro de las instalaciones del CCCP, lo que garantizó la continuidad de los datos en el periodo de tiempo comprendido entre 2019 y 2021, gracias al monitoreo constante y la calibración periódica de la estación.

Se evaluaron las precipitaciones acumuladas durante los mismos periodos en los que se realizaron los levantamientos batimétricos. El objetivo fue identificar si existe alguna relación entre los cambios morfológicos de sedimentación y erosión en el fondo marino del sector La Barra, y el posible aporte de sedimentos continentales transportados por los afluentes que desembocan en la zona.

Resultados y discusión

De acuerdo con los datos disponibles, se consideraron los valores extremos de cada una de las campañas para delimitar los rangos de variación (Tabla 2). Se observó la variación morfológica del fondo marino a través de las diferencias en las profundidades, haciendo un seguimiento correspondiente a cada una de las fechas (Fig. 3).

Tabla 2. Información general de las campañas de levantamiento hidrográfico.

Campaña de levantamiento	Profundidad mín. (m)	Profundidad máx. (m)
Febrero 2019	3.23	8.67
Septiembre 2019	3.42	8.51
Abril 2020	1.71	8.87
Julio 2020	3.62	9.35
Diciembre 2020	3.36	8.57
Marzo 2021	4.08	8.74
Junio 2021	3.94	8.58
Agosto 2021	3.90	10.05

Como se observa en la Figura 3, en febrero de 2019 el marco del canal navegable está bien definido; transcurrido un tiempo cambia la morfología, afectando inicialmente la trampa de sedimentos en septiembre de 2019; este proceso de acreción continua meses después, como se observa en abril de 2020, donde el valor mínimo de profundidad se ha reducido 1.52 m en 14 meses. En junio de 2020, Invias realizó una intervención de dragado de relimpia en el área donde cambia

de dirección el canal de acceso, principalmente en el canal navegable y la trampa de sedimentos (BAGGERWERKEN DECLOEDT & ZN|Colombia, 2020). Se restauró el diseño de canal con unas profundidades de tolerancia de 7.6 m, de acuerdo

con el informe de dragado (BAGGERWERKEN DECLOEDT & ZN|Colombia, 2020). Después de esa fecha las imágenes muestran la acumulación de sedimentos en el mismo sector.

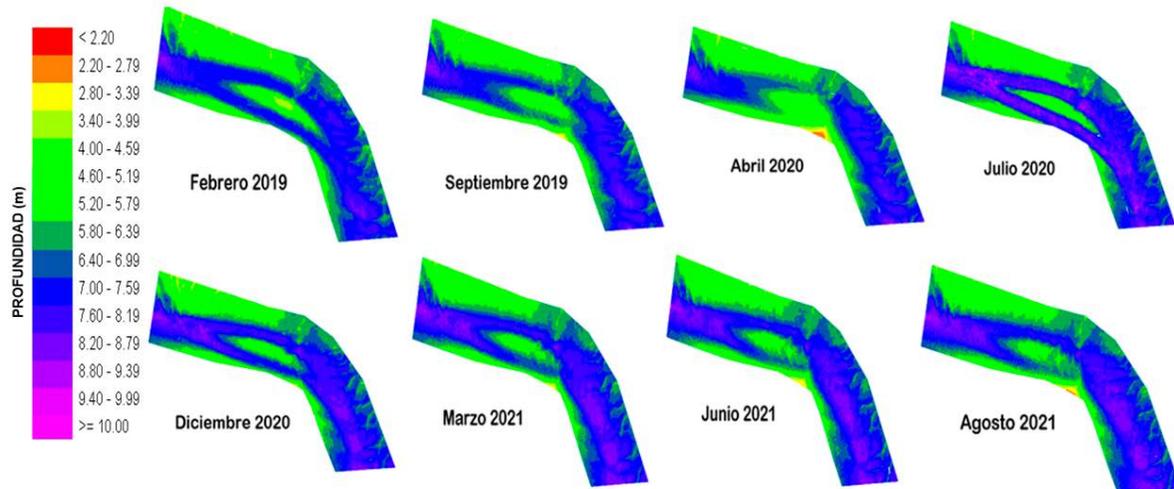


Figura 3. Batimetrías desde 2019 al 2021.

Tras realizar una comparación entre las batimetrías disponibles y de acuerdo con los resultados obtenidos en la operación diferencia TIN a TIN, se estableció que los valores positivos representan el proceso de sedimentación y los valores negativos el proceso de erosión (Fig. 4a).

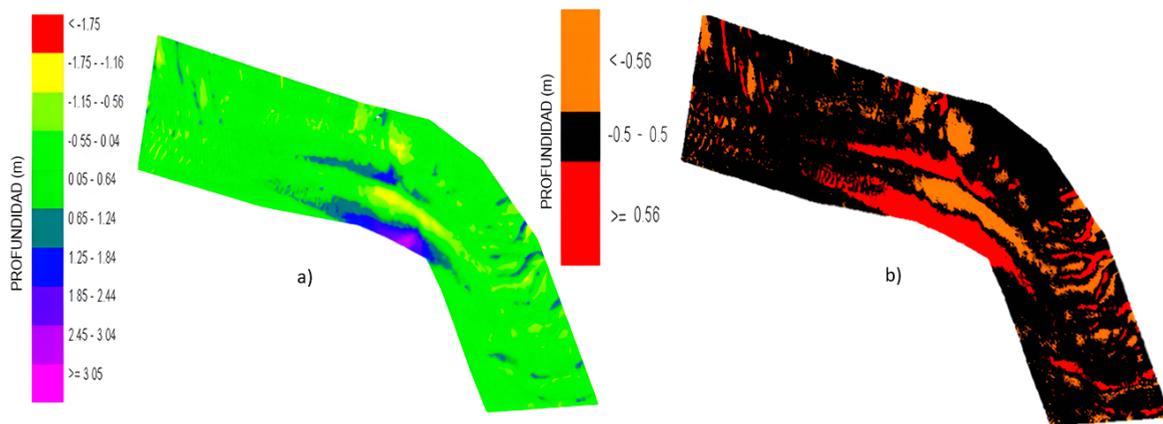


Figura 4. Diferencia TIN A TIN febrero 2019 - septiembre 2019 sector La Barra.

Para identificar las zonas de mayor afectación por alguno de los dos procesos se asignaron tres colores; de los cuales el color negro representa las zonas donde no se considera una variación

significativa en la morfología del fondo, con valores entre -0.5 m y 0.5 m, el aumento en la sedimentación o acreción se representa en color rojo y la erosión en un color naranja (Fig. 4b). Con

las consideraciones planteadas se observó que la afectación de sedimentación se da principalmente en el sector cóncavo del canal. Entre febrero y septiembre de 2019 la profundidad máxima de erosión y sedimentación fue de -1.73 m y de 3.32 m, respectivamente, con una tasa de erosión de 14310 m³/mes y una tasa de sedimentación de 17699 m³/mes.

Siguiendo el comportamiento entre septiembre de 2019 y abril de 2020 (Fig. 5) los valores máximos de erosión y sedimentación

fueron -1.80 m, con tasa de erosión de 8715 m³/mes y tasa de sedimentación de 20191 m³/mes. De acuerdo con lo observado en los mapas, la afectación de sedimentación es muy representativa en la trampa de sedimentos; esos valores tienen una incidencia sobre la seguridad en la navegación, por tal motivo la entidad externa encargada de realizar los dragados de limpiezas procede en el mes de junio a remover el material en este sector (BAGGERWERKEN DECLOEDT & ZN|Colombia, 2020).

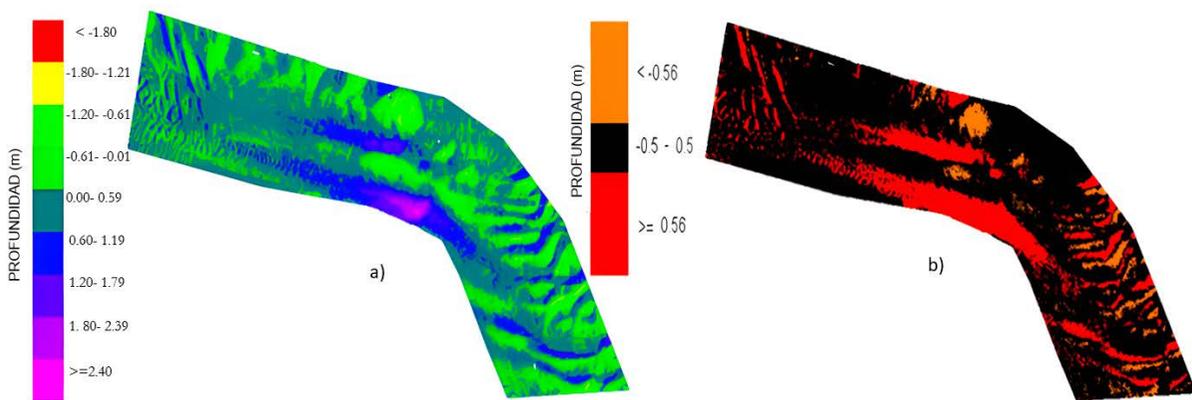


Figura 5. Diferencia TIN A TIN septiembre 2019 - abril 2020 sector La Barra.

Tras el dragado de limpieza del sector La Barra se realizó la comparación entre la batimetría posterior al dragado y la inmediatamente anterior levantada en abril del 2020; en esta comparación se observó el diseño del canal definido (Fig. 6).

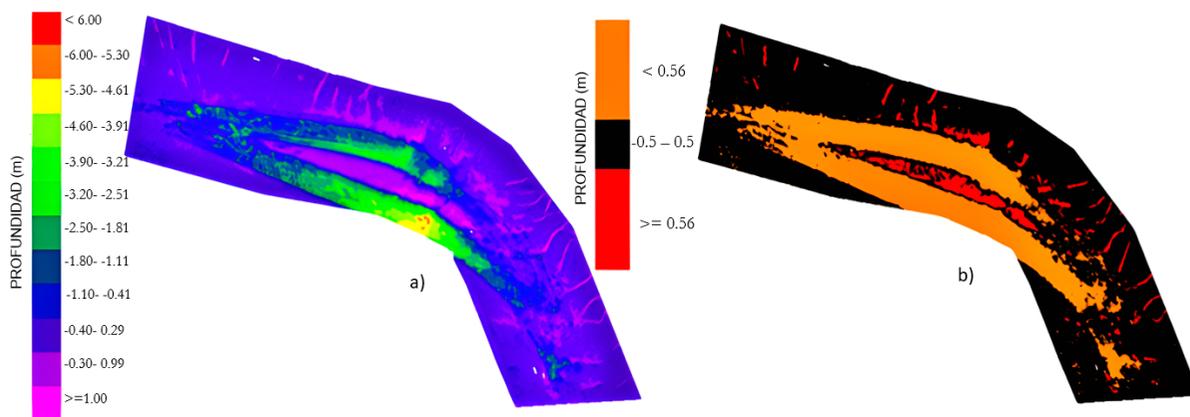


Figura 6. Diferencia TIN A TIN abril 2020 - julio 2020 sector La Barra.

Los valores máximos entre abril y julio del 2020 fueron -6.04 m y 1.65 m, los cuales se podrían interpretar como procesos de erosión y sedimentación, respectivamente; sin embargo, no es apropiada dicha afirmación, teniendo en cuenta que se realizó una intervención antrópica que afecta la morfología del fondo marino. Razón por la cual tampoco se considera prudente expresar los valores de tasas de sedimentación y erosión.

En el tiempo transcurrido entre julio y diciembre de 2020 (Fig. 7) en la zona de erosión se presentó un valor máximo en -2.10 m y en la de sedimentación en 3.92 m; las tasas de variación en el mismo orden fueron 17795 m³/mes y 29208 m³/mes, siendo consecuente con las tasas dadas entre septiembre de 2019 y abril de 2020. A partir de diciembre de 2020 se inician levantamientos batimétricos más consecutivos, con el propósito de hacer seguimiento a la tasa de cambio de los procesos.

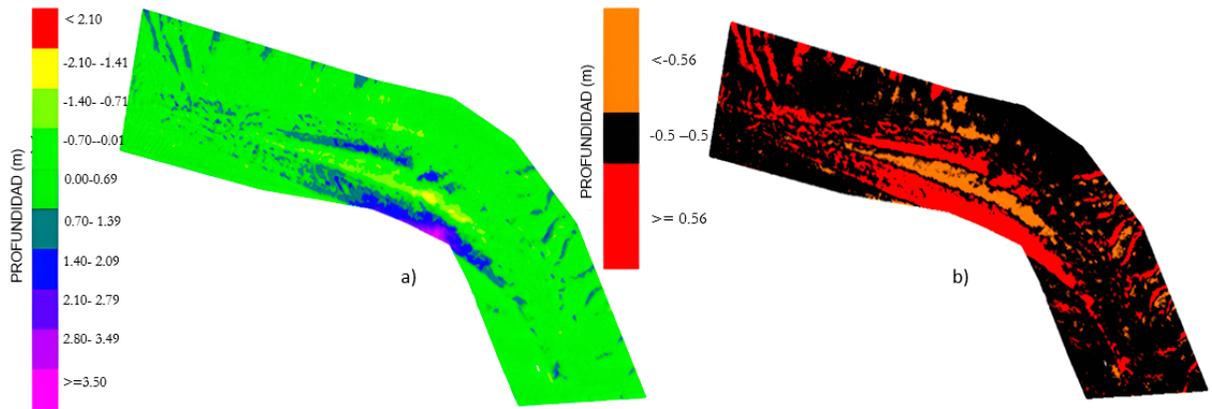


Figura 7. Diferencia TIN A TIN julio 2020– diciembre 2020 sector La Barra.

Tres meses después (Fig. 8) la tasa de erosión fue de 16266 m³/mes, con una profundidad máxima de -1.11 m. Por otro lado, la tasa de sedimentación continuó siendo superior con respecto a la de erosión, presentando un valor de 28045 m³/mes y un valor máximo de 1.75 m. Sin embargo, estos datos son inferiores a los registrados anteriormente debido a que se reduce la temporalidad.

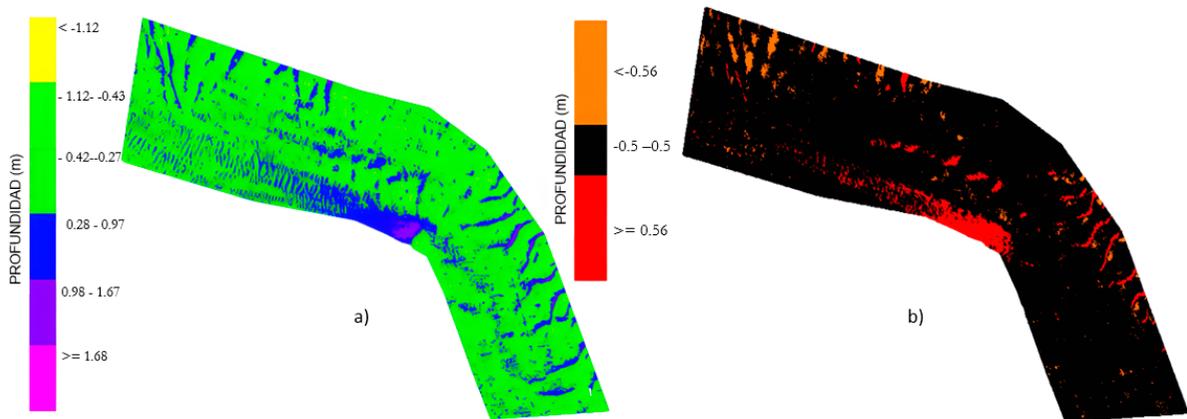


Figura 8. Diferencia TIN A TIN diciembre 2020 - marzo 2021 sector La Barra.

Manteniendo la temporalidad de tres meses, se realizó la comparación entre la batimetría de marzo y junio del 2021 (Fig. 9), de la cual se obtuvieron los valores máximos de -1.08 m y 1.81 m; además tasas de 16789 m³/mes y 23718 m³/mes para la erosión y sedimentación, respectivamente. De acuerdo con estos resultados se observó una proporcionalidad en los valores para cambios de tres meses.

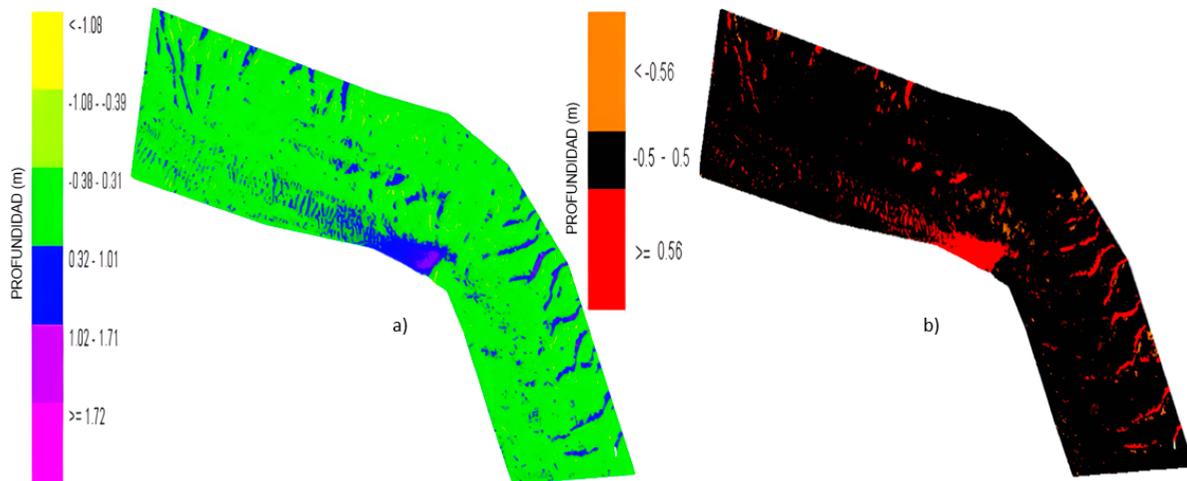


Figura 9. Diferencia TIN a TIN marzo - junio 2021 sector La Barra.

Reduciendo la relación de temporalidad a dos meses (Fig. 10) se obtuvieron los valores máximos en -0.93 m y 1.37 m, con tasa de erosión de 21586 m³/mes y tasa de sedimentación de 27593 m³/mes.

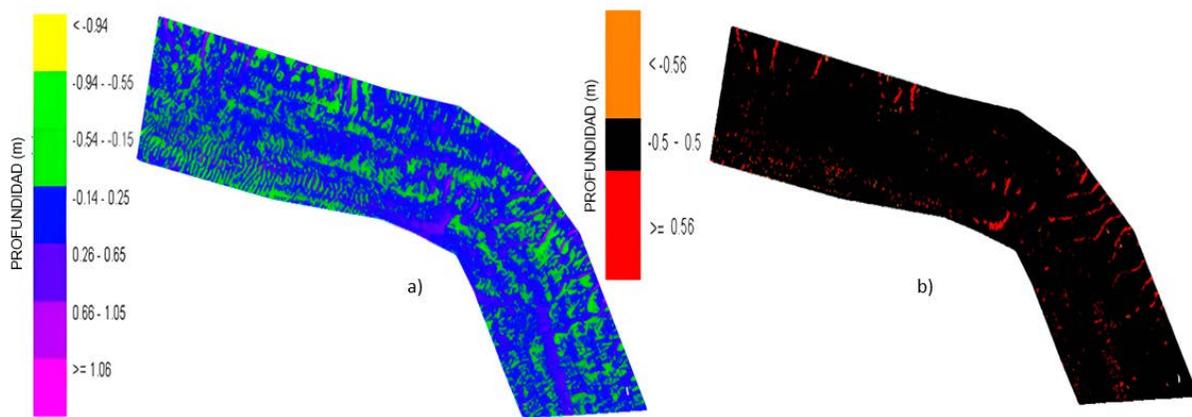


Figura 10. Diferencia TIN A TIN junio - agosto 2021 sector La Barra.

De acuerdo con los cambios morfológicos del fondo durante el transcurso de tiempo analizado, el sector La Barra tiene una mayor tendencia a la sedimentación que a la erosión. Considerando una temporalidad más amplia, desde julio del 2020 a agosto de 2021 (Fig. 11), la tasa de sedimentación es de 16694 m³/mes y la de erosión

20098 m³/mes; donde la sedimentación alcanza una altura de 4.97 m en un área de 257 093 m² y la erosión -2.37 m en 362 369 m². Siguiendo un patrón de mayor diferencia volumétrica asociada a sedimentación en una menor área, representado en mayores alturas que reducen la profundidad de navegación.

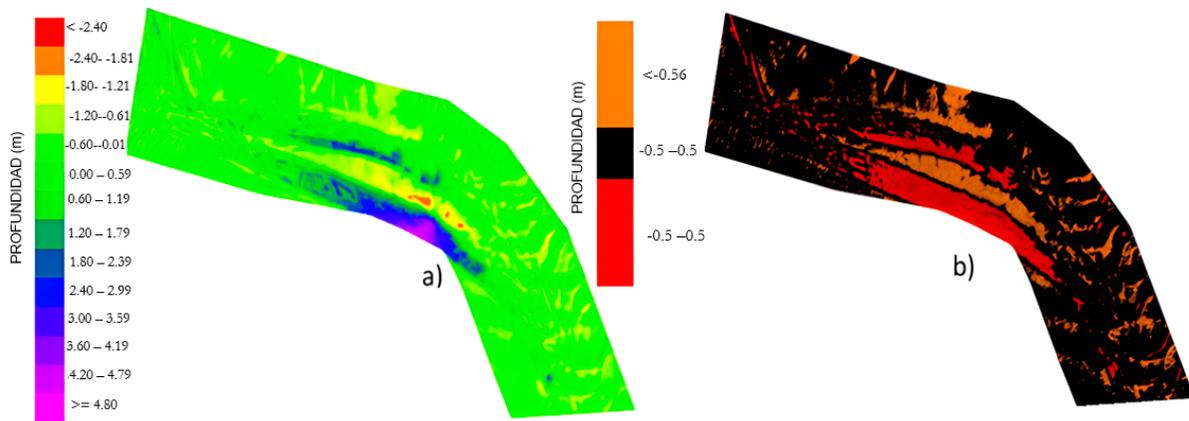


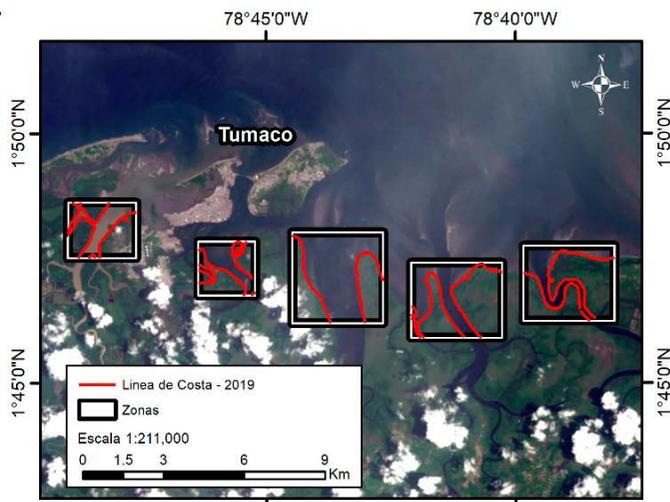
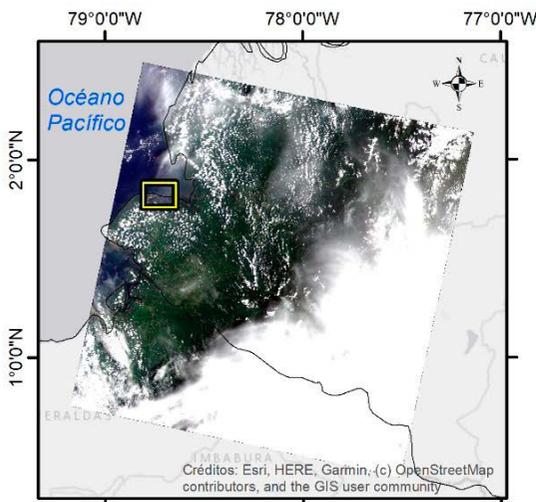
Figura 11. Diferencia TIN a TIN julio 2020 - agosto 2021 sector La Barra.

De acuerdo con los datos de tasas de sedimentación y exceptuando los correspondientes al dragado de relimpia del canal, se ratifica la acumulación de sedimentos ajustada a una tendencia lineal de $17562 \text{ m}^3/\text{mes}$. Por otro lado, la tasa de erosión presenta una tendencia de $12453 \text{ m}^3/\text{mes}$, lo que continúa corroborando la predominación del proceso de sedimentación para el sector.

Se considera que el diseño que tiene el canal navegable en el sector de La Barra es homologable a un meandro, donde la dinámica de su movimiento se manifiesta mediante procesos de erosión y sedimentación actuando simultáneamente. La velocidad de flujo en la curva exterior es significativamente mayor, lo que implica erosión, y en la curva interior sedimentación (Ceballos, 2011), evidenciado en el comportamiento de acumulación de sedimentos en la zona interna

o trampa de sedimentos, que progresivamente aumenta hasta saturarla y sobrepasar la barra longitudinal, lo que conlleva a la afectación del canal navegable.

Por otro lado, para relacionar variables que influyen en el fenómeno de sedimentación y erosión del sector La Barra se identificó la cuenca continental que desemboca cerca de este, teniendo en cuenta que los aportes de sedimentos continentales están condicionados a factores como el área de la cuenca de drenaje, balance hidrológico entre precipitación y evaporación, geología, relieve e hidrología (Restrepo, 2005). Enmarcando la línea de costa en las desembocaduras del sistema de esteros del río Mira (Fig. 12) se compararon los cambios de retroceso o acreción, asociados a procesos de erosión o sedimentación, respectivamente.



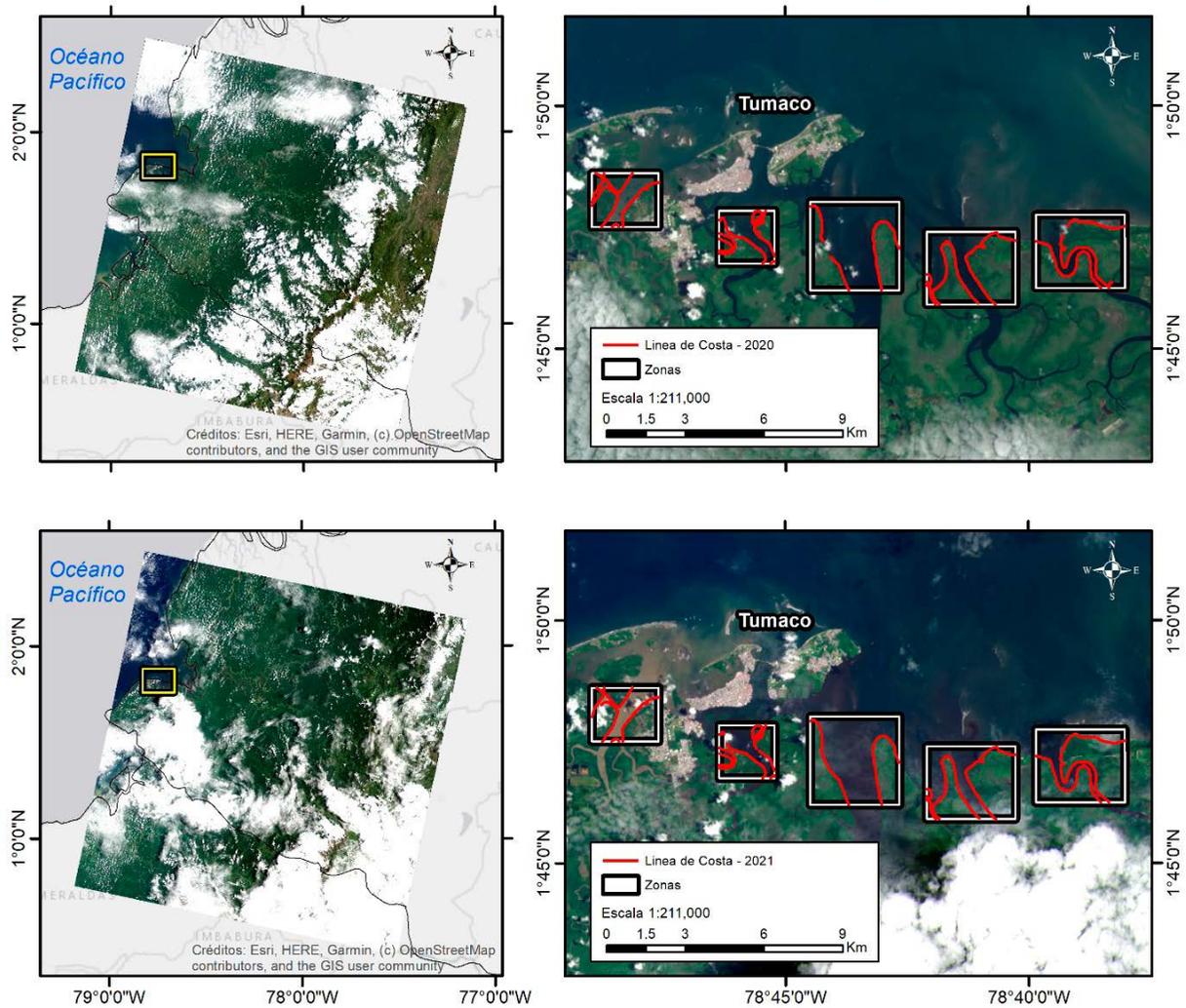


Figura 12. (Izq.) Visualización de las imágenes satelitales utilizadas. (Der.) Trazado de la línea de costa con respecto a cada imagen satelital.

La Zona 1, ubicada en el estero Guandarajo, presenta áreas de acreción y retroceso a lo largo del borde costero; sin embargo, predomina el proceso de sedimentación durante los dos periodos analizados, con un total de 44850 m² de acreción con relación a 28578 m² de retroceso. En general, es una zona dinámica que puede variar de erosión a sedimentación, o viceversa (figuras 13A y 13B). En la Figura 13C se evidenciaron, durante el periodo 2019-2020, procesos de tipo sedimentario; en el periodo 2020-2021 este patrón cambió su comportamiento a tipo erosivo. Caso contrario sucede en la Figura 13D, en la cual se presenta una alternancia a lo largo de la línea de costa entre procesos de sedimentación y

erosión durante el periodo 2019-2020, y cambia totalmente a sedimentación en el periodo 2020-2021.

La Zona 2 se localiza el estero Natal, al igual que en la zona anterior se evidencia que el proceso predominante es la sedimentación (figuras 14A y 14B). En términos generales, presentó 27765 m² de acreción y 23602 m² de retroceso durante los dos periodos analizados. En la Figura 14C se observa que, en el periodo 2019-2020, hubo una mayor incidencia en la sedimentación en comparación con el periodo 2020-2021, ya que en este último se generaron nuevas áreas de erosión. Otro ejemplo de esta dinámica se muestra en

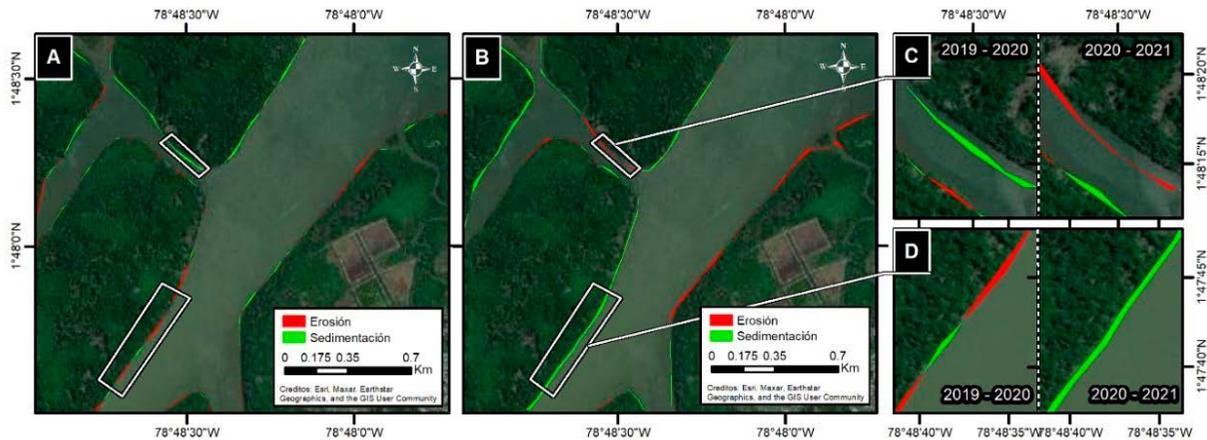


Figura 13. Áreas de erosión y sedimentación en la Zona 1. A) Periodo 2019-2020. B) Periodo 2020-2021. C y D) Ampliación a detalle en un área específica para mejor visualización.

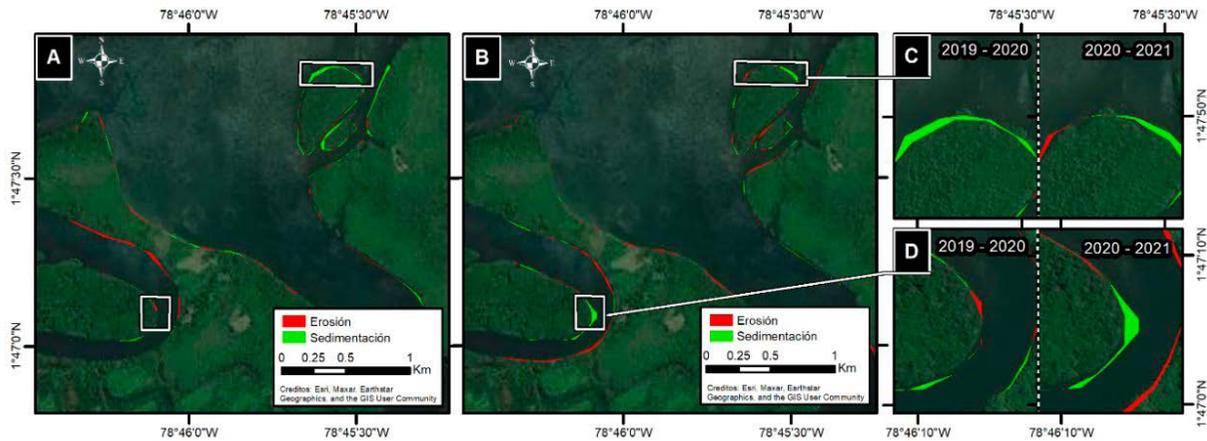


Figura 14. Áreas de erosión y sedimentación en la Zona 2. A) Periodo 2019-2020. B) Periodo 2020-2021. C y D) Ampliación de un área específica para mejor visualización.

la curva de un meandro de la zona (Fig. 14D), donde acumuló sedimentos en el borde convexo y erosionó en el borde cóncavo.

La Zona 3, ubicada en el estero Aguaclara, se caracteriza por ser la zona con una mayor razón entre sedimentación y erosión en comparación a las otras cuatro zonas, debido a que evidenció en total 41015 m² de acreción y 15948 m² de retroceso durante los dos periodos analizados, siendo el proceso de sedimentación el más relevante (figuras 15A y 15B). A lo largo del borde costero se identificó un área con sedimentación durante el periodo 2019-2020 y para el año siguiente cambió la dinámica a erosión (Fig.

15C); sin embargo, en la Figura 15D se muestra lo contrario con áreas de erosión y sedimentación durante el periodo 2019-2020, y un aumento únicamente de sedimentación en el periodo 2020-2021.

La Zona 4, localizada en el estero Resurrección, se diferencia de las otras zonas debido a que presentó principalmente procesos de tipo erosivo durante el periodo 2019-2020, con 31828 m² de retroceso y 10880 m² de acreción, y durante el periodo 2020-2021 aumentó la sedimentación y disminuyó la erosión, con 35440 m² de acreción y de 23572 m² de retroceso (figuras 16A y 16B). Puntualmente, en las figuras 16A y 16B se

observa con mayor detalle la dinámica mencionada, donde los polígonos de color verde, asociados a sedimentación, aumentan en tamaño y longitud en comparación a los polígonos rojos asociados a erosión, desde el periodo 2019-2020 hasta el periodo 2020-2021.

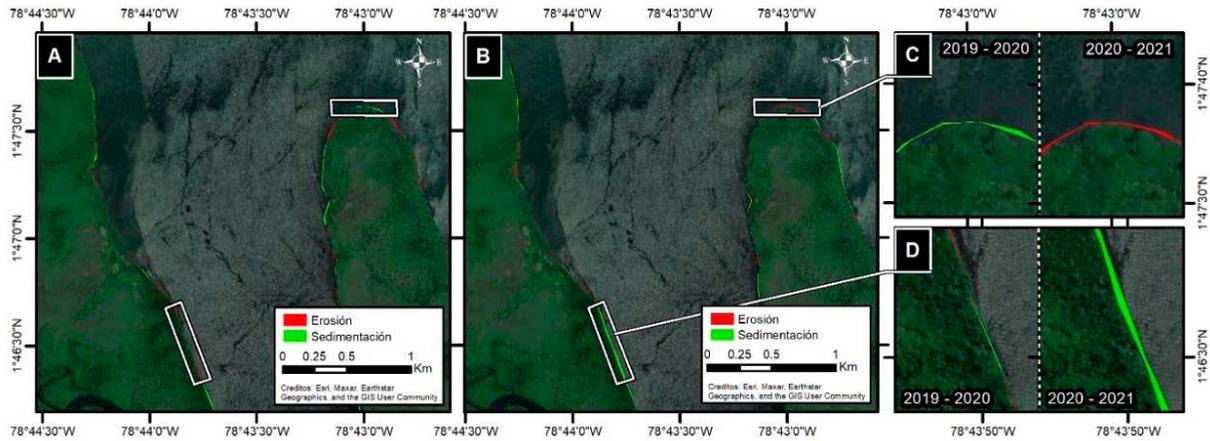


Figura 15. Áreas de erosión y sedimentación en la Zona 3. A) Periodo 2019-2020. B) Periodo 2020-2021. C) y D) Ampliación de un área específica para mejor visualización.

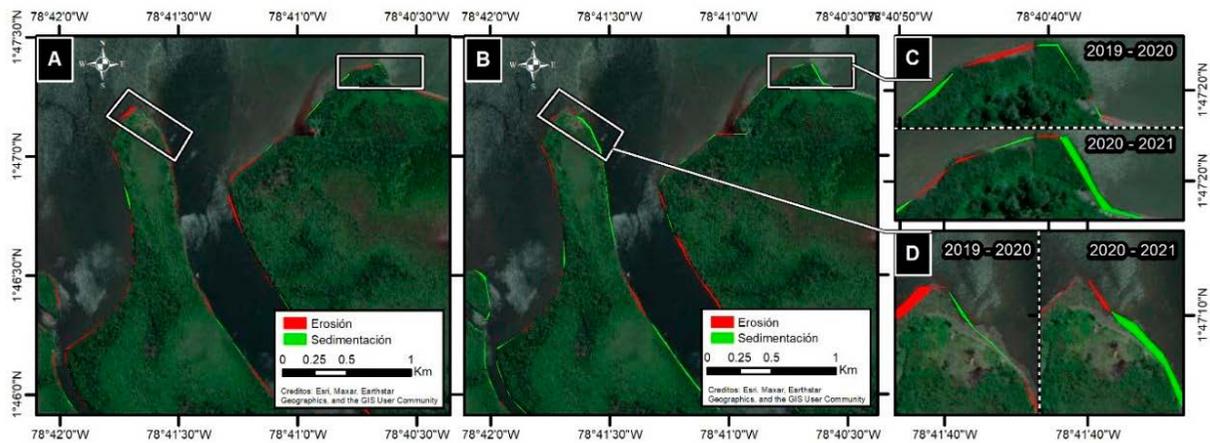


Figura 16. Áreas de erosión y sedimentación en la Zona 4. A) Periodo 2019-2020. B) Periodo 2020-2021. C) y D) Ampliación de un área específica para mejor visualización.

La Zona 5 corresponde a la desembocadura del estero Trapiche, en el cual se generaron áreas de acreción y retroceso a lo largo línea de costa; sin embargo, predominó el proceso de sedimentación durante los dos periodos analizados, con un total de 48457 m² de acreción y 28519 m² de retroceso (figuras 17A y 17B). En las figuras 17C y 17D se observa en el borde convexo de las curvas de dos meandros un cambio de procesos entre los dos

periodos analizados, inicialmente de tipo erosivo y finaliza con procesos de sedimentación para el periodo 2020-2021.

Producto de la interacción entre el mar y el sistema de esteros del río Mira, se puede describir la bahía de Tumaco con un comportamiento típico de zonas deltaicas, donde se evidenciaron sectores con cambios de acreción, retroceso y

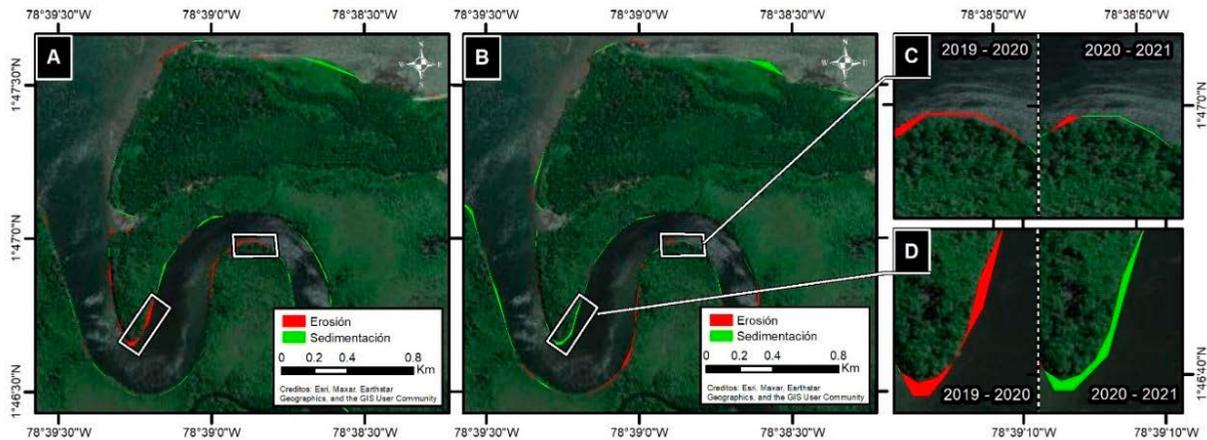


Figura 17. Áreas de erosión y sedimentación en la Zona 5. A) Periodo 2019-2020. B) Periodo 2020-2021. C y D) Ampliación de en un área específica para mejor visualización.

nulos o constantes, predominando los cambios ligados a la acumulación de sedimentos (Niño y Oviedo, 2018). En general, en las cinco zonas de estudio predominó el proceso de sedimentación, en las cuales el total de estas áreas fue de 80051 m² para el primer periodo y 128 356 m² para el segundo, con excepción de la Zona 4, en la cual durante el periodo 2019-2020 tomaron

fuerza los procesos erosivos y disminuyeron los de sedimentación (Tabla 3).

El comportamiento de los esteros fue similar al exhibido en La Barra, en la medida que avanzó el tiempo aumentó la cantidad de sedimentos depositados; probablemente debido al transporte de origen continental, como una de las fuentes aportantes en este sector.

Tabla 3. Datos de erosión y sedimentación en las cinco áreas de estudio.

Zona	Periodo 2019 - 2020		Periodo 2020 - 2021	
	Sedimentación (m ²)	Erosión (m ²)	Sedimentación (m ²)	Erosión (m ²)
1	15816	13003	29034	15575
2	16446	10002	11319	13600
3	16170	10027	24845	5921
4	10880	31828	35440	23572
5	20739	17595	27718	10560

Finalmente, se analizaron los datos de precipitación de la estación CCCP, teniendo en cuenta que el radio de acción de una estación pluviométrica es de 10 km aproximadamente y esta cubre la zona de estudio, ubicada a 2856 m y las desembocaduras de los diferentes esteros que convergen en la zona. Según el análisis presentado en Tejada *et al.* (2003), el fondo de la bahía de Tumaco está compuesto, principalmente, por sedimentos finos que varían entre arenas y lodos, de origen litoclástico (origen continental). La dinámica marina propone un

transporte de sedimentos en dirección al este, desde la desembocadura del río Mira hasta las islas de Tumaco, destacando los aportes que hace el río sobre la bahía como la fuente principal de sedimentos.

El transporte de sedimentos proveniente de la desembocadura del río Mira sigue afectando a las islas de Tumaco, modificando su morfología y, a su vez, el patrón de corrientes en sus alrededores, siendo este un sistema muy activo (Tejada, 2003). También se aprecia que, tanto en marea alta

como en baja, existe una tendencia a depositar sedimentos en la zona donde anteriormente se encontraba ubicada la isla del Guano (Tejada *et al.*, 2003).

Teniendo en cuenta la dinámica de la bahía de Tumaco, pueden generarse cambios en la sedimentación y/o erosión sobre el canal de

acceso al puerto de Tumaco. En este sentido, se agruparon las precipitaciones mensuales en los mismos periodos en los que se hicieron las comparaciones batimétricas y se analizó la relación entre la precipitación mensual, la sedimentación y erosión acumulada. La Tabla 4 presenta los valores acumulados para cada variable analizada en un periodo determinado.

Tabla 4. Periodos evaluados y acumulados de precipitación (estación CCCP), sedimentación y erosión.

Periodos	Precipitación acumulada (mm)	Sedimentación acumulada (m³)	Erosión acumulada (m³)
Feb. 2019-Sep. 2019	1604.9	123 894.0	100 172.0
Sep. 2019-Abr. 2020	1767.4	141 335.5	61007.5
Jul. 2020-Dic. 2020	442.2	146 038.2	88973.2
Dic. 2020-Mar. 2021	1325.9	84135.6	48796.4
Mar. 2021-Jun.2021	1473.6	71155.1	50368.2
Jun. 2021-Ago. 2021	728.3	55186.5	43172.4
Jul. 2020-Ago. 2021	3055.8	180 881.1	150 244.8

La relación entre la precipitación y la sedimentación acumulada en los periodos analizados mostró una tendencia positiva en la zona de estudio (Fig. 18) y una correlación entre las variables dada por R², que indica una influencia de la precipitación con el incremento de los sedimentos.

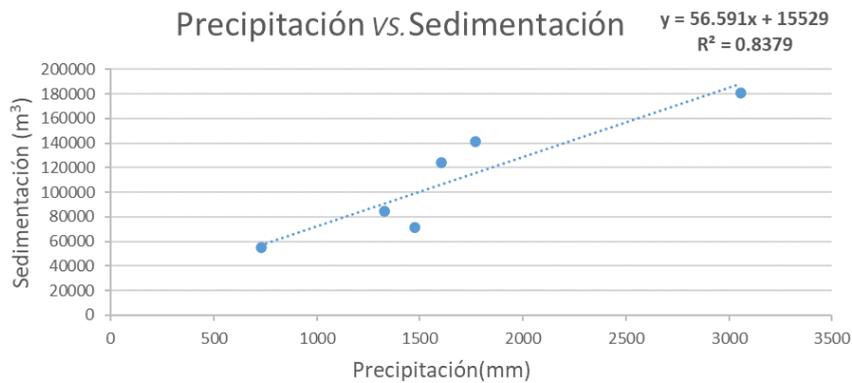


Figura 18. Precipitación acumulada (mm) vs. sedimentación acumulada (m³).

Se decidió excluir los valores de precipitación, erosión y sedimentación correspondientes al periodo de julio a diciembre de 2020 del análisis, debido a que presentaron un comportamiento anormal en comparación con los demás periodos. Durante estos cinco meses se observaron valores de sedimentación y erosión que fueron iguales o superiores a periodos más extensos. Este

comportamiento puede atribuirse al aumento en la velocidad de las corrientes en el canal de acceso, causado por la acción humana de la relimpia. Por lo tanto, se recomienda considerar la hidrodinámica y la variabilidad de las corrientes en la zona de estudio para futuras investigaciones, teniendo en cuenta este comportamiento antropogénico.

Al relacionar la precipitación y la erosión acumulada se observa un crecimiento positivo, la correlación entre las variables, dado por el valor R^2 , indica también una correspondencia alta entre las dos variables (Fig. 19). La correlación observada entre la precipitación con el incremento de sedimentación y la erosión permite describir

un factor influyente en la dinámica presente sobre la bahía de Tumaco; siendo la precipitación un componente significativo en la variación de la sedimentación sobre la bahía, pero también sobre un sitio crítico y de alto interés dentro del canal de acceso al puerto de Tumaco como es el sector de La Barra.

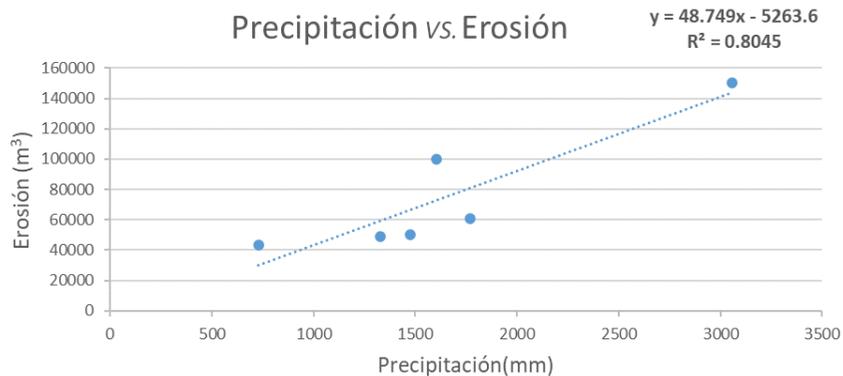


Figura 19. Precipitación acumulada (mm) vs. erosión (m³).

CONCLUSIONES

De acuerdo con la disponibilidad de datos batimétricos desde febrero del 2019 hasta agosto del 2021 se consideraron siete diferentes periodos de análisis, los cuales variaron entre dos, tres, cinco, siete y hasta trece meses, obteniendo valores estimados de sedimentación-erosión acumulada de 71155 m³- 50368 m³, 55187 m³ - 43172 m³, 84136 m³ -48796 m³, 146 038 m³ - 88973 m³, 123 894 m³ -100 172 m³, 141 336 m³ - 61008 m³ y 180 881 m³ -150 245 m³.

La relación estimada de los meses considerados 'X', con la tasa de sedimentación fue $Y = 17562X$ con un $R^2 = 0.9262$, la cual muestra una tasa de acumulación de sedimento que se incrementa con el transcurrir del tiempo. Además, se identifica que en el período más amplio, de trece meses, se alcanza una altura de 4.97 m sobre el diseño del canal que se considera un peligro para la navegación.

En relación con la tasa de erosión se obtuvo $Y = 12453X$ con un $R^2 = 0.9542$, siendo también proporcional en el tiempo, pero con una tasa de crecimiento menor al proceso de sedimentación.

Se identificó que el mayor valor de erosión sin intervención fue de 2.37 m, para el período más amplio considerado y este no afecta la navegación.

Al hacer un análisis cuantitativo de la sedimentación, sin considerar el período abril de 2020 a julio de 2020, en el cual hubo una intervención antrópica al comportamiento propio y natural del canal (proceso de dragado de relimpia), se estimó la sedimentación mensual para cada período y al promediarlas se obtuvo una tasa de 24409.0 m³/mes, sin considerar el período más amplio.

El trazado de las líneas de costa en diferentes temporalidades permitió reconocer cambios de erosión, sedimentación y estabilidad costera en las desembocaduras de los esteros cercanos al área de estudio. Esto permitió identificar sectores adicionales con influencia en procesos de sedimentación, producto del aporte de sedimentos continentales, típicos de la dinámica natural de un sistema deltaico, los cuales probablemente también se depositen sobre el canal de acceso al puerto. Sin embargo, se recomienda utilizar imágenes satelitales o fotografías aéreas con resolución de detalle y una mayor temporalidad para calcular la correlación numérica entre los

volúmenes acumulados de sedimentación y erosión del sector La Barra, las precipitaciones y las tasas de erosión y sedimentación en los esteros.

Según fuentes consultadas, la dinámica sedimentológica sobre la bahía de Tumaco depende de factores como el oleaje, las corrientes y la morfología del lugar, entre otros. Este análisis permitió adicionar la precipitación a la lista de variables que producen un cambio en la sedimentación y erosión sobre la zona de estudio en el canal de acceso al puerto de Tumaco, observándose una relación aproximadamente lineal entre la acumulación de sedimentos y la precipitación dada por $S = 56.591p + 15529$, y una relación entre la erosión acumulada y la precipitación dada por $E = 48.749P - 5263.6$, ambas con un $R^2 = 0.8$. Esto indica que con el incremento de las precipitaciones aumenta el flujo en las vertientes y también los sedimentos en suspensión que arrastran los ríos y que, finalmente, convergen cerca de la zona de estudio.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a los integrantes del Área de Manejo Integrado de Zona Costera – Sección de Levantamientos Batimétricos del CCCP; especialmente a Carlos Ruz, Laureano Sarmiento, Juan Sanabria, José Munir de la Rosa y los tripulantes de la ARC “Cascajal”, por su acompañamiento y apoyo durante la fase de campo para la adquisición de datos batimétricos; a David Padilla por su apoyo durante la fase de procesamiento.

FUENTE FINANCIADORA

Este trabajo fue realizado con aportes financieros del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico (CCCP) de la Dirección General Marítima (Dimar).

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: Y. C. C., C. A. A. y A. M. M.; metodología: Y. C. C., C. A. A., A. M. M. y P. A. Q.; software: Y. C. C., C. A. A., A. M. M. y P. A. Q.; validación: Y. C. C., C. A. A., A. M. M. y P. A. Q.; análisis: Y. C. C., C. A. A., A. M. M. y P. A. Q.; investigación: Y. C. C., C. A. A. y A. M. M.; curación de datos: Y. C. C., C. A. A., A. M. M.

y P. A. Q.; redacción-preparación del borrador original: Y. C. C., C. A. A. y A. M. M.; redacción-revisión y edición: Y. C. C., C. A. A., A. M. M. y P. A. Q.; visualización Y. C. C., C. A. A., A. M. M. y P. A. Q. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Álvarez, M.; Pulido, D.; Solano, L.; Oviedo, F. (2018). Construcción de la superficie hidrográfica de referencia vertical para las bahías de Buenaventura y Málaga, Pacífico colombiano. *Bol. Cient. CIOH*, 36: 53-69. <https://doi.org/10.26640/22159045.438>
- BAGGERWERKEN DECLOEDT & ZN|Colombia. (2020). *Dagrado de mantenimiento del Canal de Acceso al Puerto de Tumaco, en el departamento de Nariño*. Zoon N.V Sucursal Colombia: DEME, Creating land for the future.
- Barajas, S.; García, M. (2014). *Variación decadal de batimetrías dentro del canal de tránsito marítimo de Tumaco y su relación con parámetros oceanográficos*. Cartagena de Indias: Escuela Naval de Cadetes “Almirante Padilla”.
- Bermúdez, C.; Álvarez, M.; Niño, D. (2014). Caracterización de la geomorfología costera y sus coberturas vegetales asociadas, a través de sensores remotos, en la costa de Tumaco, Nariño. *Bol. Cient. CIOH*, 32: 27-46. <https://doi.org/10.26640/22159045.262>
- Castañeda, D. J. (2017). Análisis de la línea de costa en el municipio de Buenaventura (Valle del Cauca, Colombia). Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Ceballos, J. D. (2011). Modelación hidráulica y morfodinámica de cauces sinuosos aplicación a la quebrada La Marinilla (ANT). *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 30: 107-118.
- Cifuentes, J. L.; Torres, M. P.; Frías, M. (1997). *El océano y sus recursos II. Las ciencias del mar: oceanografía geológica y oceanografía química. 2ª Edición*. México, D. F.: Fondo de cultura económica.
- Cifuentes, C.; Mejía, G. (2015). Sedimentación en la bahía de Cartagena un impacto

- socioeconómico. *Dictamen Libre, Barranquilla Colombia*. <https://doi.org/10.18041/2619-4244/dl.16.3065>
- Collot, J.; Sallares, V.; Pazmiño, N. (2009). Geología y geofísica marina y terrestre del Ecuador desde la Consta Continental hasta las Isalas Galápagos. París: IRD – Institut de Recherche pour le Développement /INOCAR – Instituto Oceanográfico y Antártico de la Armada del Ecuador.
- Corporación Autónoma Regional de Nariño. (2007). Zonificación y codificación de cuencas hidrográficas en el departamento de Nariño. Corponariño.
- Correa, I.; González, J. (1989). Geomorfología general y sedimentología de la bahía de Tumaco. Instituto Nacional de Investigaciones Geología y Minería. Convenio Ingeominas-CCCP-Progog.
- Dirección General Marítima. (2011). Resolución No 157 de 2011 de Dimar. Por la cual se fijan las especificaciones técnicas para la realización de levantamientos hidrográficos y generación de información batimétrica en los espacios marítimos y fluviales colombianos bajo la jurisdicción de Dimar. https://www.dimar.mil.co/sites/default/files/res_1572011.pdf
- Dirección General Marítima. (2021). Resolución No 0693-2021 MD-Dimar-Subdemar-Ginsem-Arinv 3 de agosto de 2021. (pág. 2). Bogotá.
- ESRI. (2016). ¿Qué es una superficie TIN?. ArcGIS Desktop. Obtenido de <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/manage-data/tin/fundamentals-of-tin-surfaces.htm>
- Gómez, J.; Peñaranda, J. (2012). Descripción del comportamiento de variables atmosféricas y oleaje en el Puerto de Tumaco a partir de observación de datos. *Bol. Cient. CIOH*, 30: 75-92. <https://doi.org/10.26640/22159045.244>
- Guido, P.; Ramírez, A.; Godínez-Orta, L.; Cruz-León, S.; Juárez-León, A. (2009). Estudio de la erosión costera en Cancún y la Riviera Maya, México. *Avances en recursos hidráulicos*, 20: 41-55.
- Niño, D.; Oviedo, F. (2018). Determinación de la variación morfológica costera de la Bahía de Tumaco, a partir de análisis multitemporal de sensores remotos. *Bol. Cient. CIOH*, 36:71-86. <https://doi.org/10.26640/22159045.439>
- Nivia, A.; Pérez, C.; Sepúlveda, J. (2003). Geomorfología y geología de la Plancha 383 Tumaco. Cali: Ingeominas.
- Pulido, D.; De Lisa, A.; David; D.; Guzmán, R. (2013). Determinación de los datums de referencia vertical con fines hidrográficos para la Bahía de Cartagena. *Bol. Cient. CIOH*, 31: 175-190. <https://doi.org/10.26640/22159045.258>
- Restrepo, J. D. (2005). *Los sedimentos del río Magdalena: reflejo de la crisis ambiental*. Medellín, Colombia: Fondo Editorial Universidad EAFIT.
- Restrepo, J. C.; Otero, L.; López, S. (2009). Clima de oleaje en el Pacífico Sur de Colombia, delta del río Mira: Comparaciones estadísticas y aplicaciones a procesos costeros. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 33: 339-357.
- Rojas, D.; Rodríguez, H.; Uribe, S.; Osorio, L.; Iregui, P.; Pérez, N.; Pedroza, W.; Vega-Barbosa, G.; León, H.; Monroy, J.; Grisales, C.; Delgado, N.; Medina, O.; Rivera-Páez, S. (2018). *Intereses de Colombia en el mar: reflexiones y propuestas para la construcción de un país marítimo*. Bogotá: Escuela Superior de Guerra: Samuel Rivera Páez.
- Survey, U. S. (2021). Earth Explorer. Obtenido de <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- Tejada, C. (2003). *Clima marítimo y dinámica litoral de la bahía de Tumaco, datos básicos para la evaluación de riesgos ambientales marinos*. *Bol. Cient. CCCP*, 10: 67-76. https://doi.org/10.26640/01213423.10.67_76
- Tejada, C.; Otero, L.; Castro, L.; Afanador, F.; Devis, A.; Solano, J.; Fonseca, A. (2003). *Aportes al entendimiento de la bahía de Tumaco*. Entorno oceanográfico, Costero y de Riesgos. Colombia: Dimar.

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA

Cruceros oceanográficos sobre una infraestructura de datos espaciales. Caso de estudio Colombia

Oceanographic cruises within a spatial data infrastructure. Colombia case study

DOI: <https://doi.org/10.26640/22159045.2023.615> Fecha de recepción: 2023-05-18 / Fecha de aceptación: 2023-07-18

Ruby Viviana Ortiz-Martínez¹, Diana Paulina Castañeda Rodríguez², Moisés Abraham Santizo Fuentes³

CITAR COMO:

Ortiz-Martínez, R.; Castañeda, D. P.; Santizo, M. A. (2023). Cruceros oceanográficos sobre una infraestructura de datos espaciales. Caso de estudio Colombia. *Bol. Cient. CIOH*, 42(1): 27-38. ISSN en línea 2215-9045. DOI: <https://doi.org/10.26640/22159045.2023.615>

RESUMEN

Los cruceros oceanográficos y, en general, las expediciones científicas en el mar, constituyen un importante aporte a la memoria histórica de los inicios y evolución de la investigación científica marina; y en el marco del Decenio de las Ciencias Oceánicas, el acceso a los datos recopilados durante décadas apoyan el desarrollo sostenible del océano. Por esta razón, desde el Centro Colombiano de Datos Oceanográficos se llevó a cabo un proceso de arqueología y recuperación de datos e información de los cruceros oceanográficos realizados en el Pacífico y Caribe colombianos desde 1969 hasta el 2020. Posteriormente, se estructuró la información en la base de datos geográfica denominada Infraestructura de Datos Espaciales Marítima, Fluvial y Costera de Colombia. Además, se documentaron metadatos bajo un perfil del estándar ISO 19115 implementando buenas prácticas internacionales, y se desarrolló una aplicación software para facilitar la búsqueda de información geográfica y acceso abierto a las mediciones realizadas en sitio. Como resultado se dispuso la información de 130 cruceros oceanográficos (1969-2020), se recuperaron 96 informes técnicos de cruceros, se reconstruyeron 87 rutas de buques de investigación y se publicaron 130 metadatos, con la posibilidad de seguir alimentando el sistema con nuevos cruceros y expediciones científicas.

PALABRAS CLAVES: buque de investigación, reportes de expedición, datos oceanográficos, sistemas de información geográfica.

ABSTRACT

Oceanographic cruises and scientific expeditions at sea in general, constitute an important contribution to the historical memory of the beginnings and evolution of marine scientific research, and within the framework of the Decade of Ocean Science, access to the data collected for decades support sustainable ocean development. For this reason, the Colombian Center for Oceanographic Data carried out a process of archeology and recovery of data and information from oceanographic cruises carried out in the Colombian Pacific and Caribbean from 1969 to 2020. Subsequently, the information was structured in a geographic database of the national Maritime, Fluvial and Coastal Spatial Data Infrastructure. In addition, metadata was documented under a profile of the ISO 19115 standard, implementing good international practices, and a software application was developed to facilitate the search for geographic information and open access to measurements made on site. As a result, information from 130 oceanographic

¹ Orcid: 0000-0003-0264-6254. Administradora Cecoldo de la Dirección General Marítima. Carrera 54 No. 26-50, edificio Dimar, CAN. Correo electrónico: rortiz@dimar.mil.co

² Orcid: 0000-0002-8848-2600. Dirección General Marítima. Subdirección de Desarrollo Marítimo de la Dimar. Carrera 54 No. 26-50, edificio Dimar, CAN. Correo electrónico: dcastanedar@dimar.mil.co

³ Orcid: 0009-0006-8986-7365. Investigadora Universidad Nacional de Colombia. Correo electrónico: masantizof@unal.edu.co



cruises (1969-2020) was available, 96 technical cruise reports were recovered, 87 track charts were reconstructed, and 130 metadata were published, with the possibility of continuing to feed the system with new cruises and scientific expeditions.

KEYWORDS: *Research vessels. Expedition reports. Oceanographic data. Geographic information systems.*

INTRODUCCIÓN

Entre 1969 y 1970 se efectuaron los primeros cruceros oceanográficos en el Caribe y Pacífico colombianos a bordo del buque ARC "San Andrés", a partir de la necesidad de adelantar un programa de investigación oceanográfico en el marco de la entonces Comisión Colombiana de Oceanografía, teniendo en cuenta la importancia científica y económica de los litorales del país, buscando conformar una infraestructura básica que contribuyera al conocimiento y a la explotación técnica y racional de los recursos del océano; todo esto basado en una estrecha coordinación de instituciones nacionales y la cooperación de organismos internacionales (ARC, 1970, 1971). Otros países de la región también iniciaron sus operaciones oceanográficas de envergadura para la misma época, como es el caso de Chile en 1960, utilizando la antigua corbeta Chipana de la Armada de Chile (Sievers, 2017), y Perú, que entre 1958 y 1963 inició un programa intensivo de monitoreo de las condiciones marinas hasta 150 millas de la costa a bordo del buque BAP "Bondy" (Zuta y Flores, 1980).

Todas estas actividades se desarrollaron en un contexto global bajo la coordinación de la Comisión Oceanográfica Intergubernamental (COI) de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (Unesco), a través del programa para el Intercambio Internacional de Datos e Información Oceanográfica, que implementó a finales de la década de 1960 un sistema de programas oceanográficos nacionales y el Informe de Observaciones/Muestras Recolectadas por Programas Oceanográficos (ROSCOP, por sus siglas en inglés), como una forma de compartir información sobre los cruceros de investigación planificados y realizados (Rickards, 2007).

El ROSCOP fue concebido en sus inicios como un inventario de primer nivel para el seguimiento de las mediciones y las muestras recopiladas en el mar a bordo de los buques de investigación, representando la mayoría de las disciplinas de

datos tales como oceanografía física, química y biológica, geología y geofísica marina, pesca, contaminantes marinos y meteorología marina. A finales de la década de 1980, el Consejo Internacional para la Exploración del Mar (ICES, por sus siglas en inglés) lideró la digitalización de informes de crucero disponibles en soporte papel, y fue pionero en el desarrollo de una base de datos para administrar esta información (Rickards, 2007).

Tras una amplia revisión, en 1990 el Informe Resumido de Crucero (CSR, por sus siglas en inglés) sucedió al formulario ROSCOP y, aunque fue una iniciativa desarrollada para los países miembros de ICES, se extendió a otros que deseaban enviar su información (Rickards, 2007). En Europa esta actividad cobró un nuevo impulso en el marco del desarrollo de la infraestructura SeaDataNet entre 2006 y 2011. Recientemente, la tarea fue asumida por el Instituto Francés de Investigación para la Explotación del Mar (IFREMER, por sus siglas en francés), aún en el marco de SeaDataNet, y la base de datos CSR combinada de ICES y SeaDataNet, contiene información de cruceros de investigación oceanográfica, principalmente de Europa y otras regiones del mundo (POGO, 2023). En esa misma línea, la Asociación para la Observación del Océano Global estableció una base de datos que comprende buques de investigación en mar abierto operados por institutos en todo el mundo (Rickards, 2007).

Cabe resaltar que el CSR hace parte de la estrategia de gestión de datos en todo su ciclo de vida. Sus aportes incluyen desde el plan de gestión de datos, hasta que los datos recopilados son accesibles (no solo por sus metadatos, sino también para el descubrimiento, es decir la extracción y análisis de datos de diferentes fuentes), de modo que se justifique el alto costo de la expedición (Che-Bohnenstengel y Nast, 2013). Por ello, en los últimos años ha habido gran interés en los países de Latinoamérica y el Caribe por contar con bases de datos relacionadas con buques y expediciones científicas.

En Colombia surgen varias necesidades alrededor de la gestión de cruceros oceanográficos. En este sentido, la Infraestructura Europea para la Gestión de Datos Oceánicos y Marinos 'SeaDataNet' brinda herramientas basadas en estándares y buenas prácticas internacionales, relacionadas con su experiencia en la gestión de CSR. Para ello, utiliza un modelo de datos geospaciales diseñado específicamente para la comunidad de sistemas de información geográfica (SIG) marina, desarrollado por investigadores de la Universidad Estatal de Oregon, la Universidad de Duke, la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés), el Instituto Hidrológico Danés y Environmental Systems Research Institute (ESRI), denominado 'Arc Marine' (Serpa y Wright, 2005) e implementado sobre la Infraestructura de Datos Espaciales (IDE) Marítima, Fluvial y Costera de Colombia como un sistema informático integrado por un conjunto de recursos (catálogos, servidores, programas, aplicaciones, etc.) que permite el acceso y la gestión de conjuntos de

datos y servicios geográficos disponibles en la red. Adicionalmente, cumple una serie normas, estándares y especificaciones que regulan y garantizan la interoperabilidad de la información geográfica (Iniesto y Núñez, 2020) para la administración de datos abiertos del Centro Colombiano de Datos Oceanográficos (Cecoldo), los cuales permiten en conjunto implementar una solución para contribuir con las necesidades de gestión de este tipo de información en el país.

ÁREA DE ESTUDIO

En la Figura 1 se aprecia el área de estudio cubierta por los cruceros y las expediciones científicas en el mar realizadas por Colombia bajo la coordinación o con participación de la Dirección General Marítima (Dimar). En el Caribe comprende el territorio marítimo colombiano entre los 11°00'00" N y 16°00'00" N y 71°00'00" O y 82°00'00" O, sobre el cual se han desarrollado cruceros oceanográficos en el marco de iniciativas tales como 'Océano',

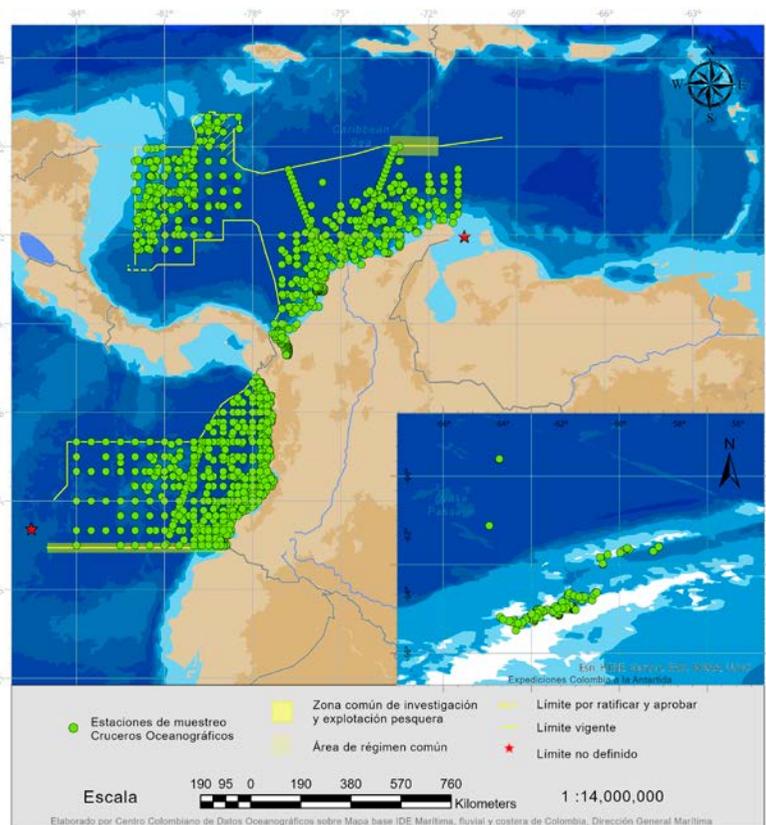


Figura 1. Ubicación de las estaciones de muestreo de los cruceros oceanográficos (1970-2020) disponibles en el Cecoldo.

programa de Investigaciones Cooperativas del Caribe y Regiones Adyacentes, 'Caribe', 'Golfo de Urabá', 'Guajira', 'Islas del Rosario', 'San Andrés Islas', 'Sistema de Pronóstico Oceanográfico y Atmosférico', investigaciones pesqueras y, la más reciente, 'Expedición Científica Seaflower'. De otro lado, en el Pacífico colombiano los cruceros oceanográficos comprenden el área entre los 01°20'00" N y 07°10'00" N y 77°00'00" O y 84°00'00" O, desde 1970 y hasta hoy en el marco de iniciativas tales como Estudio Regional del Fenómeno El Niño 'Erfen', 'SPOA', investigación pesquera y la 'Expedición Científica Pacífico'.

En el marco del Programa Antártico Colombiano, desde el verano austral de 2014-2015, Colombia ha participado en expediciones a la Antártica a través de diversos proyectos de

investigación en la región. Específicamente en el estrecho de Gerlache, entre los 63°56'43" S a 64° 59'29" S y los 61°24' 33" O a 63°57'09" O.

METODOLOGÍA

La metodología aplicada integró estándares y buenas prácticas internacionales de diferentes disciplinas y se desarrolló en tres fases (Fig. 2). Para la arqueología y recuperación de información sobre los cruceros oceanográficos se aplicó la metodología propuesta por Hernández, Ortiz y Suárez (2007), la cual parte de la base conceptual del proyecto *Global Oceanographic Data Archeology and Rescue*, enfocado a incrementar los archivos digitales oceanográficos históricos para que sean incluidos en bases de datos accesibles a la comunidad mundial (IOC, 1993).

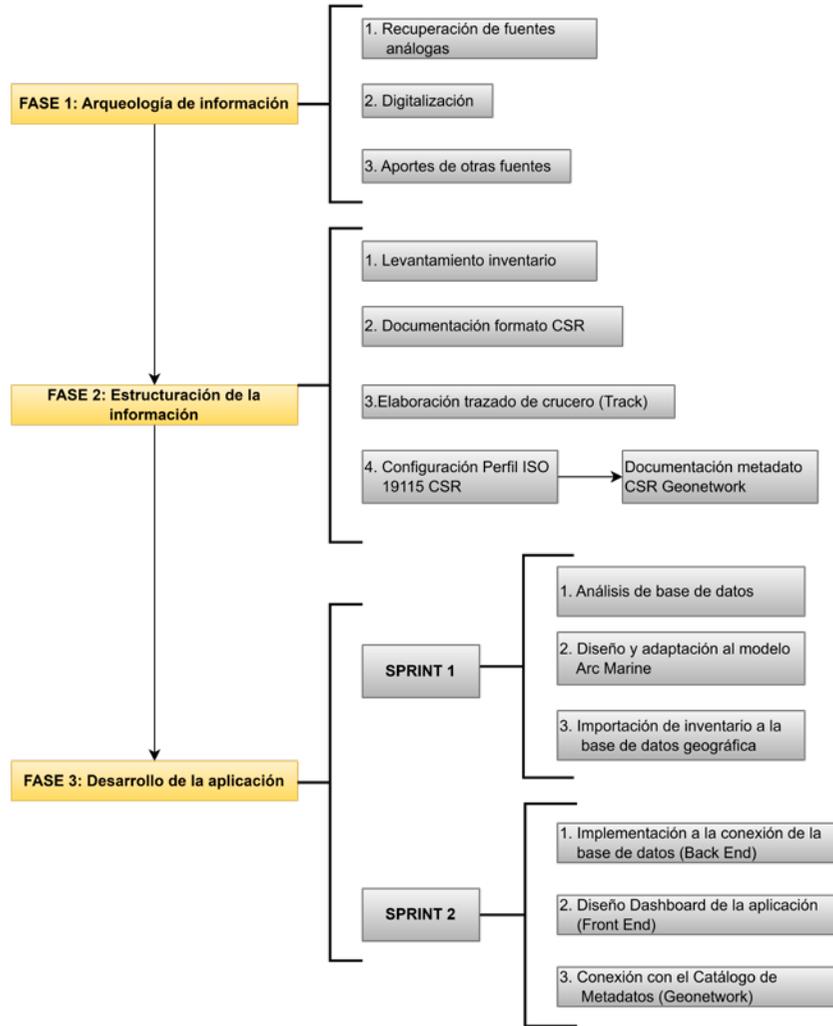


Figura 2. Resumen metodológico aplicado en el caso de estudio.

Una vez obtenidos los archivos digitales, se utilizó el formulario CSR para reunir la información requerida y se procedió a elaborar cada una de las cartas de derrota⁴ o track en una plantilla estandarizada de la Autoridad Marítima Colombiana (Dimar); para este último se tomó la información de los mapas disponibles en los informes técnicos de crucero oceanográfico y su correlación con la información geográfica y temporal disponible en los archivos de datos recopilados.

En los casos en que no fue posible recuperar la carta de derrota, debido a que no fue incluida en el informe técnico de crucero oceanográfico, se realizó la reconstrucción del recorrido del buque basado en los registros de fecha, hora y coordenadas geográficas de los datos recopilados en el sitio, trazando un aproximado del recorrido del buque por cada una de las estaciones de muestreo. Este proceso se inició en hojas de cálculo, incluyendo la calificación de la información pública (reservada o clasificada) en aplicación de la Ley 1712 de 2014 de Colombia: "Por medio de la cual se crea la Ley de Transparencia y del Derecho de Acceso a la Información Pública Nacional y se dictan otras disposiciones". Esta información fue importada a ArcGIS Pro para realizar la georreferenciación de las estaciones de muestreo. Posteriormente, el trazado de la ruta del buque fue realizado con la herramienta Puntos a Línea y, finalmente, la información fue almacenada en una GeoDataBase (GDB).

Para la captura de metadatos se configuró en la herramienta de catálogo Geonetwork Open Source el perfil del estándar ISO 19115 SeaDataNet CSR, recomendado en el volumen 5 de "Ocean Data Standards" (IOC,2021). Para la implementación de la aplicación geográfica se utilizó la metodología ágil de desarrollo de software denominada Scrum, con un total de dos *sprints* o procesos de trabajo que incluyeron tanto el componente de bases de datos como el de software. Como producto del primer *sprint* se obtuvo la GDB implementada a partir del modelo Arc Marine de ESRI sobre la IDE Marítima, Fluvial y Costera de Colombia; y en el segundo *sprint* se diseñó el visor geográfico utilizando la herramienta *dashboard* de ArcGIS Online, para la configuración

de los filtros de búsqueda geográfica y temática, visualización de contenidos y conexión con el catálogo de metadatos Geonetwork.

RESULTADOS

Fase I. Arqueología de información

La arqueología de datos e información se realizó a partir de los resultados del proyecto 'Posicionamiento estratégico del Centro Colombiano de Datos Oceanográficos' (2015-2017), financiado por la Dimar. Una vez identificadas las fuentes de información, se desarrolló en sitio el manejo documental en soporte papel, siguiendo las recomendaciones del Archivo General de la Nación (AGN). La digitalización estuvo enfocada en recuperar: (i) los informes de cruceros oceanográficos; (ii) las planillas con datos oceanográficos y de meteorología marina; (iii) los artículos científicos, publicaciones especiales y la literatura gris relacionada.

Asimismo, se realizó una búsqueda de información en soporte electrónico tales como: servidores, computadores, discos duros externos, diskettes o cualquier medio de almacenamiento para complementar la información digitalizada. De esta manera se recuperaron 96 archivos de informes técnicos (finales o preliminares) de 130 cruceros oceanográficos y expediciones científicas desarrolladas entre 1969 y 2020 por la Armada de Colombia (ARC) y la Dimar, 35 cartas de derrota, ocho CSR y la mayor cantidad de datos reportados en los informes técnicos, con excepción de los recopilados por instituciones invitadas a los cruceros.

Fase II. Estructuración de información

A partir del contenido de los informes técnicos y validado este con la información geográfica y temporal de los datos recopilados en campo, se diligenciaron 122 formatos CSR y se registraron en el Formato Único de Inventario de Cruceros Oceanográficos y Expediciones Científicas del Cecoldo.

Ya que el 67 % de los informes técnicos de crucero no contaba con carta de derrota, fue

⁴ La Autoridad Marítima Colombiana define "derrota" como la representación de la navegación que debe hacerse, y en efecto se hace, para ir de un punto a otro teniendo para ello que seguir uno o varios rumbos. La "carta de derrota" representa justamente la trayectoria descrita por una embarcación.

necesario llevar a cabo la reconstrucción del recorrido de cada uno de estos cruceros a partir de las mediciones oceanográficas y meteorológicas. Los datos clave para reconstruir el trazado de ruta fueron fecha, hora y coordenadas geográficas de las estaciones de muestreo, especialmente los registrados con las mediciones de temperatura y salinidad de la columna de agua obtenidas con un perfilador de conductividad, temperatura y profundidad (CTD, por sus siglas en inglés), que generalmente es lanzado en todas las estaciones, o con los datos de la estación meteorológica con registros automáticos a bordo del buque.

Los datos clave se organizaron en una hoja de cálculo y se importaron a ArcGIS Pro, donde se georreferenciaron las estaciones de muestreo y se realizó el trazado de la ruta del buque. Al finalizar este geoproceto se obtuvo un conjunto de polilíneas denominadas tracks, cuyos atributos posteriormente se ajustaron al modelo Arc

Marine. Como resultado se georreferenciaron 6536 estaciones de muestreo, con un aproximado de 160 599 millas náuticas recorridas en 130 cruceros oceanográficos y/o expediciones científicas en el mar, y se trazaron 116 tracks de cruceros para 87 cartas de derrota, teniendo en cuenta que un crucero oceanográfico puede tener más de un área de estudio y por tanto más de un trazado (track).

Como ejemplo, en la Figura 3 se aprecia la carta de derrota originalmente encontrada en el informe técnico del Crucero Pacífico XXVIII / ERFEN XXVI de 1997 y la carta de derrota reconstruida en la presente investigación. Cabe destacar que no fue posible reconstruir la carta de derrota de 12 cruceros oceanográficos, esto debido a que no se contó con información suficiente relacionada con la fecha, hora y coordenadas geográficas de las estaciones de muestreo, lo que impidió realizar el trazado de ruta del buque.

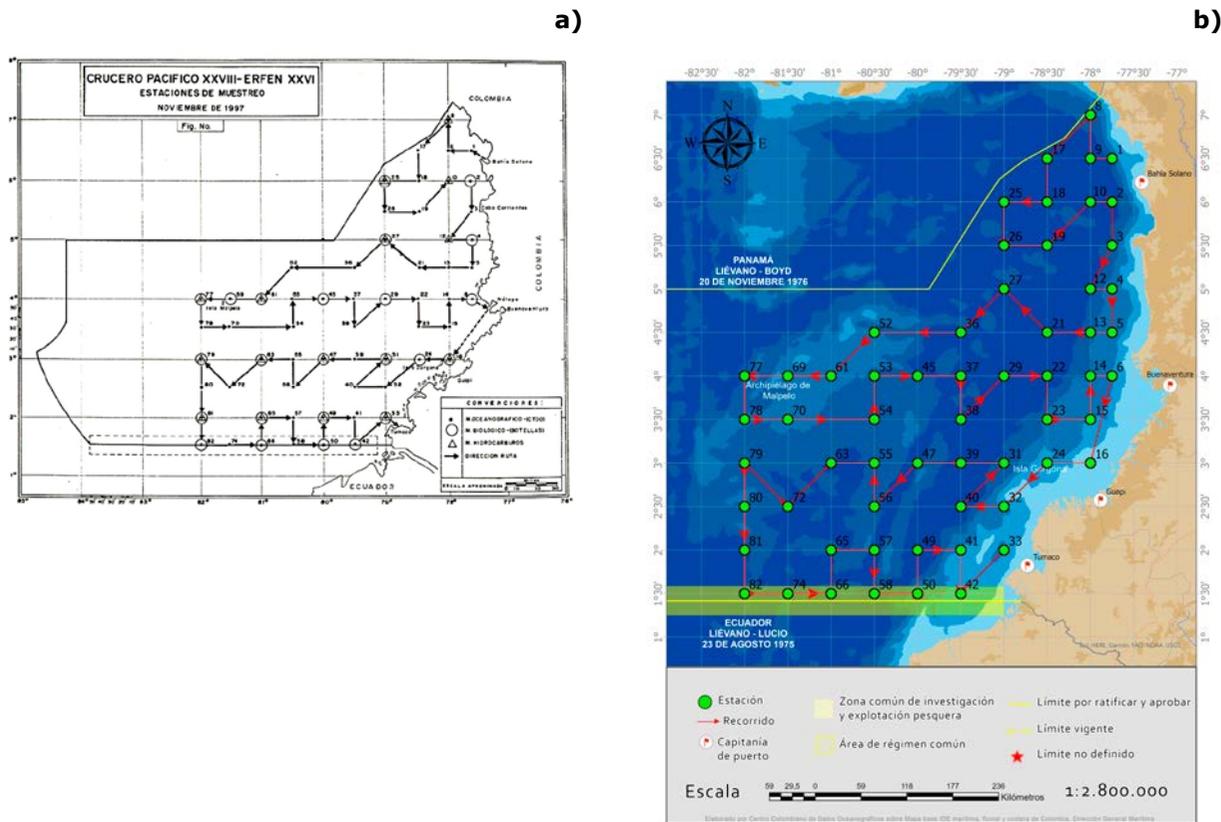


Figura 3. Carta de derrota original (a) y reconstruida (b) del Crucero Pacífico XXVIII / Erfen XXVI de 1997.

Por último, se configuró en la herramienta de catálogo Geonetwork Open Source adaptada por el Cecoldo, el perfil del estándar ISO 19115 SeaDataNet CSR y la codificación en el lenguaje de marcado extensible XML versión 5.2.0 disponible en SeaDataNet (2020). Posteriormente, se llevó a cabo la captura de 130 metadatos a partir de la información documentada en el formato CSR y 118 muestras gráficas de cartas de derrota. Para los trazados que no se lograron reconstruir se cargó una muestra gráfica con las estaciones de muestreo.

Fase III: Desarrollo de la aplicación

Esta fase inició con el diseño de la base de datos a partir del modelo Arc Marine de ESRI implementado en la IDE Marítima, Fluvial y Costera de Colombia. Para esto se consideró que este es un modelo genérico que puede ser utilizado como bloque de construcción central para el desarrollo de clases con las características propias de aplicaciones costeras y marinas (Wright *et al.*, 2007). Para el presente estudio de caso se adaptaron las clases asociadas con la información

del inventario de cruceros oceanográficos, el trazado de ruta del buque y las estaciones de muestreo.

La GDB resultante se compone de cuatro tablas alfanuméricas (color verde) del esquema original de Arc Marine, que almacenan la información básica relacionada con cada crucero oceanográfico (fecha de salida, fecha de llegada, nombre del buque, trazado de ruta, etc.) y dos tablas auxiliares (color rojo) para atender requisitos específicos del CSR, tales como la descripción del buque y el Identificador Único de Metadato (UUID, por sus siglas en inglés) que asigna GeoNetwork para cada metadato documentado. Adicionalmente, se implementaron dos capas geográficas que almacenan la geometría de los tracks (tipo línea) y las estaciones de muestreo (tipo punto). Las especificaciones de los atributos de cada clase y demás características fueron documentadas en el diccionario de datos de la aplicación geográfica. Para finalizar, se importó la información de inventario a la tabla Cruise y se validaron las relaciones establecidas en el modelo Entidad-Relación (E-R) (Fig. 4).

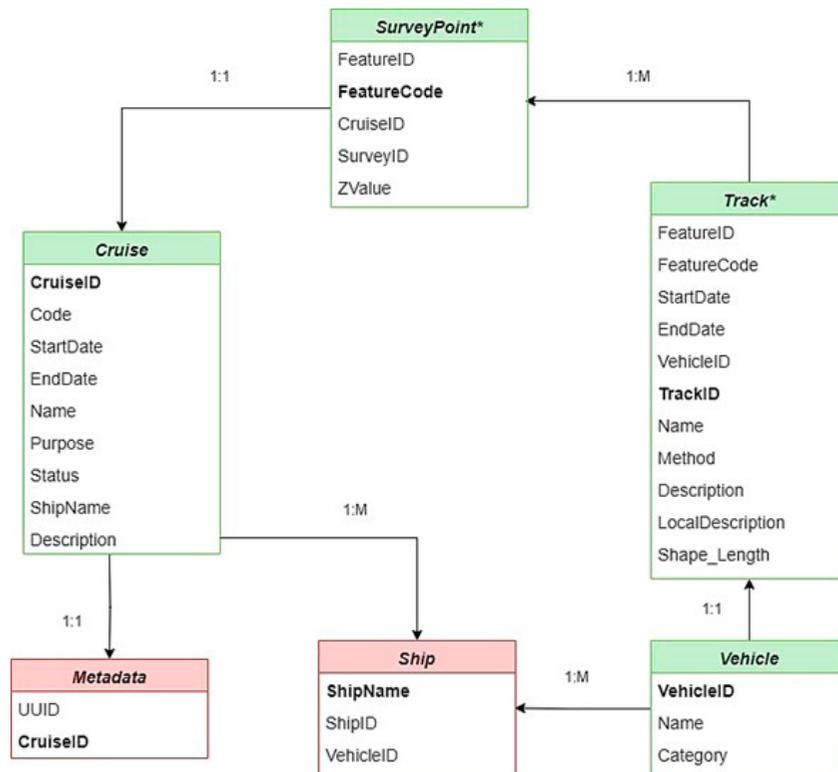


Figura 4. Modelo E-R Arc Marine adaptado para la GDB.

Esta fase concluyó con el desarrollo de la aplicación geográfica que permitió reunir los contenidos del CSR, es decir, la información almacenada en el modelo Arc Marine con la información geográfica y alfanumérica, y la conexión con el catálogo de metadatos Geonetwork. Para ello, con el apoyo de la IDE Marítima, Fluvial y Costera de Colombia se inició el proceso cargando la GDB a su plataforma y estableciendo los parámetros de conexión para la publicación de la información.

A continuación y a partir de un *dashboard* (tablero de trabajo) de ArcGIS *On line* se configuró la interfaz de usuario (*Front End*) de la aplicación geográfica, incluyendo la visualización de la tabla de datos (*Dataframe*) en el mapa base institucional de la Dimar con los tracks de los cruceros (Fig. 5). Asimismo, se configuró una vista con los datos de la GDB de los CSR del Cecoldo, que incluye el atributo del UUID de cada metadato, para que el usuario pueda acceder a información detallada del crucero oceanográfico (metadato) y a descargar los datos abiertos relacionados en el catálogo Geonetwork.

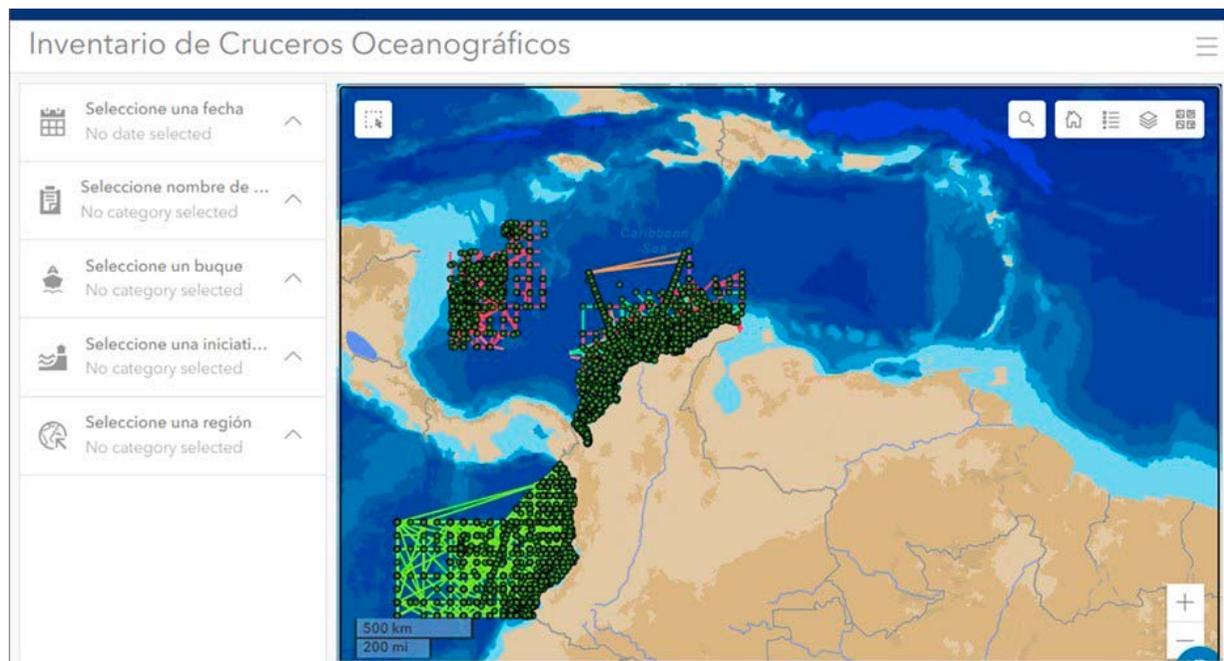


Figura 5. Aspecto de la interfaz de usuario para la búsqueda de CSR.

DISCUSIÓN

El proceso de arqueología y recuperación de información de cruceros oceanográficos de Colombia permitió reunir y estructurar contenido relevante para el CSR, pero también reveló vacíos de información histórica sobre los cruceros; esto asociado probablemente a que se abandonó la buena práctica de documentar el ROSCOP, evidenciado en los informes técnicos de los cruceros desarrollados en el Pacífico colombiano por parte del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas de la entonces Dirección General Marítima y Portuaria en los 90 (CIOH, 1993).

Justamente para finales de la década del 90 se encontró una correlación de esta buena práctica con las iniciativas del Pacífico Sudeste, las cuales fueron apoyadas por el programa *Tropical Ocean Global Atmosphere* (TOGA) que contribuyó con los objetivos del Estudio Regional del Fenómeno El Niño (Erfen), en el marco de los cruceros regionales conjuntos de la Comisión Permanente del Pacífico Sur (CPPS) (CPPS, 2000).

Es así como la fase de recuperación de información permitió identificar el déficit de registros necesarios para reportar la totalidad de los elementos que componen el inventario global de cruceros y expediciones en el mar, por lo que

en la actualidad es imperiosa la necesidad de retomar esta buena práctica internacional para contribuir, no solo haciendo uso de catálogos en línea, sino también incorporando el formato original del CSR a los informes técnicos oficiales, ya que este último constituye un importante aporte a la memoria histórica de los cruceros oceanográficos y de otras actividades, tales como dispositivos que se hayan instalado, lanzado y/o recuperado durante esta iniciativa.

Por otra parte, IOC (2019a) recomienda consumir vocabularios controlados NERC *Vocabulary Server* para describir conjuntos de datos marinos y oceanográficos, y de esta manera lograr integrar identificadores permanentes, cadenas de texto concisas y una descripción completa de términos en las diferentes aplicaciones. Sin embargo, en la implementación de la codificación XML recomendado por IOC (2021) para metadatos de SeaDataNet CSR, no pudieron ser adaptados los vocabularios controlados para 'proyectos', 'buques' y 'organizaciones' los cuales no incluyen las iniciativas de la comunidad de América Latina.

Dos de estos vocabularios corresponden con las temáticas que están siendo abordadas en la arquitectura del *Ocean Data and Information System* en el marco del "Decenio de las Ciencias Oceánicas para el Desarrollo Sostenible", en especial, el mecanismo *Ocean Infohub* (OIH) - Latin America and the Caribbean (LAC) del proyecto piloto "*Clearing-House Mechanism LAC*", implementado a partir de la Recomendación SC-IOCARIBE-XV.1 *IOC New Capacity Development Strategy: Implementation Plan* (IOC, 2019b). OHI LAC permite disponer de un modelo híbrido para proveer acceso a información de recursos identificados en la región, dentro del cual se encuentran las temáticas de 'buques' y 'proyectos'. Con ello se evidencia la necesidad de visualizar las iniciativas de cruceros oceanográficos en los catálogos globales, y para el caso de estudio, el potencial de interoperabilidad de la IDE Marítima, Fluvial y Costera de Colombia con el inventario nacional de cruceros desarrollado.

Por otro lado, aunque Arc Marine funcionó como modelo de datos base, respondiendo a las necesidades primarias de estructuración y almacenamiento de los datos geográficos relacionados con CSR y permitiendo además una

representación lógica de estos, no cubrió todos los requisitos identificados. Por esta razón fue necesario agregar tablas alfanuméricas al modelo, el cual resultó ser adaptativo tal como lo señala Andrews y Ackerman (2008), coincidiendo en que "*el modelo de datos Arc Marine proporciona tanto los elementos básicos para representar o modelar tipos de datos marinos comunes, como las herramientas para extender estas representaciones básicas a objetos marinos más complejos a través de relaciones y necesidades particulares*".

Luego de una serie de adaptaciones realizadas al modelo Arc Marine, Lord-Castillo *et al.* (2009) señaló un concepto clave que puede ayudar a guiar futuros desarrollos, coherente con los resultados del presente estudio. Se trata que "*la multidimensionalidad prevista del modelo puede ampliarse efectivamente con dimensiones adicionales (como el tiempo)*". De este modo, la multidimensionalidad del modelo fue comprobada logrando integrar los trazados de ruta del buque reconstruidos para los 87 cruceros, mediante la relación de las tablas *SurveyPoint* y *Cruise*.

Por último, cabe mencionar que Isenor y Spears (2013) destacan la practicidad del modelo Arc Marine para incorporar aspectos del estándar ISO 19115 de metadatos geográficos. Esta conclusión fue corroborada en el presente estudio, pudiendo añadirle el atributo *Metadata* mediante el cual se integra al modelo de metadatos SeaDataNet CSR adoptado en el Cecoldo.

CONCLUSIONES

El Inventario de Cruceros Oceanográficos de Colombia es el producto de la integración de registros provenientes de diferentes fuentes y soportes que resultan de un proceso de arqueología y recuperación de datos e información, aplicando buenas prácticas internacionales y tecnologías de la información. Es de reconocer que el aporte del proceso fue más allá de la recuperación de la información de los cruceros, dando alcance a los inicios de la investigación científica marina en el país y la evolución de las plataformas e instrumentación oceanográfica utilizadas, respaldando el trabajo de Colombia como potencia oceánica desde hace décadas, y visibilizando los esfuerzos por entender y conocer el territorio marítimo colombiano.

El objetivo del inventario de cruceros oceanográficos debe ser visto más allá de la implementación de una base de datos o del acceso a los datos recopilados. Se trata de contar a futuro con una herramienta de descubrimiento que permita aportar a la planificación de los cruceros y expediciones, el uso eficiente de los buques de investigación y la participación interinstitucional. En este sentido, la iniciativa desarrollada por el Cecoldo sobre la IDE Marítima, Fluvial y Costera de Colombia constituye un importante punto de partida para mejorar el intercambio de información histórica y actual sobre cruceros oceanográficos realizados en el país y en la Antártica, con un potencial de crecimiento para contribuir con la toma de decisiones en diferentes niveles de gestión.

El modelo Arc Marine de ESRI constituyó un verdadero marco de trabajo escalable sobre la IDE Marítima, Fluvial y Costera de Colombia, fácil de adaptar para abarcar conceptos más amplios de acuerdo con las necesidades actuales de gestión de información geográfica marina, y en especial las relacionadas con CSR y su representación espacial; el cual puede ser combinado con herramientas de configuración y desarrollo de aplicaciones geográficas en un ambiente híbrido (en la nube y en sitio).

La adaptación del perfil de metadatos CSR SeaDataNet al catálogo de metadatos Geonetwork abre una ventana de posibilidades de interoperabilidad, ya que la ingestión del esquema XML permite la comunicación y el intercambio con otros centros de datos y plataformas, manejando un lenguaje común y contribuyendo con los principios FAIR (*Findability, Accessibility, Interoperability, and Reuse*). Un paso importante hacia un archivo completo y a largo plazo de la información de cruceros oceanográficos nacionales es incluir los metadatos en la base de datos global de CSR SeaDataNet administrada por IFREMER, gestión que puede realizarse desde los programas o proyectos asociados a los cruceros a través de la IDE Marítima, Fluvial y Costera de Colombia y el Cecoldo.

Finalmente, se debe continuar realizando mejoras al flujo de trabajo de los CSR para hacerlo más eficiente, oportuno (disponiendo la información a la menor brevedad posible una vez finalice el crucero), descentralizado (que pueda

ser alimentado desde diferentes proveedores y productores de datos) y procurando la interoperabilidad con otros procesos relacionados con el ciclo de vida de los datos, evitando con esto recurrir a una futura recuperación de información histórica.

AGRADECIMIENTOS

A los tripulantes de los centros de investigaciones oceanográficas e hidrográficas del Pacífico y del Caribe de la Dirección General Marítima. Al personal que integra la Infraestructura de Datos Espaciales Marítima, Fluvial y Costera de Colombia. Al programa 'Estado Joven' del Ministerio de Trabajo de Colombia, que permitió la participación de estudiantes universitarios como pasantes en el Centro Colombiano de Datos Oceanográficos (Cecoldo) entre 2021 y 2022.

FUENTE FINANCIADORA

Dirección General Marítima a través del Centro Colombiano de Datos Oceanográficos (Cecoldo) a su cargo.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: R. O.; Metodología: R. O., D. C.; Análisis: D. C., R. O.; Software: M. S., D. C., R. O.; Redacción - preparación del borrador original: R.O., D. C., M. S.; Redacción - revisión y edición: R. O.; Visualización: D. C. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrews, B.; Ackerman, S. (2008). Federal/State mapping program supports ocean management and research. *Federal GIS Connection*. Woods Hole Coastal and Marine Science Center. <https://pubs.er.usgs.gov/publication/70197185>
- Armada República de Colombia. (1970). *Crucero oceanográfico en el Caribe colombiano. Océano I - 1969*. Resultados preliminares. Ministerio de Defensa – ARC.
- Armada República de Colombia. (1971). *Crucero oceanográfico en el Pacífico colombiano. Pacífico I - 1970*. Resultados preliminares. Ministerio de Defensa - ARC.

- Che-Bohnenstengel, A.; Nast, F. (2013). *Modernised Cruise Summary Reports Management, in particular with a Link to Data. International Conference on Marine Data and Information Systems*. Lucca, Italy, 23-25 September 2013. <https://www.vliz.be/imisdocs/publications/ocrd/251124.pdf>
- Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe. (1993). *Informe técnico Crucero Oceanográfico Erfen XX*. CIOH. Cartagena de Indias, Colombia.
- Comisión Permanente del Pacífico Sur . (2000). *II Crucero Regional de Investigación Oceanográfica del Pacífico Sudeste realizado en mayo de 1999*. CPPS. Quito, Ecuador. http://cpps.dyndns.info/cpps-docs-web/dircient/erfen/crucero/ii_crucero/informe_ii_crucero_1999.pdf
- Hernández Jaimes, J. L.; Ortiz Martínez, R. V.; Suárez Pinzón, I. (2007). Metodología archivística para la recuperación de información oceanográfica del Pacífico colombiano. *Bol. Cient. CCCP*, 14: 123-150. https://doi.org/10.26640/01213423.14.123_150
- Iniesto, M.; Núñez, A. (2020). *Infraestructuras de datos espaciales*, 21. http://www.ign.es/web/biblioteca_cartoteca/abnetcl.cgi?TITN=49999
- Comisión Oceanográfica Intergubernamental. (1993). IOC-CEC-ICSU-ICES *Regional Workshop for Member States of Eastern and Northern Europe (Global Oceanographic Data Archeology and Rescue [GODAR] Project)*. World Data Centre B, Oceanography Obninsk, Russian Federation 17-20 May 1993. IOC of UNESCO. <https://aquadocs.org/handle/1834/5577>
- Comisión Oceanográfica Intergubernamental. (2019a). *Ocean Data Standards, Vol.4: Technology for SeaDataNet Controlled Vocabularies for describing Marine and Oceanographic Datasets - A joint Proposal by SeaDataNet and ODIP projects*. Oostend, Belgium, IODE of UNESCO. (IOC/2019/MG/54 Vol.4). DOI: <http://dx.doi.org/10.25607/OBP-566>
- Comisión Oceanográfica Intergubernamental. (2019b). *Fifteenth Session of the IOC Sub-Commission for the Caribbean and Adjacent Regions (IOCARIBE-XV)*, Oranjestad, Aruba, 6-10 May 2019. IOC of UNESCO. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000370299>
- Comisión Oceanográfica Intergubernamental. (2021). *Ocean Data Standards, Vol.5: SeaDataNet Cruise Summary Report (CSR) metadata model for Cruise Reporting - XML encoding (including SeaDataNet CSR metadata profile of ISO 19115-2 - XML encoding, V5.2.0)*. Oostend, Belgium, IODE of UNESCO. <http://dx.doi.org/10.25607/OBP-1644>
- Isenor, A.; Spears, T. (2013). Combining the Arc Marine Framework with Geographic Metadata to Support Ocean Acoustic Modeling. *Transactions in GIS*, 18(2): 183-200. <https://doi.org/10.1111/tgis.12029>
- Lord-Castillo, B.; Mate, B.; Wright, D.; Follett, T. (2009). A Customization of the Arc Marine Data Model to Support Whale Tracking via Satellite Telemetry. *Transactions in GIS*, 13: 63-83. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9671.2009.01159.x>
- Serpa, P.; Wright, D. (2005). *Using Arc Marine in ArcGIS 9.x Tutorial for Beginners*. https://dusk.geo.orst.edu/djl/arcgis/ArcMarine_Tutorial/index_v9.html
- POGO. (2023). *Cruise Summary Reports. Partnership for Observation of the Global Oceans (POGO)*. <https://www.pogo-oceancruises.org/cruise-summary-reports>
- Rickards, L. (2007). *IODE data flow (National Oceanographic Programmes (NOPs) and Cruise Summary Reports (CSRs))*. <https://aquadocs.org/handle/1834/2779>
- SeaDataNet. (2020). *SeaDataNet CSR Profile of ISO 19139 Metadata - Inspire Compliant*. <https://www.seadatanet.org/Standards/Metadata-formats/CSR>
- Sievers, H. (2017). A 50 años del primer proyecto de construcción de un buque oceanográfico para Chile. *Revista de Marina* (Vol. 134, pp.62). Chile: Armada de Chile <https://revistamarina.cl/es/articulo/a-50-anos-del-primer-proyecto-de-construccion-de-un-buque-oceanografico-para-chile>

Wright, D.; Blongewicz, M.; Halpin, P.; Breman, J. (2007). *Arc Marine GIS for a Blue Planet*. ESRI. <http://dusk.geo.orst.edu/djl/arccgis/book.html>

Zuta, S.; Flores, L. (1980). Oceanography Development in Peru. En Third International Congress on the History of Oceanography (Eds.), *Oceanography: The Past* (pp. 642–655). https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4613-8090-0_59

ARTÍCULO CORTO

Mapeando el fondo marino del Caribe colombiano: propuesta de un esquema cartográfico de la geomorfología submarina de Colombia (sección sur y central del margen continental)

Mapping the seabed of the Colombian Caribbean: Proposal for a cartographic scheme of the underwater geomorphology of Colombia (South and Central Section of the continental margin)

DOI: <https://doi.org/10.26640/22159045.2023.605> Fecha de recepción: 2022-09-23 / Fecha de aceptación: 2023-05-03

Yerinelys Santos Barrera¹; María Fernanda Calderón Grande²; Eliana Lizeth Gutiérrez Rincón³; Diana M. Sánchez Reyes⁴; Ómar Sebastián Álvarez Orduz⁵; Dagoberto David Viteri⁶; Jefferson Jean Gianni Uribe Rivera⁷

CITAR COMO:

Santos-Barrera, Y.; Calderón Grande, M. F.; Gutiérrez Rincón, E. L.; Sánchez Reyes, D. M.; Álvarez Orduz, O. S.; David Viteri, D.; Uribe Rivera, J. J. G. (2023). Mapeando el fondo marino del Caribe colombiano: propuesta de un esquema cartográfico de la geomorfología submarina de Colombia (sección sur y central del margen continental). *Bol. Cient. CIOH*, 42(1): 39-50. ISSN en línea 2215-9045. DOI: <https://doi.org/10.26640/22159045.2023.605>

RESUMEN

Esta publicación muestra los avances obtenidos en el proyecto de mapeado geomorfológico y estructural submarino del territorio marítimo colombiano, el cual parte desde el diseño de un esquema cartográfico para el Caribe que se dividió en 22 cartas a escala 1:250 000. En este trabajo se avanza con la presentación de dos primeras cartas desarrolladas entre los años 2020 y 2021. La elaboración de estas cartas se realizó con el uso de información batimétrica, sísmica 2D, anomalías magnéticas y gravimétricas, y datos satelitales, todo integrado bajo herramientas de sistemas de información geográficas (SIG). Como resultado se obtuvieron las unidades geomorfológicas que caracterizan la parte sur-central del margen continental del Caribe colombiano en dos cartas temáticas enumeradas 1408 y 1409, acorde a lo establecido en el esquema cartográfico diseñado para tal propósito.

PALABRAS CLAVES: geomorfología submarina, Caribe, margen continental, Sinú, abanico del Magdalena, batimetría.

¹ Orcid: 0000-0002-3300-4281. Investigadora Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe. Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla", isla de Manzanillo, barrio El Bosque, Colombia. Correo electrónico: ysantosb@dimar.mil.co

² Orcid: 0000-0002-2030-5210. Investigadora Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe. Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla", isla de Manzanillo, barrio El Bosque, Colombia. Correo electrónico: mcalderong@dimar.mil.co

³ Orcid: 0000-0002-0504-6847. Investigadora Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe. Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla", isla de Manzanillo, barrio El Bosque, Colombia. Correo electrónico: eliana.l.gutierrez@gmail.com

⁴ Orcid: 0000-0003-1537-8981. Investigadora Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe. Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla", isla de Manzanillo, barrio El Bosque, Colombia. Correo electrónico: ciohshn@dimar.mil.co

⁵ Orcid: 0000-0002-4744-9740. Investigador Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe. Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla", isla de Manzanillo, barrio El Bosque, Colombia. Correo electrónico: oalvarez@dimar.mil.co

⁶ Orcid: 0000-0002-8898-3202. Investigador Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe. Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla", isla de Manzanillo, barrio El Bosque, Colombia. Correo electrónico: ddavid@dimar.mil.co

⁷ Orcid: 0000-0001-8467-4720. Investigador Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe. Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla", isla de Manzanillo, barrio El Bosque, Colombia. Correo electrónico: juribe@dimar.mil.co



Publicado por la Dimar

ABSTRACT

This paper shows the progress made in relation to the project to carry out submarine geomorphological and structural mapping of Colombian maritime territory, which started with the design of a cartographic grid divided into 22 charts at a scale of 1:250 000. This paper presents the first two charts developed between the years 2020-2021. These charts were prepared with the use of bathymetric information, 2D seismic data, magnetic and gravimetric anomalies, and satellite data, all integrated in Geographic Information Systems (GIS). As a result, the geomorphological units that characterize the southern and central part of the continental margin of the Colombian Caribbean were published in two thematic charts numbered 1408 and 1409, as established in the cartographic grid designed for this purpose.

KEYWORDS: *Submarine geomorphology, Caribbean, continental margin, Sinú, Magdalena Fan, bathymetry*

INTRODUCCIÓN

El conocimiento sólido del paisaje geomorfológico del fondo marino es clave para la planificación espacial marítima, la designación de áreas marinas protegidas, la construcción y operación de infraestructura en alta mar y la implementación de programas de monitoreo ambiental (Micallef, Krastel y Savini, 2017). La recolección de información de acceso remoto para mapear el fondo marino resulta difícil de obtener por los altos costos que representa; sin embargo, en la última década, la Dirección General Marítima (Dimar), a través del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH) y el Servicio Hidrográfico Nacional (SHN), ha realizado esfuerzos para fortalecer sus capacidades tecnológicas de investigación en la adquisición de sonares, cuyos datos ayudan a la generación de nuevo conocimiento sobre el fondo marino profundo del Caribe y Pacífico colombiano.

La Dimar tiene la responsabilidad de producir la cartografía náutica nacional, de acuerdo con el numeral 4 del artículo 5° del Decreto-ley N°. 2324 de 1984, y los numerales 2 y 6 del artículo 2° del Decreto N°. 5057 de 2009, igualmente dando cumplimiento del Capítulo V "Seguridad de la Navegación" (Dimar, 2021). De esta forma, desde el CIOH se ha planteado el desarrollo de un esquema cartográfico temático geomorfológico y estructural del territorio marítimo, que consta de 22 cartas a escala 1:250 000 y que poseen la numeración 1400 para el Caribe, en las cuales se delimitan y describen las unidades geomorfológicas del fondo marino del Caribe colombiano.

Este artículo presenta los primeros avances que se han obtenido en el desarrollo del esquema cartográfico para el mar Caribe colombiano, según el mapeo geomorfológico por colores, en el que se delimitan las unidades geomorfológicas y se trazan los lineamientos de fallas de dos sectores ubicados entre los departamentos de Córdoba y Atlántico. El mapeo incluyó el uso de información batimétrica de 250 m de resolución (monohaz), en la plataforma continental, y de 10 m a 50 m (multihaz), en los sectores del talud continental y la llanura abisal del Caribe colombiano; así como interpretación de líneas sísmicas 2D adquiridas y procesadas en el marco de los proyectos de exploración de la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH), almacenada en el Banco de Información Petrolera (EPIS); información de gravimetría y magnetometría satelital obtenida de la base de datos SEQUEN, correspondiente a los modelos regionales de Sandwell *et al.* (2014), y EMAG2 V3 y el uso de soluciones SIG para el procesamiento y manejo de información georreferenciada.

ÁREA DE ESTUDIO

El cubrimiento de las cartas temáticas 1408 y 1409 abarca la parte marítima de cinco departamentos del Caribe colombiano (Fig. 1), con un área total de cobertura de aproximadamente 33027 km². La carta temática 1408 de geomorfología submarina, en su límite continental, se extiende desde el corte de la costa del departamento de Córdoba, en cercanías de bahía Rada, hasta la zona costera cercana a Galerazamba, en el departamento de Bolívar; en su límite marítimo o área sumergida va hasta

una profundidad de 3300 m, según la batimetría adquirida y procesada por el CIOH. Por su parte, la carta 1409 comprende desde el corte de la costa de Galerazamba, en el departamento de

Bolívar, en el contacto con la carta 1408, hasta las cercanías de Tasajera, Magdalena; en su sección sumergida alcanza la profundidad de 3700 m.

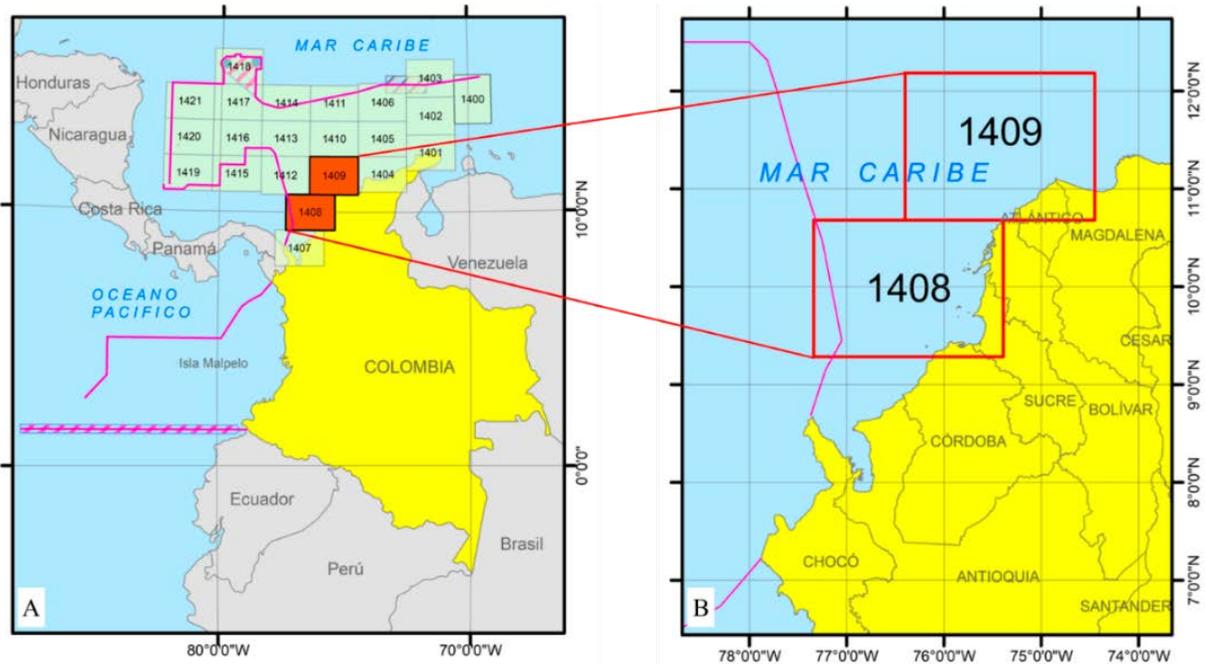


Figura 1. (A). Distribución del esquema cartográfico geomorfológico submarino del Caribe colombiano, 22 cartas a escala 1: 250 000. **(B)** Cartas geomorfológicas 1408 y 1409.

Aspectos geológicos generales del área mapeada

Desde su contexto geológico, el área mapeada se ubica en la zona de influencia del cinturón deformado del Caribe colombiano, el cual, en su sección sur, se encuentra formando el prisma de acreción del Sinú en su parte submarina, producto de la interacción compresiva entre la placa Caribe y la placa Suramericana (Veloza *et al.*, 2012). Hacia el norte continua con la estructura del abanico del río Magdalena, hasta llegar a la Sierra Nevada de Santa Marta, en donde tienen influencia las fallas de Santa Marta, Bucaramanga y de Oca (Cediel, Shaw y Cáceres, 2003). En el continente, las provincias estructurales predominantes son: Serranía del Sinú, San Jacinto, Plato y Sierra Nevada de Santa Marta (Carvajal, 2012). El margen continental es variado y se marca en la isóbata de 200 m, en línea recta, aproximadamente a 79.70 km desde Coveñas, sufriendo un adelgazamiento hacia la sección norte. Se evidencian diferentes procesos

asociados a diques, canales con fenómeno de transportes de masas importantes (Rangel-Buitrago e Idárraga-García, 2010), así como zonas de predominancia escarpada, principalmente en las paredes de cañones y elevaciones importantes del relieve (Vinnels *et al.*, 2010).

El abanico del Magdalena, cuya sección mayor la ocupa la carta 1409, se extiende en un radio de 181.22 km desde la costa del departamento del Atlántico. Esta extensión no es precisa, toda vez que este dato se obtiene a partir del cambio en la batimetría que se observa en los datos analizados, pero se atribuye a lo mapeado y presentado parcialmente en esta carta geomorfológica. Sin embargo, desde el contexto geofísico, se ha dividido la sección total del abanico del Magdalena en abanico superior, medio y bajo. Esto sugiere un cubrimiento en profundidad hasta aproximadamente 4500 m en su sección baja, zona en la cual son escasas las expresiones del relieve en comparación con el talud (Idárraga-García *et al.*, 2019).

METODOLOGÍA

Con el fin de representar las características del relieve submarino, se realizó el mapeo

geomorfológico en el área de cubrimiento, el cual inició en el año 2020, aplicando el flujo de trabajo diseñado por los autores para la elaboración de las cartas temáticas (Fig. 2).

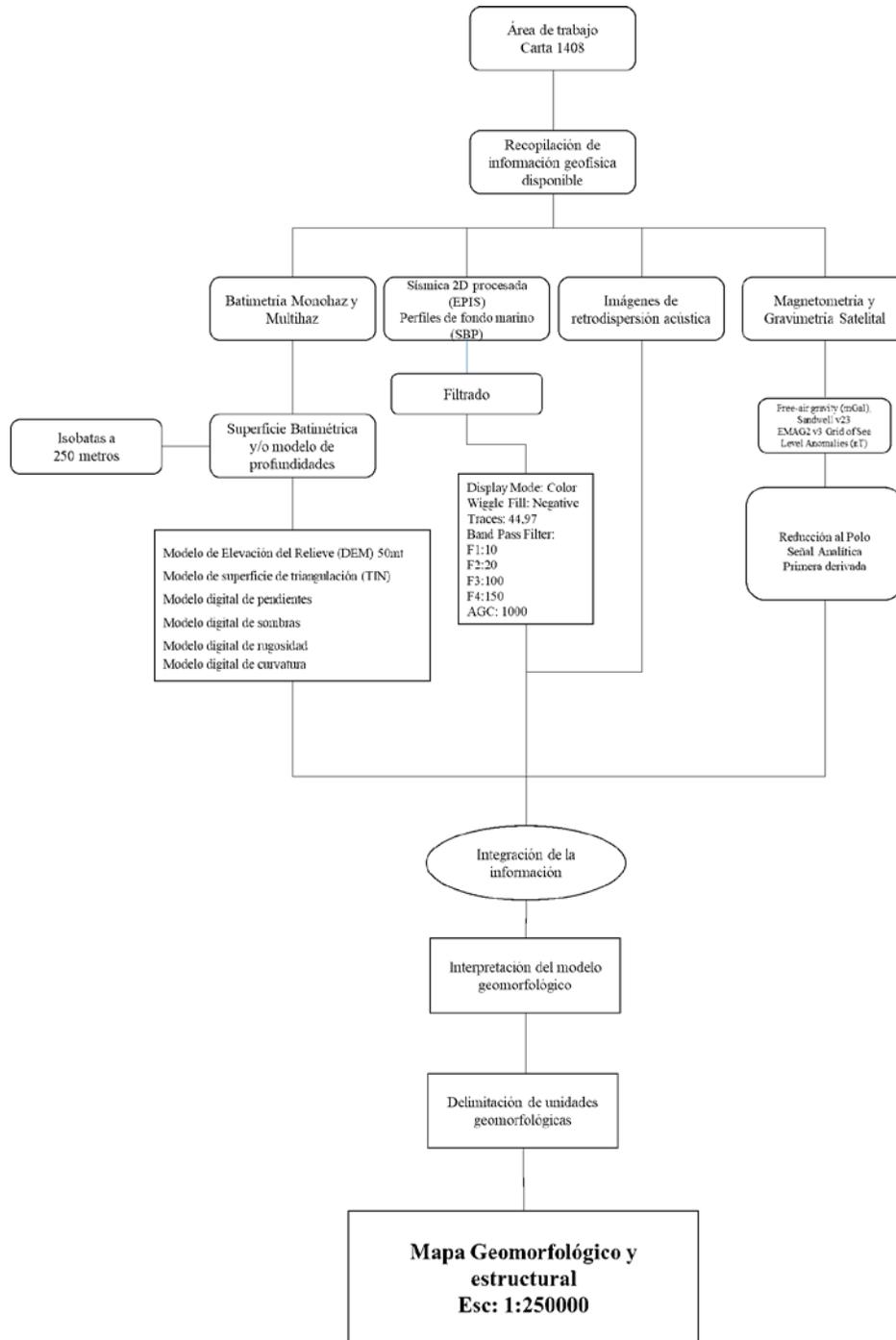


Figura 2. Flujograma metodológico usado para elaboración de cartas de geomorfología submarina del mar Caribe colombiano.

La metodología empleada se basó en los criterios planteados por Micallef *et al.* (2017), que establecen técnicas y métodos para la identificación y mapeo de geoformas submarinas con el uso de sonares. El principal insumo para este trabajo, fue la batimetría suministrada por el CIOH, con la cual se generaron los modelos digitales de profundidad que dieron una visión real en 3D del fondo marino. A esta información se le sumó la sísmica que permitió determinar aquellos procesos de deformación que dieron origen a la configuración del relieve; tales como elevaciones, depresiones, diapiros, deslizamientos, lineamientos y saltos de fallas, entre otros.

Los datos de gravimetría y magnetometría corresponden a una malla de datos satelitales del modelo Sandwell *et al.* (2014) y EMAG2 V3, respectivamente, en una sección del Caribe que incluyó el margen continental, con lo que se obtuvieron lineamientos estructurales regionales y fallamientos. La sísmica usada fue procesada y, por lo tanto, se hizo aprovechamiento de las imágenes con aplicación de filtros para su interpretación (Fig. 2). La interpretación se hizo a partir del modelo Free-air gravity (mGal). Este modelo, basado en datos satelitales, tiene una resolución espacial de $\frac{1}{2}$ longitud de onda de 7 km (Sandwell *et al.*, 2014); la magnetometría (EMAG2V3) tiene resolución de 2 minutos de arco y la altitud de 4 km sobre el geode (Meyer, Saltus y Chulliat, 2017).

Se generaron imágenes tipo ráster, a partir del modelo de profundidades basado en la superficie, con una resolución espacial de 100 m en aquellas zonas de profundidades mayores a 200 m. Esta superficie en 3D permite la identificación de geoformas y características del terreno submarino, con las cuales se delimitó cada geometría de tipo polígono. La información vectorial digitalizada se incorporó en una geodatabase, con una estructura de almacenamiento definido de tipo feature dataset por temáticas, la cual permitió la estandarización de la información y el ordenamiento de las estructuras, de acuerdo con el esquema de jerarquización geomorfológica propuesto por Carvajal (2012). De esta manera se obtuvo la información temática básica para la elaboración del mapa geomorfológico del área.

Los modelos de profundidades permitieron obtener representaciones digitales del relieve submarino, a partir de las cuales se obtuvieron variables como: la pendiente, rugosidad, sombras y perfiles transversales, entre otras. La integración de datos se realizó considerando la batimetría de menor resolución en la plataforma continental, pero con el máximo aprovechamiento de identificación de estructuras en las zonas de mayor resolución en el talud y la llanura abisal; de modo que con base en la resolución de los datos se estimó prudente desarrollar el mapeo a escala 1:250 000.

Modelamiento SIG

El primer modelo obtenido corresponde al modelo de elevación digital (DEM); el cual, según Olaya (2020), es la pieza clave del análisis geomorfológico y es el equivalente informático de la cartografía clásica de elevaciones, representada mediante curvas de nivel, que van desde la profundidad de 10 m a 200 m en la plataforma continental y de 200 m a 3700 m del talud a la llanura abisal. Para este caso, el DEM, insumo principal en la ejecución de los demás modelos digitales, fue obtenido a partir de las isolíneas o isóbatas, y la resolución o tamaño de celda de la imagen dependió de la distancia entre ellas.

Los modelos digitales generados incluyeron: modelo de pendientes, en el cuales se identifica el gradiente o rango máximo de cambio en el eje Z para cada celda; modelo de sombras, en el cual se crea un relieve sombreado, considerando el ángulo de incidencia de la fuente de iluminación; modelo de curvatura, el cual aporta la información sobre la concavidad o convexidad de la superficie; modelo de aspectos, el cual brinda la dirección de la pendiente, y el modelo de rugosidad, el cual denota la irregularidad o la accidentalidad del terreno.

La integración de las interpretaciones a los datos geofísicos (batimetría, sísmica 2D, retrodispersión acústica, SBP 2D y herramientas SIG) dio como resultado el mapa geomorfológico de dos secciones, a escala 1:250 000, correspondiente a las cartas temáticas 1408 y 1409. La nomenclatura implementada en la caracterización de las geomorfoestructuras se basó en la jerarquización geomorfológica

planteada por Carvajal (2012). En esta se propone la clasificación de zonas o terrenos de acuerdo con el tamaño y el área que esta ocupe, y al nivel de estudio, o escala, con el que se desee trabajar; es así como se plantea que cada categoría constituye un sistema, y los sistemas inferiores están contenidos en los superiores.

Para el caso de este estudio, realizado a escala 1:250 000, se clasificaron las áreas en unidades. La unidad es la geoforma individual, genéticamente homogénea, generada por un proceso geomorfológico de acumulación o erosión. Para nombrar a cada unidad en la carta temática se utilizó la nomenclatura que contiene el proceso principal de formación o ambiente (denominado región en la jerarquización), más las iniciales del nombre de la geoforma. De esta manera, las unidades geomorfológicas caracterizadas como denudacionales, como por ejemplo, los complejos de flujos detríticos (cfd), complejos de flujos turbidíticos (cft), los depósitos de talud (dt), diques (d) y deslizamientos (dz) se les antepone en mayúscula la letra D; las unidades geomorfológicas caracterizadas como morfoestructurales, por ejemplo, los escarpes (e), depresiones (dp), sierras homoclinales (sh), terrazas (t) y volcanes de lodo (vl) se les antepone en mayúscula las letras MS.

Así las cosas, es importante mencionar los procesos observados en esta clasificación geomorfológica submarina: Denudacional (D), Marino (M), Marino Costero (MC), Marino Denudacional (MD), Marino Morfo Estructural (MMS), Morfo Estructural (MS); y mencionar las geoformas observadas: Área Coralina (ac), Canal (ca), Cañon (cñ), Complejo de flujos de detritos (cfd), Complejo de flujos turbidíticos (cft), Depósito Holoceno (dh), Depósitos de Talud (dt), Deslizamiento (dz), Dique (di), Escarpe (e), Llanura Abisal (lla), Plataforma Continental (pc), Sierra Homoclinal (sh), Valle (v), Volcán de Lodo (vl).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las cartas temáticas obtenidas son producto de la interpretación de variables geofísicas (batimetría, sísmica 2D, magnetometría y gravimetría satelital) y su integración mediante herramientas SIG. La información batimétrica tiene una resolución espacial en rangos de entre

15 m a 250 m, esta última en las zonas más someras como la plataforma continental. A partir de esta se generaron modelos de elevación del relieve (DEM), visualizaciones 3D, perfiles transversales e imágenes GeoTIFF, analizadas con herramientas SIG, de las cuales se extrajeron perfiles, datos de profundidad e isóbatas, que se generaron cada 50 m y 250 m de profundidad para sumarse al modelo.

Interpretación magnetometría y gravimetría satelital

Estas variables mostraron importantes campos anómalos en el prisma de acreción sumergido y el abanico del Magdalena. Las anomalías gravimétricas más importantes presentan valores entre 13.0 mGal y 80.4 mGal, y el comportamiento geomagnético entre 21.9 nT a 94.09 nT; en concentraciones importantes hacia la estructura del abanico, y anomalías negativas o bajas hacia la llanura abisal de la cuenca Caribe (Fig. 3).

La interpretación gravimétrica y geomagnética, determinada por los cambios texturales de las imágenes, permitió la identificación de tres cuencas diferenciadas claramente por el comportamiento y distribución de las anomalías. La Figura 3A, correspondiente a la gravimetría de aire libre, marca anomalías altas en la sección del margen continental, en los puntos anteriormente mencionados, y bajas hacia la zona profunda de la llanura abisal, y sigue aumentado hacia el NW, en dirección de la cuenca Cayos. Una tendencia similar se observa en la magnetometría (Fig. 3B); sin embargo, las mayores anomalías altas definidas se ubican al sur del margen continental, mientras que, las anomalías magnéticas bajas se reflejan hacia la zona de la cuenca Caribe. Como rasgo importante se evidencia coincidencia de las anomalías altas gravimétrica y magnética en la zona del cinturón deformado del Sinú, al sur del área mapeada, tomando gran parte de la sección cartografiada.

Interpretación sísmica 2D

En la sección de las zonas mapeadas se presentan dos estructuras importantes: al norte el abanico del Magdalena y al sur el prisma acrecionado como parte del cinturón deformado

del Sinú. La plataforma continental presenta un adelgazamiento a lo largo de la sección norte de la carta, con evidencias de unidades de coral visibles en la batimetría. Estructuralmente se presenta el fondo marino con importantes elevaciones y depresiones, así como procesos propios de la actividad sedimentaria del abanico del Magdalena (Fig. 4).

La superposición de la información del subfondo, obtenida con la sísmica y la batimetría, permitió la identificación de canales generados por el flujo de sedimentos (Fig. 4), principalmente en el talud continental; así como la presencia a gran escala de estratificación cruzada en la sección del talud (Fig. 5). Estas líneas sísmicas pertenecen a la sección de la carta 1409 del abanico del Magdalena.

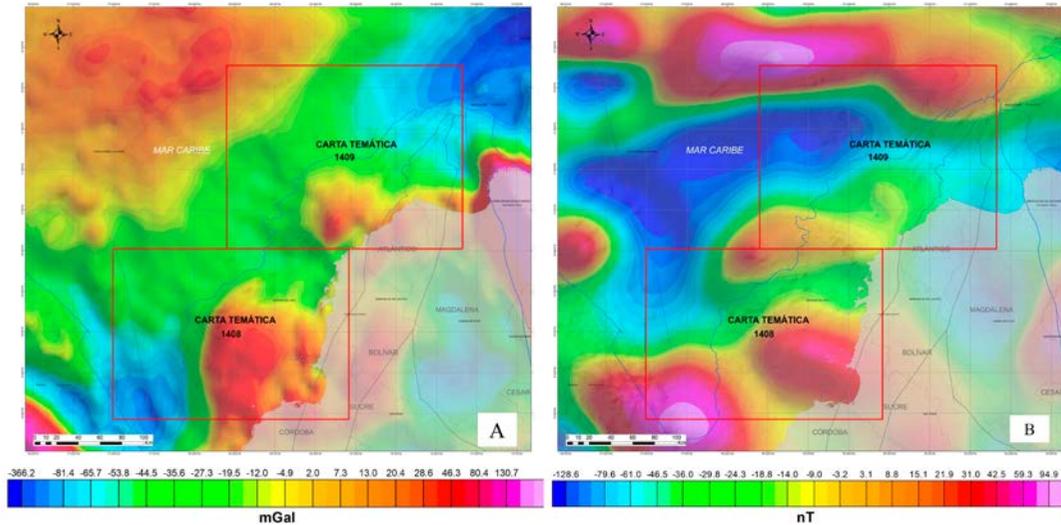


Figura 3. (A) Anomalías de gravedad de aire libre, modelo Sandwell, (B) Anomalía magnética a nivel del mar EMAG v3. Grid tomados de base de datos SEEQUENT. <https://public.dap.seequent.com/>

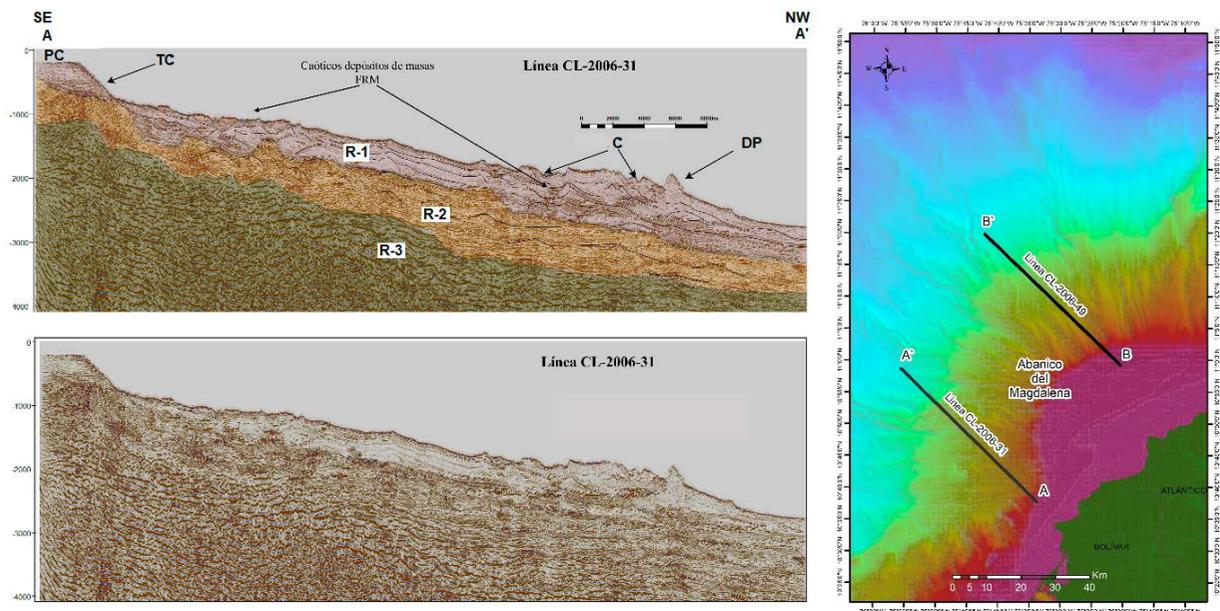


Figura 4. La sección AA' muestra los depósitos sedimentarios del abanico del Magdalena, representado en reflectores sísmicos que dan muestras de la deposición caótica en R-1 y R2, que se asocian con fenómenos de remoción en masa (FRM) y una marcada actividad diapírica. El reflector R-3 corresponde al basamento en la zona. PC: plataforma continental, TC: sección del talud continental, C: canal, DL: Diapiro de lodo.

La sección sur mapeada está constituida por elevaciones sucesivas continuadas y valles orientados en dirección NE-SW, disectadas por canales asociados a un sistema de fallas inversas o de cabalgamiento. Este plegamiento se evidencia hacia la parte más distal de la línea de costa, en límites con la zona abisal, donde se infiere la continuidad del frente de deformación, y se logra identificar algunas fallas normales cubiertas hacia la parte de la plataforma y en la mitad del depósito. Este último se extiende hasta la zona abisal dentro de la cuenca Colombia (Fig. 4).

Esta zona se encuentra afectada por fallas normales hacia la línea de costa y fallas inversas o de cabalgamiento hacia el límite entre la plataforma y el talud continental; sobre este último se identifica el replegamiento importante del cinturón deformado del Sinú sur (Fig. 6).

Continuando hacia el NE vuelve a aparecer el cinturón deformado del Sinú. A este replegamiento, producto de los procesos de deformación de la zona, se denominó sierras homoclinales, debido a la configuración de las capas que a su vez están separadas por valles y disectadas por canales correspondientes a los bloques caídos del sector (Fig. 6). En esta área es más evidente la actividad diapírica, ya que se evidencian protuberancias asociadas a volcanes de lodo. Por otro lado, esta área es afectada por el sistema de fallas de rumbo sinistral de Bucaramanga-Santa Marta, la cual se extiende desde la parte continental (Cediel *et al.*, 2003) hasta la parte submarina. Este sistema genera fallas normales satelitales que afectan el área en la cual la plataforma continental se adelgaza.

Finalmente, las cartas temáticas (Fig. 7) muestran las unidades geomorfológicas en escala de colores, cuyo detalle se identifica en la Tabla 1 y el Anexo 1.

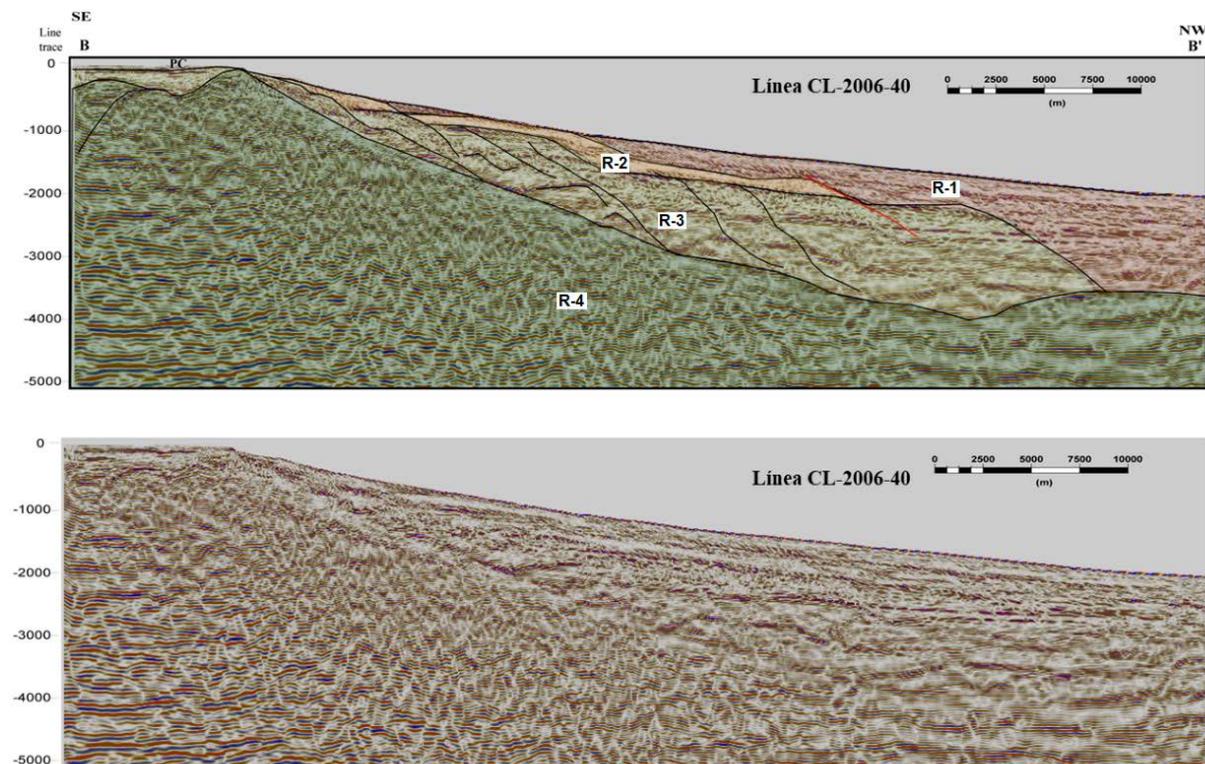


Figura 5. Los reflectores sísmicos R-1, R-2, R-3 evidencian procesos de deposición a escala regional, con reflectores discontinuos, sugiriendo el fallamiento y desplazamiento de las capas. El último reflector R-4 se asocia a la estructura del basamento en la zona.

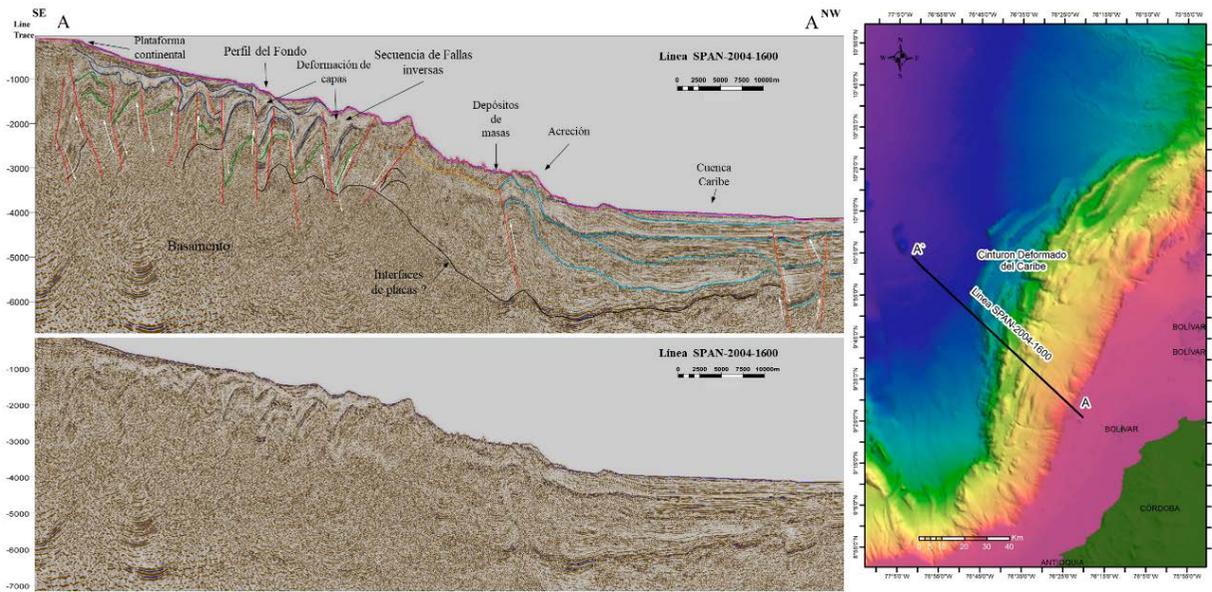


Figura 6. Los reflectores sísmicos son discontinuos cabalgados y deformados hacia el talud, presentado una secuencia de fallas inversa y normales, depósitos de masas junto a acrecionamiento de la placa oceánica en la cuenca Caribe. La línea A-A' corresponde a la sección sur carta 1608.

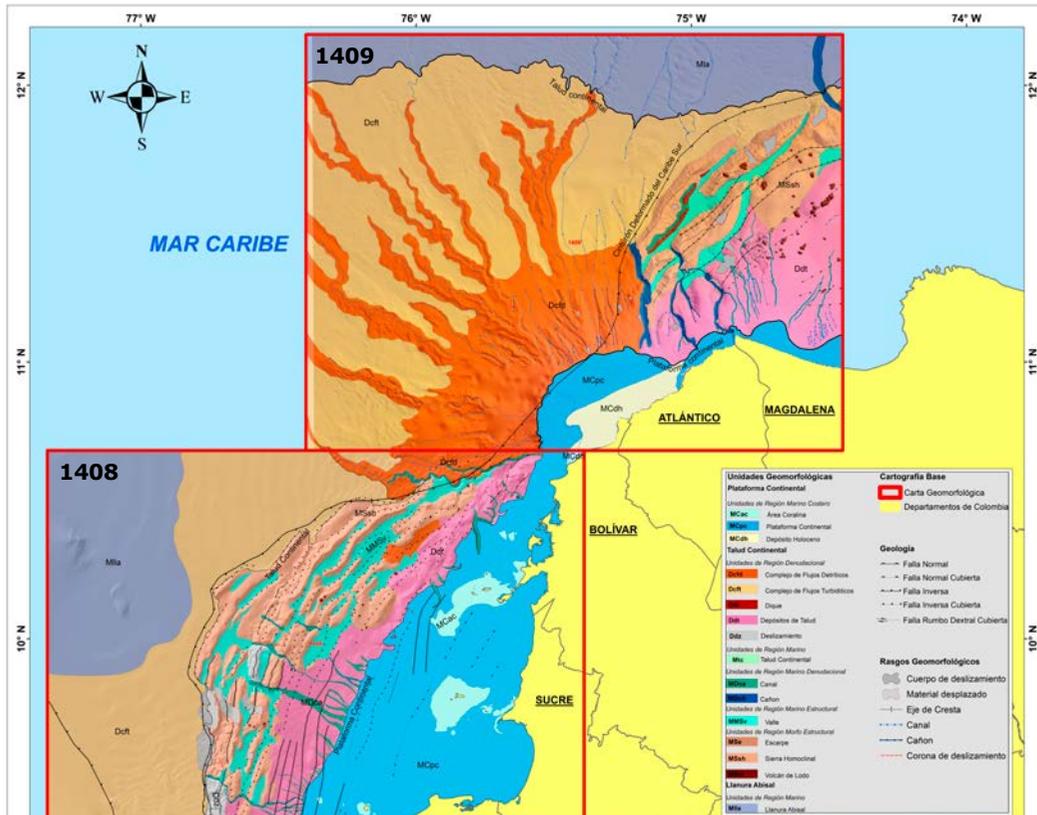


Figura 7. Carta de unidades geomorfológica 1408 y 1409 del mar Caribe colombiano, escala 1:250 000.

Tabla 1. Nomenclatura propuesta para las 229 unidades geomorfológicas delimitadas en las dos cartas geomorfológicas.

	REGIÓN / PROCESO	UNIDAD GEOMORFOLOGICA	NOMENCLATURA DE UNIDAD	NÚMERO DE UNIDADES
CARTA TEMÁTICA 1408 Cinturón deformado del Sinú	MARINO COSTERO	Área Coralina	MCac	18
	MARINO DENUACIONAL	Canal	MDca	40
	DENUACIONAL	Complejo de flujos de detritos	Dcfd	2
	DENUACIONAL	Complejo de flujos turbidíticos	Dcft	2
	MARINO COSTERO	Depósito Holoceno	MCdh	1
	DENUACIONAL	Depósitos de Talud	Ddt	22
	DENUACIONAL	Deslizamiento	Ddz	8
	MARINO	Llanura Abisal	Mla	1
	MORFO ESTRUCTURAL	Sierra Homoclinal	MSsh	21
	MARINO MORFO ESTRUCTURAL	Valle	MMSv	13
MARINO MORFO ESTRUCTURAL	Volcán de Lodo	MSvl	31	
				Total de Unidades: 159
CARTA TEMÁTICA 1409 Abanico Río Magdalena	MARINO DENUACIONAL	Canal	MDca	8
	MARINO DENUACIONAL	Cañon	MDcñ	4
	DENUACIONAL	Complejo de flujos de detritos	Dcfd	1
	DENUACIONAL	Complejo de flujos turbidíticos	Dcft	1
	MARINO COSTERO	Depósito Holoceno	MCdh	1
	DENUACIONAL	Depósitos de Talud	Ddt	2
	DENUACIONAL	Dique	Ddi	1
	MORFO ESTRUCTURAL	Escarpe	MSe	1
	MARINO	Llanura Abisal	Mla	1
	MARINO COSTERO	Plataforma Continental	MCpc	3
	MORFO ESTRUCTURAL	Sierra Homoclinal	MSsh	6
	MARINO MORFO ESTRUCTURAL	Valle	MMSv	5
	MARINO MORFO ESTRUCTURAL	Volcán de Lodo	MSvl	36
				Total de unidades: 70

CONCLUSIONES

Se determinaron 229 unidades geomorfológicas en las cartas 1408 y 1409, las cuales corresponden a procesos estructurales y denudacionales asociados a los ambientes de la plataforma y el talud del margen continental; entre los que se encuentran sierras homoclinales, depósitos de talud, volcanes de lodo, etc., y rasgos geomorfológicos de tipo lineal, tales como canales y cañones.

Asimismo, se identificaron los movimientos en masa y se trazaron los rasgos tectónicos observados en la sísmica 2D, asociados a lineamientos de fallas normales, inversas y de rumbo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al geólogo Henry Carvajal Perico, por su colaboración y orientación con su experiencia y conocimiento

en la interpretación y mapeo de unidades geomorfológicas; al Banco de Información Petrolera, por el suministro de imágenes de sísmica para el desarrollo de interpretación estructural.

FUENTE FINANCIADORA

Este proyecto fue financiado con recursos de funcionamiento y comercialización asignados al Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe - Servicio hidrográfico Nacional de la Dirección General Marítima.

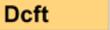
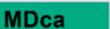
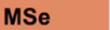
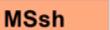
CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: Y. S.; metodología: Y. S.; software: Y. S., M. C., E. G.; visualización: M. C.; análisis: Y. S.; curación de datos: D. S., O. A., D. D., J. U.; redacción y preparación del borrador original: Y. S., M. C., E. G.; redacción, revisión y edición: Y. S. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Carvajal, J. H. (Ed.). (2012). *Propuesta de estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia*. Servicio Geológico Colombiano. Bogotá. 83 pp. <https://doi.org/10.32685/9789589952825>
- Cediel, F.; Shaw, R.; Cáceres, C. (2003). Tectonic assembly of the northern Andean Block. 2003. En: Bartolini C., R. Buffler y J. Blickwede (Eds.). *The Circum-Gulf of Mexico and Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation and plate tectonics, AAPG Memoir 79: 815-848*. <https://doi.org/10.1306/M79877C37>
- Dirección General Marítima. (2021). *Esquema de Cartografía Náutica Nacional*. Cuarta actualización. Dimar. 89 pp. Bogotá.
- Idárraga-García, J.; Masson, D.; García, J.; León, H.; Vargas, C. (2019). Architecture and development of the Magdalena Submarine Fan (southwestern Caribbean). *Marine Geology*, 414: 18-33. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2019.05.005>
- Meyer, B.; Saltus, R.; Chulliat, A. (2017). *EMAG2v3: Earth Magnetic Anomaly Grid (2-arc-minute resolution)*. Version 3. NOAA National Centers for Environmental Information. <https://doi.org/10.7289/V5H70CVX>
- Micallef, A.; Krastel, S.; Savini, A. (Eds.). (2017). *Submarine geomorphology*. Springer. 556 pp. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-57852-1>
- Olaya, V. (2020). Sistemas de información geográfica. *Un libro libre de Víctor Olaya*. volaya.github.io/libro-sig/index.html
- Rangel-Buitrago, N.; Idárraga-García, J. (2010). Geología general, morfología submarina y facies sedimentarias en el margen continental y los fondos oceánicos del mar Caribe colombiano. En: INVEMAR (Eds.). *Biodiversidad del margen continental del Caribe colombiano*, 29-51.
- Sandwell, D.; Müller, R.; Smith, W.; García, E.; Francis, R. (2014). New global marine gravity model from Cryo-Sat-2 and Jason-1 reveals buried tectonic structure. *Science*, 346: 65-67 <https://doi.org/10.1126/science.1258213>. PMID:25278606
- Veloza, G.; Styron, R.; Taylor, M.; Mora, A. (2012). Open-source archive of active faults for northwest South America. *GSA Today*, 22(10): 4-10. <https://doi.org/10.1130/GSAT-G156A.1>
- Vinnels, J.; Butler, R.; McCaffrey, W.; Paton, D. (2010). Depositional processes across the Sinú accretionary prism, offshore Colombia. *Marine and Petroleum Geology*, 27(4): 794-809. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2009.12.008>

Anexo 1 - Detalle de las unidades geomorfológicas y cartografía base de las cartas de unidades geomorfológicas 1408 y 1409 del mar Caribe colombiano escala 1:250 000.

Unidades Geomorfológicas	Cartografía Base
Plataforma Continental	 Carta Geomorfológica
<i>Unidades de Región Marino Costero</i>	 Departamentos de Colombia
 MCac Área Coralina	
 MCpc Plataforma Continental	
 MCdh Depósito Holoceno	
Talud Continental	Geología
<i>Unidades de Región Denudacional</i>	 Falla Normal
 Dcfd Complejo de Flujos Detríticos	 Falla Normal Cubierta
 Dcft Complejo de Flujos Turbidíticos	 Falla Inversa
 Ddi Dique	 Falla Inversa Cubierta
 Ddt Depósitos de Talud	 Falla Rumbo Dextral Cubierta
 Ddz Deslizamiento	
<i>Unidades de Región Marino</i>	Rasgos Geomorfológicos
 Mtc Talud Continental	 Cuerpo de deslizamiento
<i>Unidades de Región Marino Denudacional</i>	 Material desplazado
 MDca Canal	 Eje de Cresta
 MDcñ Cañon	 Canal
<i>Unidades de Región Marino Estructural</i>	 Cañon
 MMSv Valle	 Corona de deslizamiento
<i>Unidades de Región Morfo Estructural</i>	
 MSe Escarpe	
 MSsh Sierra Homoclinal	
 MSvl Volcán de Lodo	
Llanura Abisal	
<i>Unidades de Región Marino</i>	
 Mlla Llanura Abisal	

ARTÍCULO CORTO

Sobre la necesidad de una evaluación del riesgo de contaminación por el combustible abordo del naufragio del USS "Peacock" en la bahía de Cartagena de Indias

About the need for an assessment on the risk of pollution from the fuel on board the shipwreck of the former USS Peacock in the Bay of Cartagena de Indias

DOI: <https://doi.org/10.26640/22159045.2023.614> Fecha de recepción: 2023-04-27 / Fecha de aceptación: 2023-07-28

Carlos Alberto Andrade Amaya¹

CITAR COMO:

Andrade Amaya, C. A. (2023). Sobre la necesidad de una evaluación del riesgo de contaminación por el combustible abordo del naufragio del USS "Peacock" en la bahía de Cartagena de Indias. *Bol. Cient. CIOH*, 42(1): 51-59. ISSN en línea 2215-9045. DOI: <https://doi.org/10.26640/22159045.2023.614>

RESUMEN

El remolcador USS "Peacock" se encuentra hundido cerca de la punta de Castillogrande, en la bahía de Cartagena, producto de un accidente cuando fue abordado por el buque mercante de bandera noruega MS "Hindanger", el 23 de agosto de 1940. Casi partido en dos se hundió rápidamente, muriendo tres tripulantes y 23 fueron rescatados. Desde su reubicación, en 1992, se ha observado que esporádicamente salen gotas de combustible del naufragio. Su posición coincide con mediciones de alta concentración de hidrocarburos en la bahía. El Departamento de Buceo y Salvamento de la Armada de Colombia ha estado monitoreando esta situación que aún continúa. Por ello, se recomienda un proyecto de investigación para la evaluación de la cantidad de combustible que pueda tener a bordo el naufragio, y que se estudien las alternativas para retirarlo, con el fin de despejar el riesgo ambiental.

PALABRAS CLAVE: bahía de Cartagena, naufragios, USS Peacock, contaminación por combustible.

ABSTRACT

The tugboat USS Peacock was sunk near the tip of the Castillogrande peninsula in the Bay of Cartagena when it accidentally collided with the Norwegian-flagged merchant ship MS Hindanger on 23 August 1940. Almost split in two, it quickly sank, killing three crew members while 23 were rescued. Since it started to be monitored in 1992, it has been noted that fuel drops sporadically come out of the shipwreck and its position coincides with the measurements of the highest concentration of hydrocarbons in the bay. The Diving and Salvage Department of the Colombian Navy has been monitoring this situation that is still ongoing. Therefore, this article suggests a research project to evaluate of the amount of fuel that the shipwreck may have on board and to study the alternatives to remove it in order to allay the environmental risk.

KEYWORDS: Bay of Cartagena, shipwrecks, USS "Peacock", pollution.

¹ Orcid: 0000-0002-4784-7474. Investigador Exploraciones Oceánicas de Colombia S.A.S., Colombia. Correo electrónico: candrade@exocol.com

INTRODUCCIÓN

Debido a la Segunda Guerra Mundial (1939-1945), más de 6300 barcos yacen hundidos en los océanos del mundo, y el combustible que aún queda en sus tanques se estima entre 2.5 y 20.5 millones de toneladas, lo que significa un potencial de contaminación equivalente a 700 veces el accidente del petrolero Exxon Valdez, en Alaska (Deutsche Welle, 2020). En la actualidad, varios naufragios comenzaron a mostrar signos de tener importantes fugas de combustible, como consecuencia del paulatino deterioro por corrosión de las paredes metálicas de los tanques que aún lo contienen. Algunos países, como Noruega, se han dado a la tarea de extraer combustible de los naufragios en sus aguas, entendiendo que si aún queda combustible en los tanques de los naufragios, es una bomba de tiempo que tarde o temprano se revelará (Schimdt-Ekin, 2011).

El remolcador de mar USS "Peacock" es uno de los naufragios que encajan en este relato de la Segunda Guerra Mundial. Aunque aparentemente fue un accidente, cuando se encontró con un buque mercante de bandera noruega, el MS "Hindanger", en un punto crítico del canal de navegación de la bahía de Cartagena de Indias, y al no poder evitarlo, fue abordado violentamente por estribor a la altura de la sala de máquinas, hundiéndose rápidamente. El naufragio se ha advertido en las cartas de navegación desde la época de su hundimiento (Fig. 1) y se ha caracterizado anteriormente (Santos y Rojas, 2015; Andrade, 2021) en cuanto a su posición, disposición y estabilidad. En este sentido, esta nota atañe a la inquietud que incorpora la posibilidad de que todavía tenga combustible en cantidades significativas y la cercanía a la línea de costa en la parte interna de la bahía.

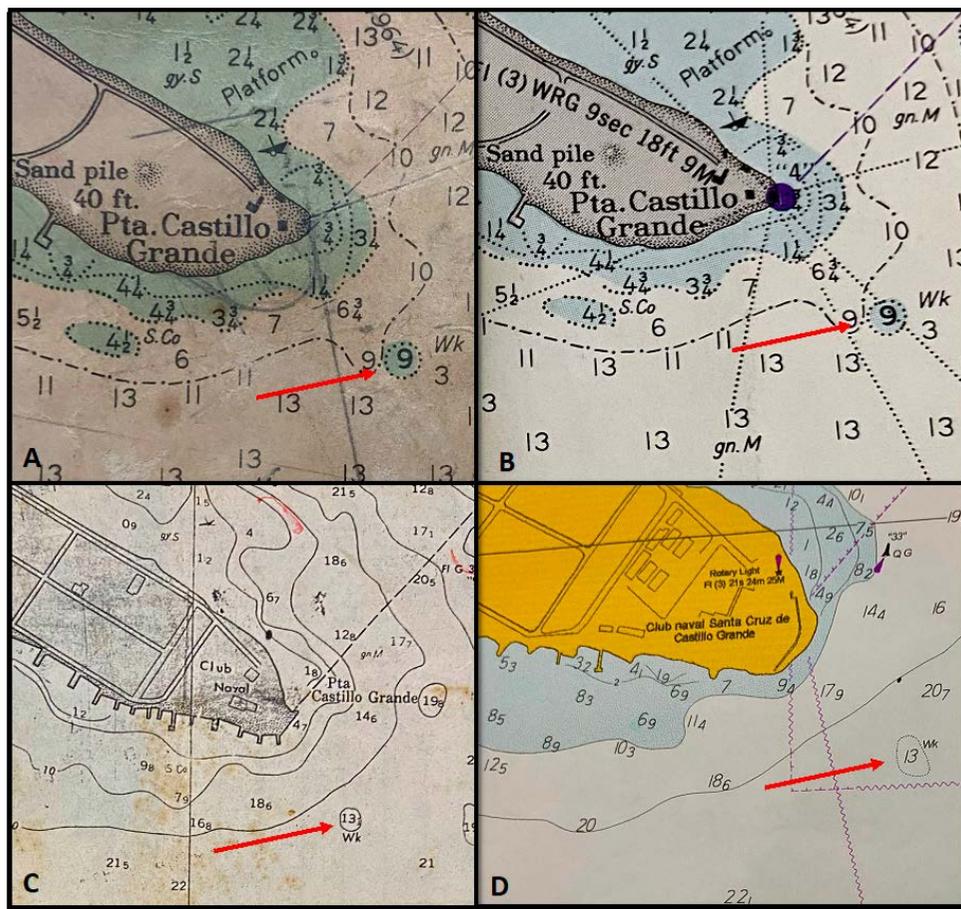


Figura 1. La posición del naufragio en las cartas de navegación. (A) En la carta US24505, Rev. 1966. (B) En la misma carta actualizada en 1976. (C) En la carta COL 262 de 1982. (D) En la carta COL 840 de 2000 (señalado en la Wk).

ÁREA DE ESTUDIO

En sentido estricto, el área de estudio corresponde al área del naufragio en el canal de navegación, cercano a la punta de la península de Castillogrande, en la bahía de Cartagena (Fig. 2); sin embargo, en un sentido más amplio, incluye la bahía completa si la probabilidad de un derrame de petróleo fuera parte de la hipótesis.

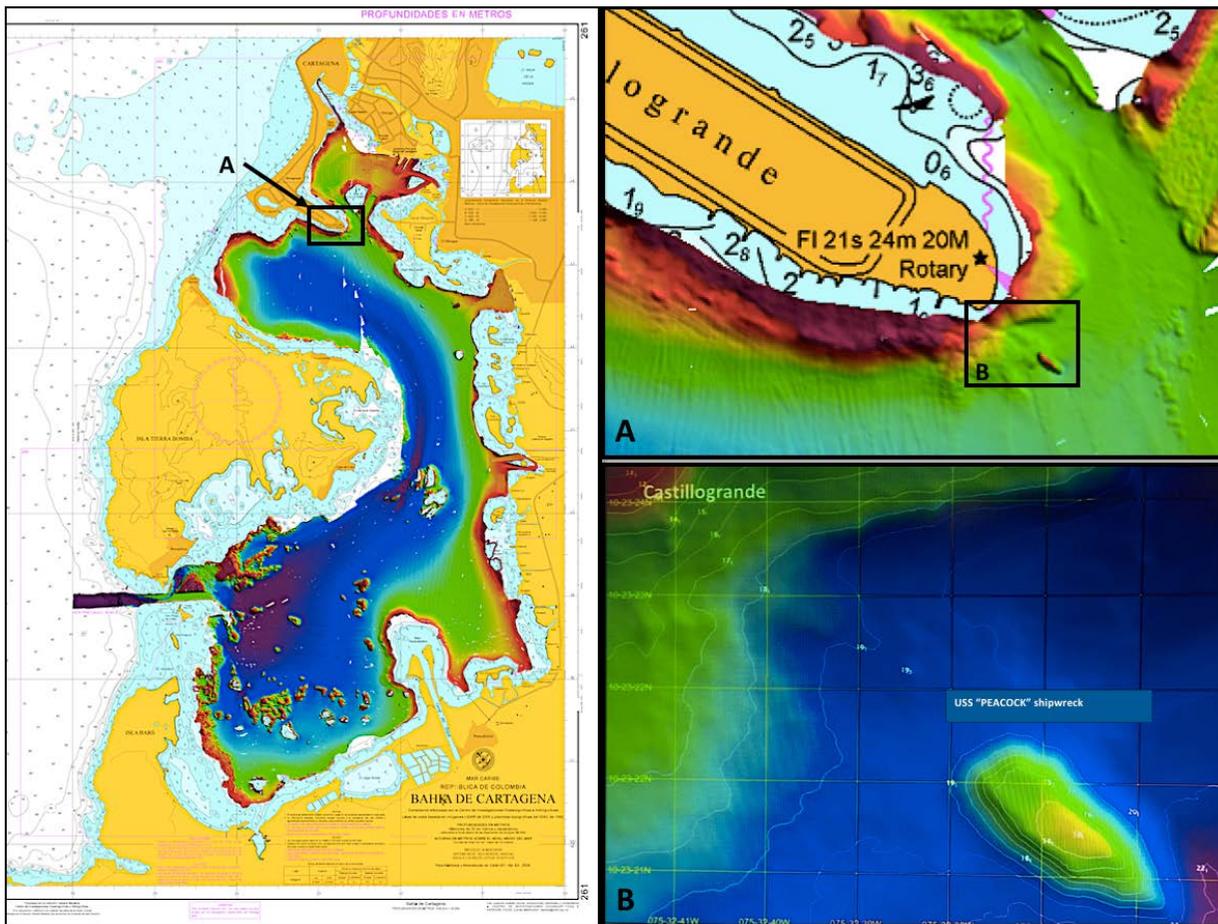


Figura 2. Superficie batimétrica superpuesta a la carta náutica COL 261, hecha con sonda multihaz, para el reconocimiento de rasgos en la bahía de Cartagena (Mora *et al.*, 2018). En el área de Cuatro Calles (**A**) se advierte la anomalía que representa la ubicación del naufragio en el canal de navegación frente a la península de Castillogrande (**B**).

El sector en el que se encuentra el naufragio es comúnmente conocido como Cuatro Calles, cuyo punto más profundo del canal, en la comunicación con la bahía interna, es lugar de intercepción de las fuerzas hidrodinámicas que entran por Bocagrande y por donde las corrientes oceánicas, producidas por la marea dentro de la bahía externa, entran y salen alternadamente de la bahía interna, alrededor del naufragio, trayendo sedimentos del Canal de Dique hasta el sector (Andrade, Arias y Thomas, 1988).

Debido a lo anterior, los sedimentos en el sector son muy finos en el canal, en el interior de la bahía (Thomas *et al.*, 2005; Andrade *et al.*, 2004), y las corrientes de fondo, relativamente más altas a lo largo del canal de navegación (Lonin y Giraldo, 1996), producen una capa de turbidez muy alta cerca del fondo; por lo tanto, la visibilidad es baja (alrededor de 1 m) en el área profunda. Esta característica mejora en la zona intermedia, debajo de la capa de superficie, en la cual es frecuente encontrar aguas transparentes que

permiten las operaciones de buceo profesional, con todas las limitaciones mencionadas.

METODOLOGÍA

A partir de una revisión de documentación histórica, se hizo una descripción sobre los buques involucrados en el accidente, de lo que se conoció sobre los hechos alrededor de la colisión y posterior naufragio del remolcador. La superficie batimétrica para esta descripción fue producto del procesamiento realizado para el reconocimiento de las geoformas en la bahía de Cartagena, encontradas y analizadas durante el levantamiento batimétrico de primer orden llevado a cabo con una ecosonda multihaz Reson 7125 en 200 y 400 khz 512 beams. Este equipo estuvo acompañado, tanto con un sistema de posicionamiento diferencial Trimble, como por sensores de movimiento Octans, utilizados durante las investigaciones realizadas por el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH) en la bahía de Cartagena, entre 2015 y marzo de 2016, documentadas en Mora *et al.* (2018).

Para la descripción de la situación actual del naufragio se utilizaron imágenes de un sonar de

barrido lateral Edgetech 4100FS, de la empresa Exocol, realizadas sobre perfiles controlados con posicionamiento en alta resolución en la posición (DGPS). La muy baja visibilidad en el fondo marino de esa zona ha impedido la presentación y mejor descripción mediante fotografía submarina. Finalmente, se pone el presente naufragio en el contexto de la creciente atención sobre las necesidades de tomar acción y evaluar la condición del naufragio del USS "Peacock", y lo que está sucediendo con los buques que se hundieron de manera similar durante la Segunda Guerra Mundial, con el fin de prevenir las consecuencias al tenerlo al interior de la bahía.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El remolcador USS "Peacock"

El USS "Peacock" era el antiguo dragaminas AM 46, con un desplazamiento de 840 toneladas; eslora de 187.1 pies; manga de 35.5 pies; puntal de 8.10 pies, y 14 pies de calado de diseño (Fig. 3). Su quilla se colocó el 31 de agosto de 1918 en Staten Island SB Co. Fue botado el 8 de abril de 1919. Su madrina fue Miss A. M. Danner y comisionado el 27 de diciembre de 1919. El oficial al mando fue el teniente John Danner.

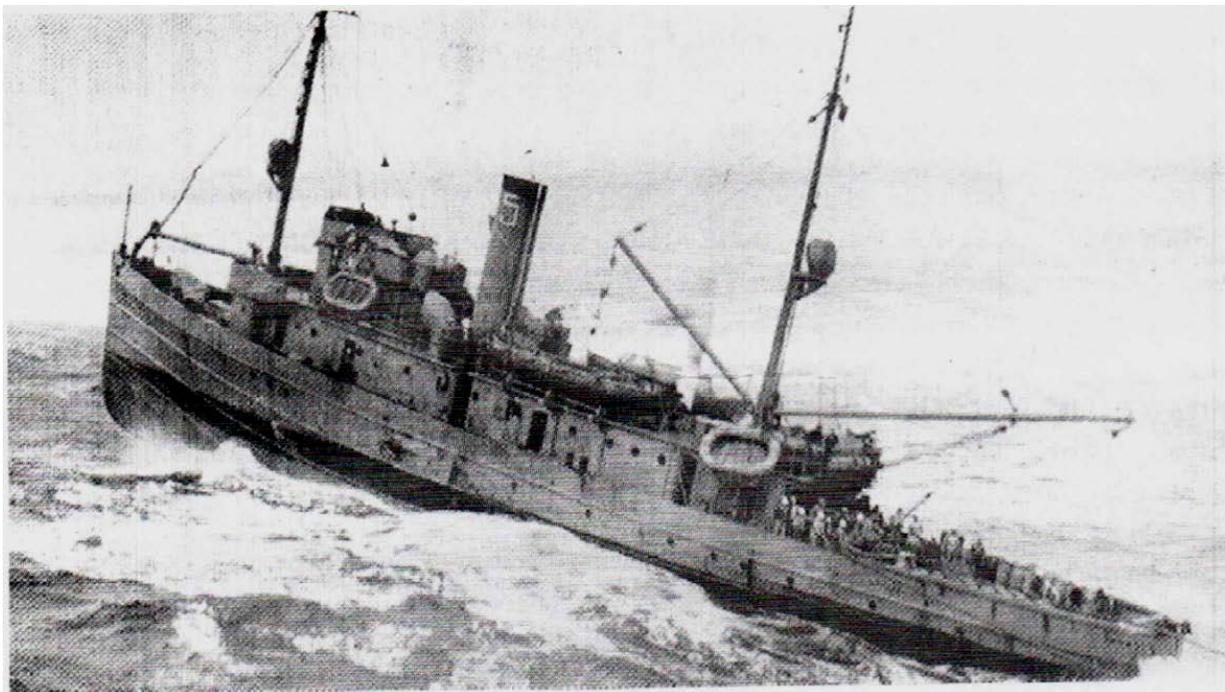


Figura 3. Imagen del USS "Lapwing", buque gemelo del USS "Peacock", naufragado en la bahía de Cartagena (imágenes en [wikipedia.org/wiki/ Lapwing-class minesweeper](https://en.wikipedia.org/wiki/Lapwing-class_minesweeper)).

Después del aprovisionamiento, el USS "Peacock" permaneció en el muelle de la Marina en Nueva York hasta que fue dado de baja el 14 de febrero de 1920 y entregado para ser fletado a la Oficina de Transporte Marítimo el mismo día. Convertido en un remolcador de salvamento, el USS "Peacock" sirvió bajo contrato en varias actividades comerciales hasta el 24 de agosto de 1940, cuando chocó con el buque mercante noruego MS "Hindanger", cerca de la punta de Castillogrande y se hundió. Fue retirado del registro de buques de la Armada de los Estados Unidos de América el 22 de abril de 1941 (Naval History and Heritage Command, 2022).

El MS "Hindanger"

El MS "Hindanger" era un buque mercante de bandera noruega (Fig. 4), con un tonelaje de 4885 toneladas brutas y 8200 toneladas de desplazamiento total (TDWT); 395 pies de eslora; 54.6 pies de manga; 28.9 pies de puntal; propulsado por dos motores de 6 cilindros 4T 4200 hp, que le permitían una velocidad de 12.5 nudos. Su identificativo de llamada era LDKC. Fue entregado en octubre de 1929 por Sir W. G. Armstrong, Whitworth & Co. Ltd., Newcastle en Tyne.

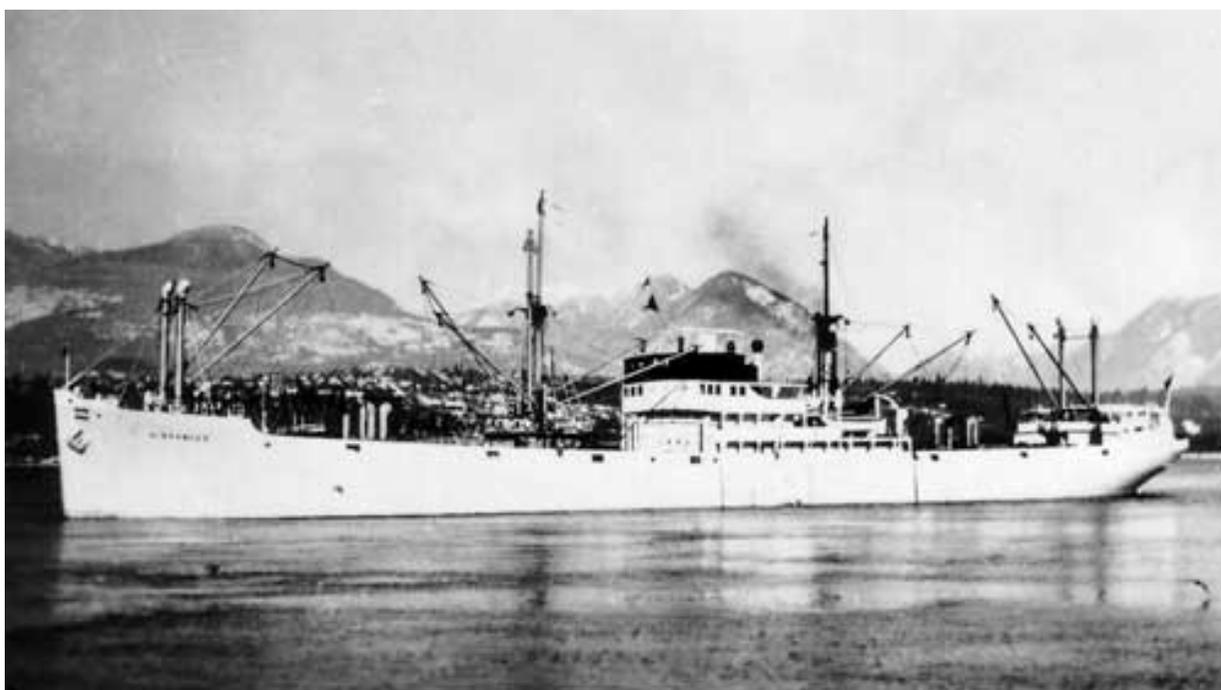


Figura 4. Imagen de MS "Hindanger". (Foto recibida de Aage A. Wilhelmsen, Noruega - propietario: Kaspar Skjerve en la agencia Westfal-Larsen & Co. A/S, de Bergen).

Salía de la bahía interna y se encontró con el USS "Peacock" justo en la punta de Castillogrande, donde el canal es más estrecho para la maniobra, colisionando de frente con su proa dicho remolcador por el través. Luego de la colisión en la bahía de Cartagena (Fig. 4), el SM "Hindanger" fue víctima de la guerra. Había llegado a Liverpool el 21 de agosto de 1942 y posteriormente se unió al convoy del Atlántico Norte, en dirección oeste ON 127, saliendo de Liverpool el 4 de septiembre. Se dirigía a Nueva York, pero nunca llegó a ese destino. El 11 de septiembre de 1942, fue torpedeado por el U-584

(Kapitänleutenant Joachim Deecke), en posición 49° 39' N - 32° 24' W (Warsailors, 2011).

Noticias del accidente y naufragio del remolcador USS "Peacock"

En palabras del periódico de la época:

"El USS "Peacock" no pudo realizar la maniobra de evasión y provocó que la proa del vapor noruego lo partiera en dos. José Rodríguez, ciudadano portugués, saltó al agua y se salvó. Estaba lavando ropa en la cocina cuando

ocurrió el choque. Los muertos fueron: el primer maquinista Sr. Robert A. Casid, el radiotelegrafista John Harston y el marinero Louis Nelson, inicialmente no se localizaron los restos del remolcador, lo que implicó una búsqueda posterior. De la tripulación se salvaron 23: el capitán A. Hansen, M. Rivewrs, W. Rosso, T. Ziegles, K. Krogidad, L. H. Sorensen, George Culberston, Jacob Jacobsen, Henrick Palker, M. Sculman, McCarty, Doug Lopez, John Saloon, Jhon Bauer, L. Stoab, Patzy H. Soilor, Martin Rehien, Stanley Pumpenger, J. Croops y A. Norad. La noticia aclaraba que el remolcador pertenecía a la USN y no a la Tropical Fruit Company, que arrendado a la Merritt Chapman y Scott Corp y que la agencia en Cartagena y Panamá era la Tropical Oil." (El Fígaro, lunes 26 de agosto de 1940).

Posteriormente se escribió una nota sobre los esfuerzos por ubicar el sitio del naufragio para evaluar los posibles peligros para la navegación:

"Personal técnico de la Base Naval logró localizar el sitio donde al día siguiente quedaron los restos del remolcador estadounidense y el vapor noruego reanudó su viaje pocos días después. Realizando sondeos, se ubicó en la parte más

profunda del cauce, presentándose como "una de las ventajas de nuestro puerto", ya que se hundió un barco de grandes dimensiones y no afectó a la navegación." (El Fígaro, martes 27 de agosto de 1940).

Situación actual del naufragio

El naufragio del "Peacock" se encontraba advertido en los "avisos a los navegantes", desde el momento de su hundimiento, e incorporado a las cartas náuticas como aparece en la Figura 1. Más recientemente, el naufragio fue visitado e inspeccionado de manera visual, desde julio de 1992, en operaciones de buceo de las Fuerzas Especiales de Infantería de Marina junto con el Departamento de Buceo y Salvamento de la Armada Nacional. Desde entonces, el naufragio ha sido visitado continuamente, convirtiéndose en un lugar obligado para el adiestramiento de los buzos en inspecciones con baja visibilidad. Desde las primeras inmersiones, resultó evidente para los buzos que la estructura interna del buque retiene una gran cantidad de gránulos de combustible que llegan a la superficie (gotas de fueloil) y que marcan el sitio del naufragio, lo que desde siempre ha motivado interés y preocupación por su cercanía a la ciudad.

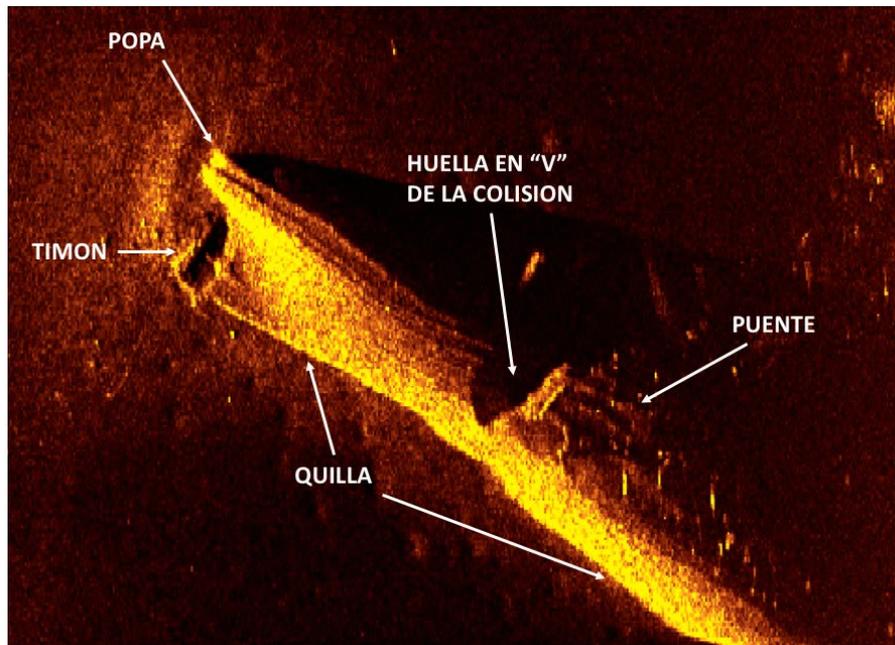


Figura 5. Imagen de sonar de barrido lateral (600 kHz) del naufragio del remolcador USS "Peacock" en la bahía de Cartagena. Nótese la cicatriz en forma de "V" en el casco como resultado de la colisión.

La imagen de sonar de barrido lateral (Fig. 5) muestra que el buque descansa sobre el costado de babor en una sola pieza, con una profunda cicatriz en forma de "V" a la altura del cuarto de máquinas, resultado la entrada de la proa en la colisión con el MS "Hindanguer".

Las imágenes de sonar muestran que la estructura del barco aún está bien conservada. Sin embargo, las inspecciones de buceo reportan que la estructura se encuentra completamente incrustada, especialmente en la parte más somera hasta alrededor de 17 m de profundidad, el límite inferior del agua oceánica, que permite más transparencia a la luz del sol. Sobre las incrustaciones se acumula una gran cantidad de lodos finos que las cubren. Asimismo, se reporta que el deterioro del metal es evidente en muchos lugares del costado de estribor. Otros aspectos del naufragio se encuentran también en Santos y Rojas (2015) y Andrade (2021).

Aparte del continuo reporte de la liberación de gránulos de combustible (fueloil pellets), que suben a la superficie, no se han realizado estudios específicos ni análisis relacionados con contaminación ambiental al respecto de este sitio. Solo de manera coyuntural, durante 1985 se detectaron concentraciones de hidrocarburos disueltos y dispersos, en la estación del programa Caripol (Caribbean Pollution – an Iocaribe Program), ubicada más cerca del naufragio en la bahía de Cartagena, con un valor de 17.9 µg/L. En su momento, la mayor contribución de estos residuos se atribuyó al transporte marítimo, actividades de muelle, desembarcadero y usos industriales (Garay, 1987).

En la bahía de Cartagena existen estudios recientes sobre hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) en sedimentos, e hidrocarburos disueltos y dispersos en agua. Para los primeros, los resultados de Tous *et al.* (2015) y Mejía (2015), concuerdan en que los sedimentos de la bahía de Cartagena están contaminados con HAP, infiriendo además que existe un aporte de estos compuestos debido al movimiento portuario en esta bahía. Por su parte y para la matriz agua, Sánchez *et al.* (2020) realizaron una caracterización fisicoquímica a un puerto de carga en la bahía de Cartagena y detectaron presencia de hidrocarburos disueltos y dispersos en los puntos de muestreo de agua superficial

cercanos a la zona de cargue y descargue del puerto. No obstante, no hay estudios puntuales sobre hidrocarburos disueltos o dispersos en agua en la punta de Castillogrande, zona del naufragio.

Al borde de un desastre ecológico

De la misma manera, en el fondo del mar reposan una gran cantidad de barcos que fueron hundidos por las fuerzas de las guerras mundiales. Se estima que solo producto de la Segunda Guerra Mundial hay más de 6338 barcos hundidos en el mundo (Schmidt-Etkin, 2011) con características peligrosas como el USS "Peacock".

Se estima que en los naufragios quedan entre 2.5 y 20.5 millones de toneladas de fueloil en sus tanques, que pueden romperse y causar el mismo tipo de daño que una fuga de aceite que se presente hoy. Esto significaría que hay mucho más petróleo contenido en tanques hundidos en el mar que lo estimado hasta ahora, en solo los naufragios de la Segunda Guerra Mundial. Atendiendo esta situación, funcionarios de la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés) en el 2010, a bordo del USS "Baseline Explorer", realizaron en las Carolinas un inventario y base de datos aplicando 21 criterios, dando como resultados la clasificación de los barcos hundidos en USA (McCay *et al.*, 2014).

Al estar dentro de la bahía, el USS "Peacock" es un verdadero riesgo. Una eventual fuga llegaría a tierra en poco tiempo. Se trata de un caso similar al ocurrido en la bahía de Pugh, Gydinia, en Polonia con el buque oceanográfico "Imor", del Instituto Marítimo Dansk. A partir de inspecciones realizadas al naufragio del buque hospital alemán "Stuttgart", hundido el 9 de octubre de 1943, a 2 km de la bahía de Dansk y a 20 m de profundidad se encontraron grandes cantidades de combustible emulsionado en el sedimento (Rogowska, Wolska y Namiesnik, 2010).

Es conocido que las láminas de acero pierden entre 1.5 mm y 2 mm de espesor por década, lo que parece poco, pero desde 1940 se vuelven inestables y se rompen con una pequeña presión; lo que representa la mayor dificultad para extraer el fueloil de manera controlada, lo cual es difícil con barcos de hace 50 años debido a la corrosión progresiva. Por estas razones es importante evaluar

la posibilidad de hacerlo ahora, porque en 10 o 20 años puede ser imposible hacer una operación de recuperación de petróleo factible. El costo a largo plazo puede ser mucho peor y esperar no es una solución. Ya lo han hecho en Noruega, donde han retirado el combustible de los naufragios cercanos (DW-Deutsche Welle, 2020).

Varios temas requieren atención y respuestas inmediatas. Por ejemplo, es necesario entender si el combustible a bordo del naufragio del USS "Peacock" genera o no tanta emulsión como el alemán. El buque llegaba de una navegación, ¿cuánto combustible tenía a bordo?, ¿cómo instalar válvulas sin romper las paredes de los tanques? Al ser un exbarreminas convertido en remolcador de la USN, ¿se pueden tomar medidas sin el permiso del gobierno de los EE. UU.?

CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIÓN

Como se dijo anteriormente, este manuscrito no pretende presentar conclusiones respecto de la situación del naufragio del USS "Peacock"; en su lugar, pretende informar en el contexto de la situación ambiental, sobre lo que está sucediendo y sobre cómo se están atendiendo las situaciones similares alrededor del mundo.

Es opinión del autor que este es un problema crónico que hay que afrontar. Es urgente invertir en asegurar la salud ambiental de la bahía de Cartagena y en particular sobre la costa de Castillogrande. En ese sentido, resulta fundamental hacer una inspección detallada de esta situación ya que, de existir combustible en cantidades significativas a bordo del naufragio del USS "Peacock", se deben encontrar soluciones para extraerlo del buque, ya que una fuga en un tanque de fueloil dentro de la bahía puede ser desastrosa. Si hay combustible a bordo, la pregunta no es ¿si ocurrirá una fuga?, sino ¿cuándo ocurrirá?

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece al mayor de IM (RA) Miguel Enrique Rozo, mi compañero de buceo cuando "redescubrimos" el sitio del naufragio. A los buzos del Departamento de Buceo y Salvamento de la Base Naval de 1992, por su colaboración y ayuda en la caracterización interior de la estabilidad del naufragio. A los oceanógrafos e

hidrógrafos del CIOH, por el apoyo a lo largo de los años. Muchos de ellos asistieron y ayudaron en las numerosas sesiones de buceo y sondeos realizados durante todos estos años, conociendo el naufragio y a los revisores del Boletín por su ayuda y contribución anónima.

FUENTE FINANCIADORA

El presente manuscrito fue realizado con fondos de la empresa Exploraciones Oceánicas de Colombia – Exocol S.A.S.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrade, C. A. (2021). Interpretación de imágenes de sonar de barrido lateral y de sonda multihaz sobre anomalías culturales en la bahía de Cartagena. *Bol. Cient. CIOH*, 40(1): 19-24. <https://doi.org/10.26640/22159045.2021.559>
- Andrade, C. A.; Thomas, Y.; Lonin, S.; Parra, C.; Menanteau, L.; Cesaraccio, M.; Kunesch, S.; Andriau, A.; Piñeres, C.; Velasco, S. (2004). Aspectos morfodinámicos de la bahía de Cartagena de Indias. *Bol. Cient. CIOH*, 22: 90-104. <https://doi.org/10.26640/22159045.131>
- Andrade, C. A.; Arias, F.; Thomas, Y. (1988). Nota sobre la turbidez, circulación y erosión en la región de Cartagena. *Bol. Cient. CIOH*, 8: 71-82. <https://doi.org/10.26640/22159045.29>
- DW-Deutsche Welle. (2020). The Black Tears of the Sea: The Lethal Legacy of Wrecks. TV documentary produced by Längengrad Filmproduktion for the WDR in cooperation with Arte. Written and directed by Christian Heynen; camera by Michael Kern; underwater cameras by Konrad Dubiel, Matthias Granberg, Jörn Kumpart, Allison Low and Chris Selman; edited by Jan Wilm Schmülling; music by Thomas Wolter. English version released in July 2020 by Deutsche Welle. Running time: 42 minutes.
- Garay, J. A. (1987). Vigilancia de la contaminación por petróleo en el Caribe Colombiano (Punta Canoas hasta Barbacoas, Cartagena, Colombia). *Bol. Cient. CIOH*, 7: 101-118. <https://doi.org/10.26640/22159045.25>
- Lonin, S.; Giraldo, L. (1996). Influencia de los efectos térmicos en la circulación de la Bahía

- Interna de Cartagena. *Bol. Cient. CIOH*, 17: 47-56. <https://doi.org/10.26640/22159045.84>
- McCay, D. F.; Reich, D.; Michel, J.; Etkin, D.; Symons, L.; Helton, D.; Wagner, J. (2014). For Response Planning: Predicted Environmental Contamination Resulting from Oil Leakage from Sunken Vessels. In: *International Oil Spill Conference Proceedings*. p. 300108. <https://doi.org/10.7901/2169-3358-2014-1-300108.1>
- Mejía, G. E. (2015). *Hidrocarburos aromáticos policíclicos en la Costa Caribe colombiana y posibles fuentes de contaminación*. Tesis de maestría. Universidad de Cartagena. Cartagena, 109 pp.
- Mora, H.; Carvajal, J. H.; Ferrero, A.; Leon, H.; Andrade, C.A. (2018). Sobre emanaciones de gas natural y subsidencia en la bahía de Cartagena de Indias. *Bol. Cient. CIOH*, 37: 35-51. <https://doi.org/10.26640/22159045.2018.448>
- Naval History and Heritage Command. (2022). *Peacock III (AM-46)*. <https://www.history.navy.mil/research/histories/ship-histories/danfs/p/peacock-ii.html>
- Rogowska, J.; Wolska, L.; Namiesnik, J. (2010). Impacts of pollution derived from ship wrecks on the marine environment on the basis of s/s "Stuttgart" (Polish coast, Europe). *Science of the Total Environment*, 408: 5775-5783. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.07.031>. PMID:20863551.
- Sánchez, F.; Mayo, G.; Rivero, J.; Mercado, J.; Johnson, B. (2020). Caracterización fisicoquímica de aguas y sedimentos en puerto de carga de la bahía de Cartagena, Colombia. *Bol. Cient. CIOH*, 39(2): 41-50. <https://doi.org/10.26640/22159045.2020.505>
- Santos, Y.; Rojas, H. (2015). Aplicación de la hidrografía en la prospección, exploración y conservación del patrimonio cultural sumergido de la nación. *Bol. Cient. CIOH*, 33: 221-230. <https://doi.org/10.26640/22159045.288>
- Schimdt-Etkin D. (2011). Spill occurrences: A world overview. In: *Oil Spill Science and Technology, December*. <https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-943-0.10002-4>
- Thomas, Y. F.; Cesaraccio, M.; Kunesch, S. ; Andrieu, A. ; Menanteau, L.; Andrade, C. ; Lonin, S.; Parra, C.; Piñeres, C.; Velasco, S. (2005). *Étude morpho dynamique de la baie de Carthagène des Indes (Colombia), Milieux littoraux: Nouvelles perspectives d'étude*. 171-191. Editorial L'Harmattan.
- Tous, G.; Mayo, G.; Rivero, J.; Llamas, H. (2015). Evaluación temporal de los niveles de los hidrocarburos aromáticos policíclicos en los sedimentos de la bahía de Cartagena. *Revista Derrotero*, 9(1): 7-12.
- Warsailors. (2011). <https://www.warsailors.com/singleships/hindanger.html>

Boletín Científico CIOH

Cartagena de Indias, D.T. y C., Colombia
Vol. 42. Núm. 1. Páginas 3 a 59. Junio de 2023

- Ciencia y soberanía: contribuciones científicas desde el Boletín Científico del CIOH a la defensa de Colombia ante la Corte Internacional de Justicia de La Haya** **3 - 6**
José Andrés Díaz Ruiz
- Estudio de la tasa de sedimentación y erosión en el sector La Barra del canal navegable en San Andrés de Tumaco, Nariño** **7 - 25**
Yessica Carolina Cantero Mosquera, Carlos A. Astaiza, Ángela M. Mesías, Paola Andrea Quintero Rodríguez
- Cruceros oceanográficos sobre una infraestructura de datos espaciales. Caso de estudio Colombia** **27 - 38**
Ruby Viviana Ortiz-Martínez, Diana Paulina Castañeda Rodríguez, Moisés Abraham Santizo Fuentes
- Mapeando el fondo marino del Caribe colombiano: propuesta de un esquema cartográfico de la geomorfología submarina de Colombia (sección sur y central del margen continental)** **39 - 50**
Yerinelys Santos Barrera; María Fernanda Calderón Grande; Eliana Lizeth Gutiérrez Rincón; Diana M. Sánchez Reyes; Ómar Sebastián Álvarez Orduz; Dagoberto David Viteri; Jefferson Jean Gianni Uribe Rivera
- Sobre la necesidad de una evaluación del riesgo de contaminación por el combustible abordo del naufragio del USS "Peacock" en la bahía de Cartagena de Indias** **51 - 59**
Carlos Alberto Andrade Amaya

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

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

www.cioh.org.co

www.ccp.org.co

www.dimar.mil.co