

Evaluación de rasgos geológicos del frente costero: línea base para alternativas de mitigación y protección basadas en ecosistemas de la zona costera del departamento de Córdoba, Colombia

David Fernando Morales-Giraldo^{1*} ; Oswaldo Coca¹ ;
Constanza Ricaurte-Villota¹ 

¹Programa Geociencias Marinas y Costeras, Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras, INVEMAR, Santa Marta, Colombia. (*) david.morales@invemar.org.co; oswaldo.coca@invemar.org.co; constanza.ricaurte@invemar.org.co

Resumen

La implementación de medidas basadas en ecosistemas como alternativas de adaptación frente al cambio climático ha cobrado importancia frente a amenazas naturales en zonas costeras. En términos de erosión costera, los arrecifes se consideran una morfología marina que reduce la energía del oleaje al conformar una superficie rugosa en el fondo. Para evaluar la viabilidad de esta alternativa se requiere un contexto geológico, oceanográfico y climatológico, temáticas que abarcan los procesos que condicionan la presencia de dichos ecosistemas. El monitoreo de erosión costera en el departamento de Córdoba permitió identificar el corregimiento de Santander de la Cruz como sitio prioritario para evaluar una alternativa de mitigación basada en ecosistemas. Se generó un modelo batimétrico detallado como base para la identificación de rasgos morfológicos del fondo marino; adicionalmente, se colectaron muestras de sedimento y una muestra de roca para establecer las principales características sedimentológicas del área. En la zona marina al occidente del corregimiento de Santander de la Cruz se identificó una morfología rugosa sobresaliente desde el plano sedimentario, cuyas características indican la presencia de fondos duros. El fondo se caracterizó por presentar sedimentos arenosos de tamaño muy fino a fino que conforman el depósito de playa sumergido con pendiente muy baja, mientras que hacia la zona de influencia marina los sedimentos se caracterizaron por ser de tipo limo a arcillas. Estos depósitos se vieron interrumpidos por la estructura rocosa natural que forma un eje cóncavo de tendencia nororiente-suroccidente, casi paralelo a la línea de costa. Las características geológicas del fondo, representadas en el relieve natural, constituyen una línea base para la implantación de un arrecife artificial, y son referente para la presencia de ecosistemas de fondos duros. Para definir su viabilidad se requiere de análisis detallado del material rocoso, características oceanográficas y bióticas que puedan favorecer el crecimiento del ecosistema.

Palabras clave: Erosión costera; Arrecife artificial; Frente costero; Protección costera; Alternativas basadas en ecosistemas.

Evaluation of nearshore geological features: Baseline for mitigation and protection with ecosystem-based alternatives for the coastal zone of the Cordoba department, Colombia

The implementation of ecosystem-based measures as adaptation alternatives to Climate Change has become increasingly important in the face of natural threats in coastal areas. In terms of coastal erosion, reefs are considered a marine morphology that reduces wave energy by forming a rough

Forma de citar: Morales-Giraldo, D.F.; Coca, O.; Ricaurte-Villota, C. (2023). Evaluación de rasgos geológicos del frente costero: línea base para alternativas de mitigación y protección basadas en ecosistemas de la zona costera del departamento de Córdoba, Colombia. *Boletín de Geología*, 45(3), 51-62. <https://doi.org/10.18273/revbol.v45n3-2023003>

surface at the bottom. To evaluate the viability of this alternative, a geological, oceanographic, and climatological context is required, subjects that encompass the processes that condition the presence of such ecosystems. The monitoring of coastal erosion in the department of Córdoba made it possible to identify the village of Santander de la Cruz as a priority site to assess an ecosystem-based mitigation alternative. A detailed bathymetric model was generated as a basis for the identification of morphological features of the seabed; additionally, sediment samples and a rock sample were collected to establish the main sedimentological characteristics of the area. In the marine area to the west of the Santander de la Cruz district, an outstanding rough morphology was identified from the sedimentary plane, whose characteristics indicate the presence of hard bottoms. The bottom was characterized by presenting sandy sediments of very fine to fine size that make up the submerged beach deposit with a very low slope, while towards the zone of marine influence the sediments were characterized by being silt to clay type. These deposits were interrupted by the natural rocky structure that forms a concave axis of northeast-southwest trend, almost parallel to the coastline. The geological characteristics of the bottom, represented in the natural relief, constitute a baseline for the implantation of an artificial reef, being a reference to the presence of hard bottom ecosystems. To define its viability, a detailed analysis of the rock material and the oceanographic and biotic characteristics that can favor the growth of the ecosystem is required.

Keywords: Coastal erosion; Artificial reef; Nearshore; Coastal protection; Ecosystem-based Alternatives.

Introducción

Los problemas de erosión costera han sido una constante preocupación para la sostenibilidad ambiental, social y económica (Rangel-Buitrago y Posada-Posada, 2005; De Oliveira *et al.*, 2019). Por este motivo, en el departamento de Córdoba, Colombia, la Corporación Ambiental de los Valles del Sinú y San Jorge (CVS), autoridad encargada de la administración de los ecosistemas y recursos naturales, ha realizado investigación en los cambios de línea de costa sobre el litoral (Correa *et al.*, 2007a; INVEMAR-CVS, 2013). De igual manera, las áreas críticas del departamento se seleccionaron con análisis de amenaza y vulnerabilidad, evaluando las características y procesos físicos a nivel regional para llegar a una zonificación calificada (INVEMAR-CVS, 2016). Con base en estos estudios, los corregimientos costeros de la región tomaron protagonismo debido al alto grado de amenaza por erosión costera y la carencia de información científica base para la toma de decisiones.

En función del contexto geológico de la costa del departamento de Córdoba, Correa *et al.* (2007b) identificaron los siguientes factores que favorecen la erosión litoral: el ascenso relativo del nivel del mar, el desplazamiento de la línea de costa como respuesta a ascensos milimétrico del nivel del mar, la alta susceptibilidad a la erosión de las terrazas y acantilados conformados por arcillolita y lodolitas con pobres características geotécnicas y la disminución general de la disponibilidad general de arena en el sistema litoral, como resultado de intervenciones antrópicas. Dichos factores reflejan la vulnerabilidad del litoral frente al

embate del oleaje, aun con mayor incidencia al derivarse de mares de leva y otros eventos climáticos extremos.

Por otra parte, la pérdida de ecosistemas debido a la expansión de las áreas ocupadas por actividades antrópicas en la zona costera y al crecimiento de poblaciones rurales se asocia con la reducción de aportes sedimentarios y un aumento en la exposición a los factores oceanográficos, lo cual repercute en el estado del litoral. Además, la dinámica litoral causa la remoción natural de sedimentos y su posterior depósito en playas y fondos someros. Es así como dentro de las alternativas para la mitigación de la amenaza por erosión costera se tienen mecanismos de intervención denominados obras blandas, que permiten la recuperación o restauración de ecosistemas con la finalidad de reducir el impacto del oleaje sobre el depósito sedimentario (Stronkhorst *et al.*, 2013).

Por ello, el estudio de las características morfológicas en el frente costero cobra importancia al constituirse en la línea base para la comprensión de la dinámica litoral y el análisis de implementación de alternativas de solución contra la erosión costera. Las condiciones físicas en estas zonas restringen la capacidad de adquisición de información, en parte por su alta dinámica energética o por ser una franja de difícil acceso para la exploración tradicional (Miselis, 2008; Bird *et al.*, 2019).

El objetivo de este trabajo fue evaluar las características morfológicas y sedimentológicas del fondo marino somero, y su relación con las unidades geológicas costeras, frente a un sector afectado por erosión costera: Santander de la Cruz (INVEMAR-CVS, 2017), en el departamento de Córdoba, como base para proponer

una alternativa de intervención en la zona, una barrera arrecifal artificial, que forme una zona de fricción por la rugosidad del fondo como obstáculo para el oleaje incidente, de manera que reduzca la energía sobre la playa, y procure que esta sea más estable (Osorio-Cano *et al.*, 2019). Para ello se recolectó información batimétrica, geofísica y sedimentológica que permitió identificar los rasgos y las condiciones geológicas que se describen en este estudio.

Área de estudio

El corregimiento de Santander de la Cruz hace parte del municipio de Moñitos (Córdoba). La franja litoral del área corresponde a una terraza subhorizontal, limitada al oriente por un relieve costero de colinas con escarpes pronunciados, drenajes profundos y expresiones de domos diapíricos. Tanto el relieve costero como la terraza litoral están cortados por lineamientos y fallas geológicas que determinan numerosas zonas de debilidad y erosión subsuperficial en el área. En dirección del sector de punta Coquito corresponde a una terraza litoral inclinada (areniscas y arcillolitas), con acantilados con alturas máximas de alrededor de los 9 m en la punta de la Cruz, y mínimas de 0,5 m en los sectores de Santander de la Cruz y Broqueles (Correa *et al.*, 2007a).

La línea de costa sobre la que se ubica el corregimiento de Santander de la Cruz tiene una forma cóncava entre las denominadas Punta Coquito y de la Cruz o del Cementerio (Figura 1). Se extiende a lo largo de 2,5 km, aproximadamente, sobre los cuales predomina el depósito de playa. Dicho depósito, hacia el norte, tiene en su parte trasera una terraza fluvio-marina, de carácter arenoso, sobre la cual se desarrollan áreas de cultivo de plátano. En la parte media, la transición hacia el continente es suave, lo cual hace que el corregimiento haya formado su núcleo rural sobre una llanura arenosa, probablemente asociada a antiguos frentes marinos. Hacia el mar desembocan tres drenajes denominados arroyo Pequín, arroyo Culebra y quebrada San Martín, los cuales son la fuente de aporte sedimentario en época de lluvias — durante la época seca las bocas de estos se mantienen cerradas—; alrededor de estas se encuentran algunos bosques de manglar. Al sur el depósito de playa cierra contra terrazas marinas, evidenciadas por la presencia de antiguos corales con matriz lodosa que suprayacen las lodolitas asociadas a la Formación Moñitos; esta

última conforma la Punta de la Cruz, caracterizada por un acantilado de cerca de 9 m de altura que presenta procesos erosivos muy marcados.

En cuanto al comportamiento histórico de la línea de costa entre 1981 y 2018, se ha reportado una tasa máxima de erosión de $-5,21$ m/año, con una frecuencia alta de retroceso dentro del rango $-0,57$ a -2 m/año, localizado principalmente en la zona centro (donde se localiza el poblado) y al sur del área de estudio (INVEMAR-CVS, 2018).

En cuanto a la oceanografía del área, estudios anteriores han identificado que la zona costera del departamento de Córdoba está directamente influenciada por el oleaje (Serrano-Suárez, 2004), lo cual indica que los vientos y el oleaje son factores importantes en la configuración de la costa. En la zona marina frente a Santander de La Cruz, Ordóñez-Zúñiga *et al.* (2017) emplearon datos del Reanálisis Regional de América del Norte (NARR) y realizaron la caracterización de los vientos en una estación a 35 km de Santander de la Cruz, llamada BV_03. Estos autores encontraron que la mayor magnitud del viento se registra entre los meses de diciembre a abril, y que alcanza máximos para el mes de febrero, con una dirección predominante norte-noroeste. En contraste, de mayo a noviembre disminuye la velocidad del viento, y se registran mínimos en el mes de octubre, y domina la dirección proveniente del oeste.

El comportamiento del oleaje a partir de la serie sintética de la boya virtual (BV_03) ubicada a 35 km al noroeste de Santander de la Cruz mostró que para la época seca (diciembre-marzo) el oleaje presenta máximos con alturas de ola promedio de $1,35 \pm 0,56$ m, con un periodo de 6,5 s y una probabilidad del 37% de ocurrencia de olas provenientes del NNO, seguido de direcciones al NO y O-NO. En contraste, para los meses de abril a noviembre (época húmeda), la altura de la ola disminuye hasta un promedio de $1,08 \pm 0,56$ m, un periodo de 6,4 s y la dirección predominante proviene del tercer cuadrante (entre 180° y 270°), con mayor probabilidad del oeste-noroeste (Ordóñez-Zúñiga *et al.*, 2017). Es importante mencionar que las condiciones de viento predominante, las corrientes litorales y las mareas, en términos generales, ejercen un efecto sinérgico sobre el oleaje, produciendo alturas y longitudes de olas extremas (Bardají *et al.*, 2009).

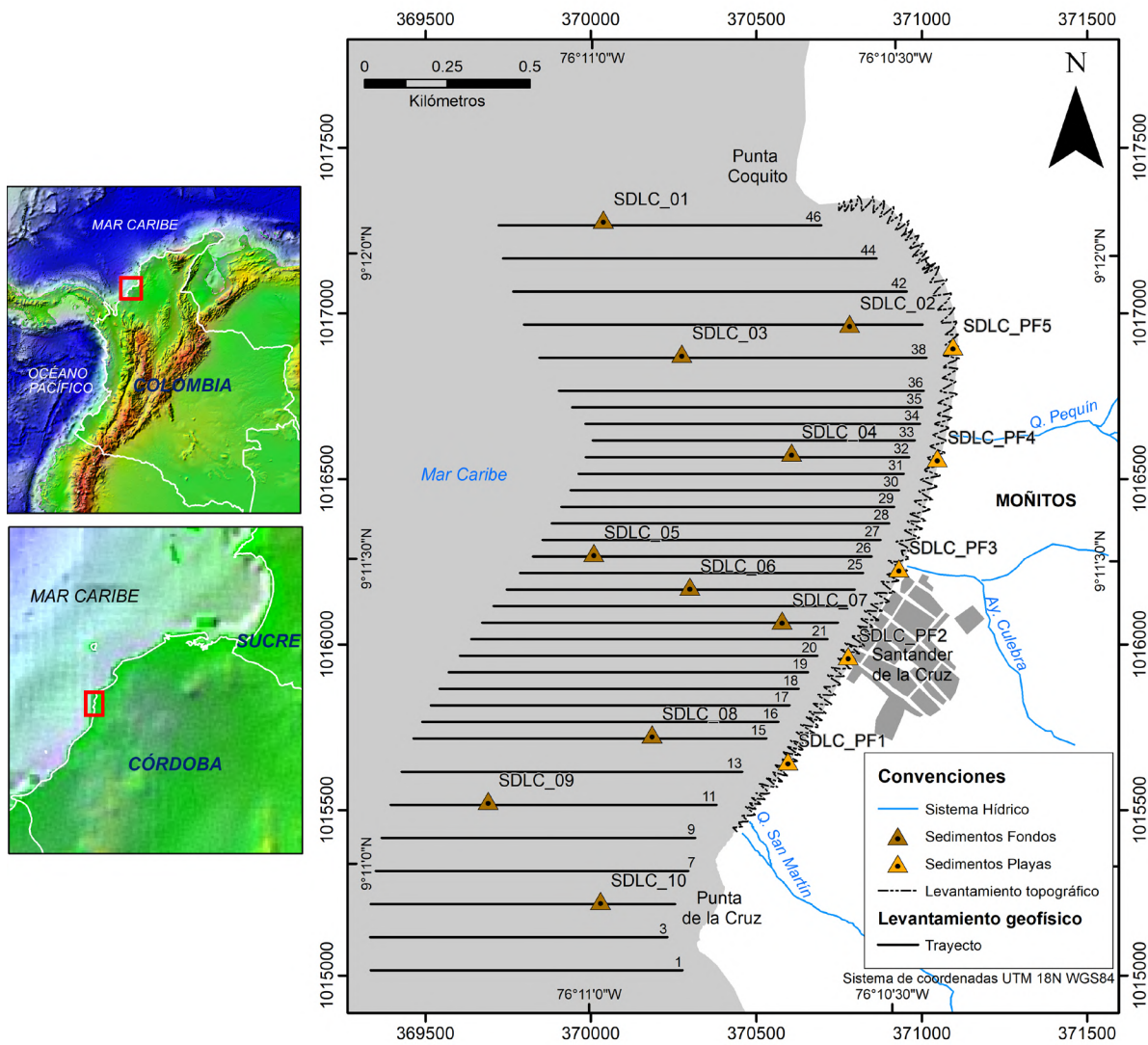


Figura 1. Localización del área de estudio con mapa de estaciones sedimentológicas y el plan de levantamiento topográfico y batimétrico llevado a cabo.

Metodología

Se realizó la caracterización geológica entre el 24 y el 26 de julio de 2018, con el fin de evaluar la viabilidad de implantación de arrecifes artificiales en pro de reducir la energía incidente de las olas sobre la costa, o en su defecto una alternativa para contrarrestar el oleaje. Para ello se realizó el registro de subsuelo del fondo somero frente a Santander de la Cruz desde 100 m de distancia de la playa hasta aproximadamente 1 km mar afuera de la línea de costa, realizando 34 perfiles para un total de 34,6 km recorridos (Figura 1). Se utilizó el perfilador de subsuelo SES2000 Compact

INNOMAR con frecuencias de 10 y 100 kHz, conectado a un computador portátil con *software* SES. Para asegurar la calidad de la información se utilizaron los siguientes equipos: un perfilador Digibar PRO para la velocidad promedio del sonido en la columna de agua antes y después del registro, un GNSS Geomax Zenith 35z para la posición del registro en tiempo real y la unidad de movimiento inercial Kongsberg para reducir la deformación por oleaje. El levantamiento se realizó en la proyección de coordenadas planas UTM zona 18 Norte, Datum WGS84, con una velocidad de adquisición de 4 nudos (7,4 km/h).

Para el procesamiento de información se utilizó el *software* ISE 2.9 (Innomar, 2009), cargando los archivos brutos de alta frecuencia sobre los cuales se digitalizó de manera automática el reflector del fondo marino. Se corrigieron datos anómalos según las variaciones en los ecos de los perfiles de subsuelo, y se exportaron los valores finales de las capas a archivos de texto en formato XYZ, manteniendo el formato de coordenadas de adquisición. Los archivos exportados fueron desplegados en un SIG para obtener la representación espacial de los datos batimétricos, con los cuales se realizó la interpolación del modelo topobatemétrico utilizando la herramienta *Natural Neighbor* de ArcGIS; se realizó el análisis espacial de sombras, pendiente y extracción de curvas de nivel. Se ajustó al área de cobertura a 2,6 km² y se incluyó un modelo de elevación de la playa emergida entre Punta Coquito y de la Cruz, realizado a partir de la interpolación de datos espaciales adquiridos en la misma semana de adquisición batimétrica con GNSS TOPCON GMS2 con corrección diferencial en postproceso (Figura 1).

Adicionalmente, se colectaron muestras de sedimento en fondos someros (10 estaciones) a través de una campaña de buceo con recolección manual hasta conseguir 500 g de muestra aproximadamente (Figura 1). Las muestras se almacenaron en bolsas para ser transportadas a INVEMAR, donde se realizó el análisis de laboratorio. En los sedimentos se realizó análisis de granulometría por tamices con diferencia de 1 Φ , mineralogía óptica y calcimetría, con el objetivo de determinar facies sedimentarias (Folk, 1974). Se obtuvieron los parámetros estadísticos de los sedimentos (media, selección, coeficiente de simetría y curtosis) utilizando el programa GRADISTAT 8.0 (Blott y Pye, 2001) con el cual se define la clasificación de tamaños y grupos texturales (Folk y Ward, 1957). Con cada uno de los parámetros se generaron mapas de distribución espacial utilizando el método de interpolación *Natural Neighbor* de ArcGIS.

Finalmente, se analizaron los resultados del análisis espacial considerando las características geológicas del área para la identificación e interpretación de los rasgos morfológicos del fondo asociados al potencial de implantación de la estructura arrecifal propuesta. Complementado con las descripciones del material

sedimentario colectado en los fondos, se establecieron las áreas de depósito superficiales en comparación con la zona rocosa de interés.

Resultados

Morfología del fondo somero

El modelo de elevación obtenido representó un relieve entre los 3,6 m de altura sobre el nivel del mar y -8,4 m de profundidad (Figura 2A). Partiendo de la cota 0 m, el depósito de playa sumergida presentó una pendiente ligeramente inclinada (5°) hasta llegar a una profundidad de 2 m a 40 m de la línea de costa. Posteriormente, hacia el occidente el fondo es plano y forma una cuenca para los sedimentos provenientes de los arroyos locales, en un depósito suprayacente a las unidades geológicas terciarias (Correa *et al.*, 2007a). En el perfil de subsuelo (Figura 3) se distingue cómo el plano sumergido es perturbado entre los 4 y 5 m de profundidad por una franja arrecifal que se eleva 2 m desde el fondo, y cuya extensión va desde el nororiente en el sector norte de la desembocadura de la quebrada Pequín, sumergiéndose en dirección al occidente con un giro hacia el sur hasta conectar con el nivel elevado asociado a la antigua punta de la Cruz. Además, algunos montículos aislados con 2 m de elevación se encuentran al suroccidente del área de estudio con profundidades en su base entre los 7 y 8 m; son posiblemente relictos de antiguos pináculos o islotes similares a los encontrados frente a la Punta Coquito al norte del área de estudio.

La transición entre la playa emergida y la sumergida se identificó como un área ligeramente inclinada (3-7%), que se va reduciendo a medida que aumenta la profundidad, pasando por una franja estrecha ligeramente plana (1-3%) hasta llegar al fondo somero considerado a nivel (0-1%) (Figura 2B). La homogeneidad del fondo se vio alterada por los cambios de pendiente asociados a la franja arrecifal, área en la cual las pendientes aumentan hasta ligeramente inclinadas, asociadas al carácter rocoso e irregular de dicha formación. El modelo de pendientes facilita la delimitación del área ocupada por la franja arrecifal, la cual presenta un área de 15,7 ha en un cinturón de 1,5 km, casi paralelo a la línea de costa con algunas discontinuidades.

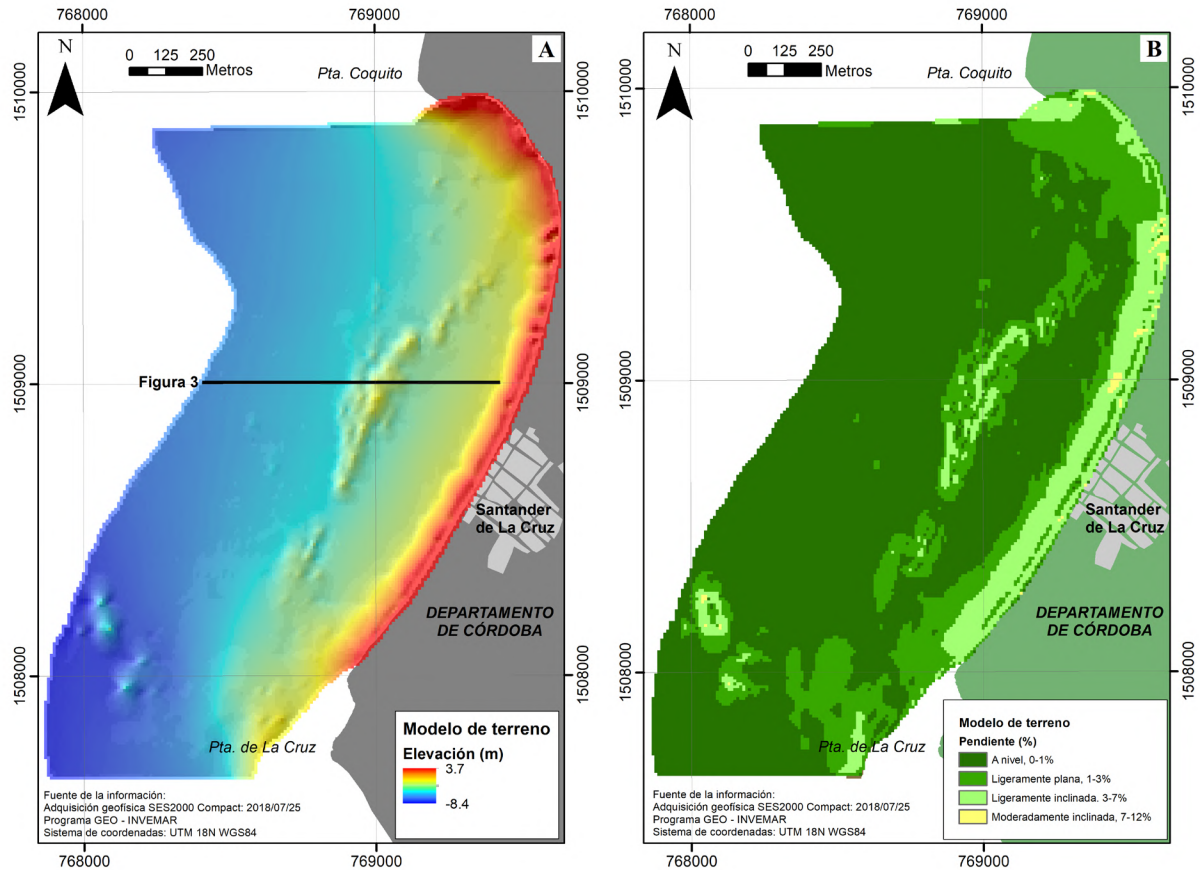


Figura 2. A. Modelo del terreno para el fondo sumergido en la zona marino-somera frente al corregimiento de Santander de la Cruz. B. Clasificación de la pendiente derivada del relieve del fondo somero.

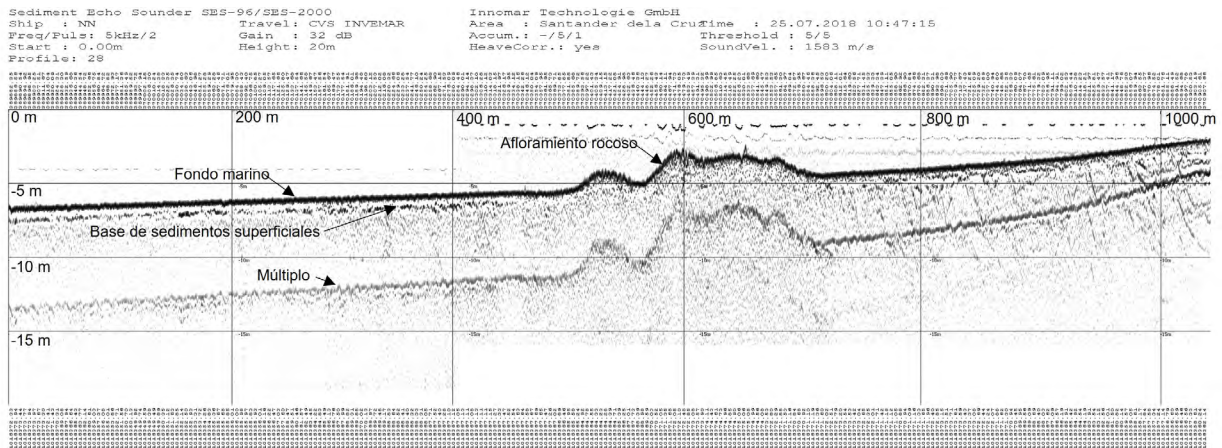


Figura 3. Perfil de subsuelo 28, localizado en la zona central del área de estudio (Figura 2A). Se aprecia la formación rocosa aflorante en el fondo marino.

Sedimentología

Los sedimentos del fondo somero presentaron dos tendencias; aquellos localizados en las zonas a nivel (pendiente 0-1%) tuvieron valores medios de limo muy grueso a arenas finas (SDLC_01, 03, 04, 05, 07) (Figura 4), pobremente seleccionados, característicos de los ambientes marinos. Un comportamiento diferente se identificó en los sedimentos (SDLC_08, 10) y muestra rocosa (SDLC_06) obtenida en inmediaciones de la franja arrecifal, estos dieron como tamaño medio arena media a gruesa con contenidos de grava, reflejando condiciones ambientales de sedimentación variable. Estos sedimentos tendieron a tener selección moderada, granos heterogéneos (dos o más familias de grano), indicando una zona de depósito de sedimento que entra por suspensión, arrastre o rodadura debido al efecto de variables físicas como corrientes, oleaje y en menor medida la incidencia desde la playa del transporte litoral.

La distribución granulométrica dio como resultado una clasificación del grupo textural de las muestras de fondo de tipo arena lodosa en ocasiones levemente gravosa, y arenas levemente gravosas en cercanías del área interpretada como sustrato rocoso (Figura 5A).

El contenido mineralógico (Figura 5B, 5C) en las muestras de sedimento de fondo es similar al de las playas en Santander de la Cruz, en cuanto al predominio del cuarzo (>40%) con fragmentos líticos y óxidos de hierro. Sin embargo, en estos se identificó materia orgánica (alrededor del 10%) y un mayor contenido de carbonatos de calcio (11%), representado por conchas, fragmentos de conchas, espículas de equinodermos y foraminíferos.

Capa de sedimentos superficial

A partir de los registros de subsuelo se identificó la profundidad del basamento por debajo de los sedimentos de fondo, probablemente conformado por unidades litológicas sedimentarias de tipo lodolitas y areniscas, conforme se encuentran en la zona costera del área de estudio. La profundidad del basamento es de 2,7 a 9,4 m con relación al nivel del mar (Figura 6A). El depósito de sedimentos en el fondo somero presentó un espesor promedio de 2 m, con un máximo de 5 m en las zonas más cercanas a la línea de costa y la formación de un depocentro en la zona de pendiente a nivel, entre la línea de costa y la franja arrecifal (Figura 6B).

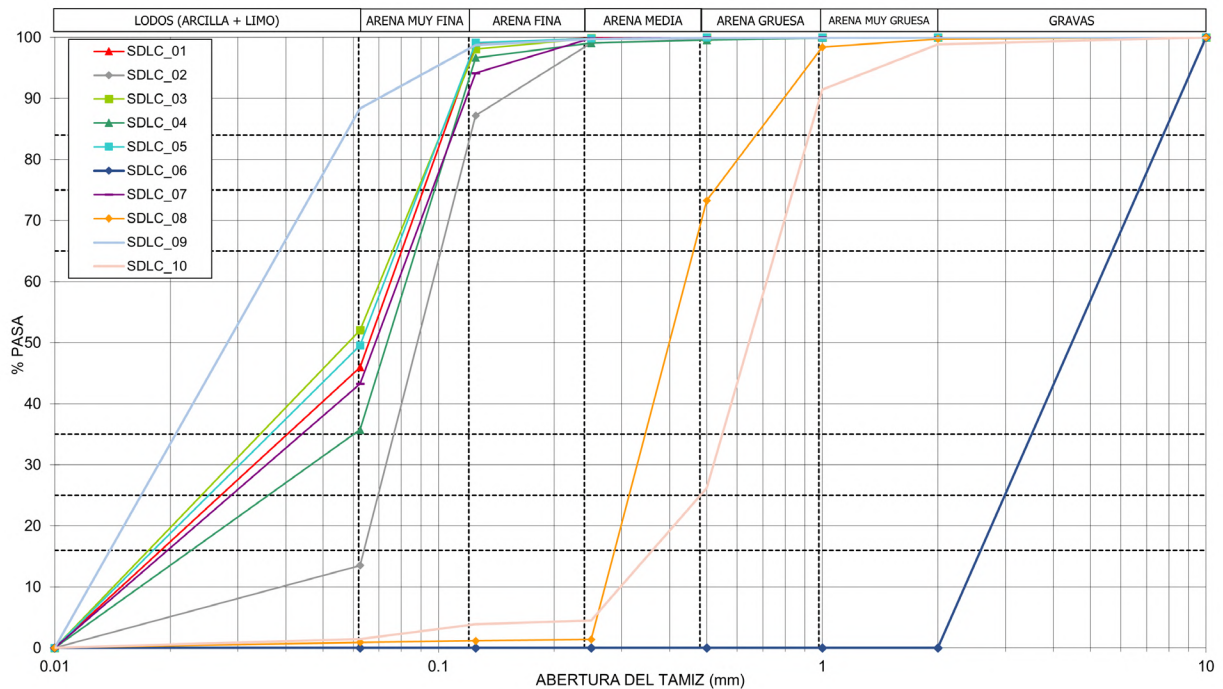


Figura 4. Distribución granulométrica acumulada de muestras de sedimentos en el fondo somero según su grupo textural.

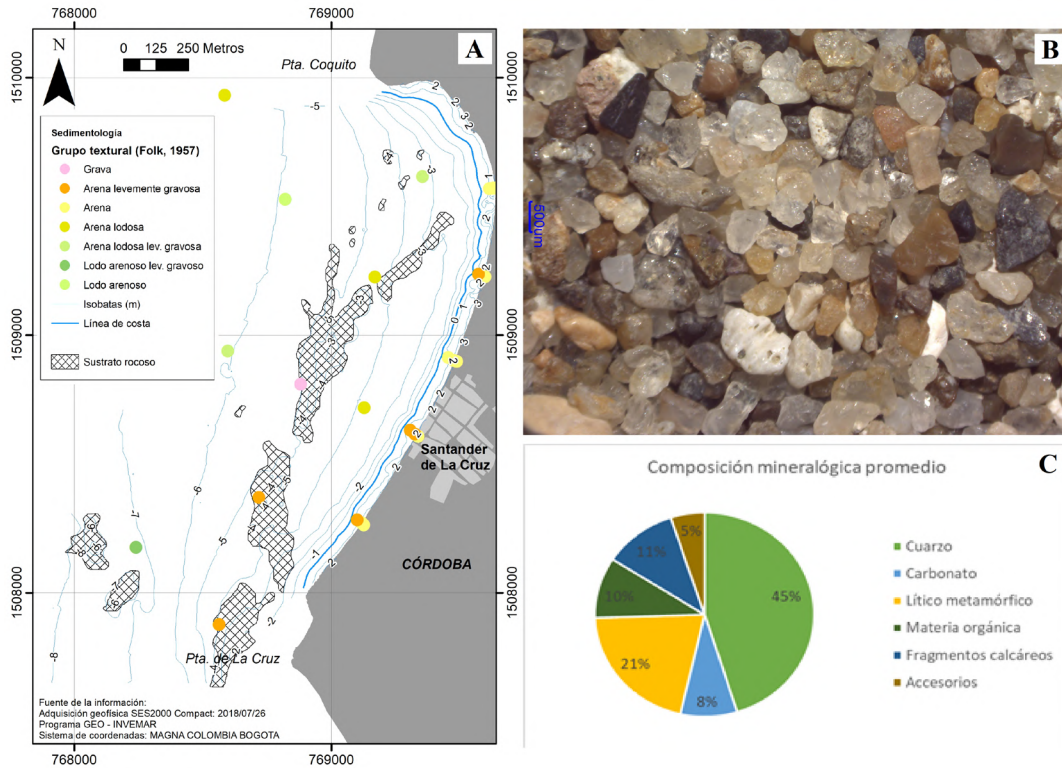


Figura 5. A. Mapa de clasificación de muestras de sedimentos en el fondo somero y en playas según su grupo textural. B. Contenido mineral en la fracción de 500 µm de la muestra SDLC_10. C. Composición mineralógica promedio predominante en los sedimentos del área de estudio.

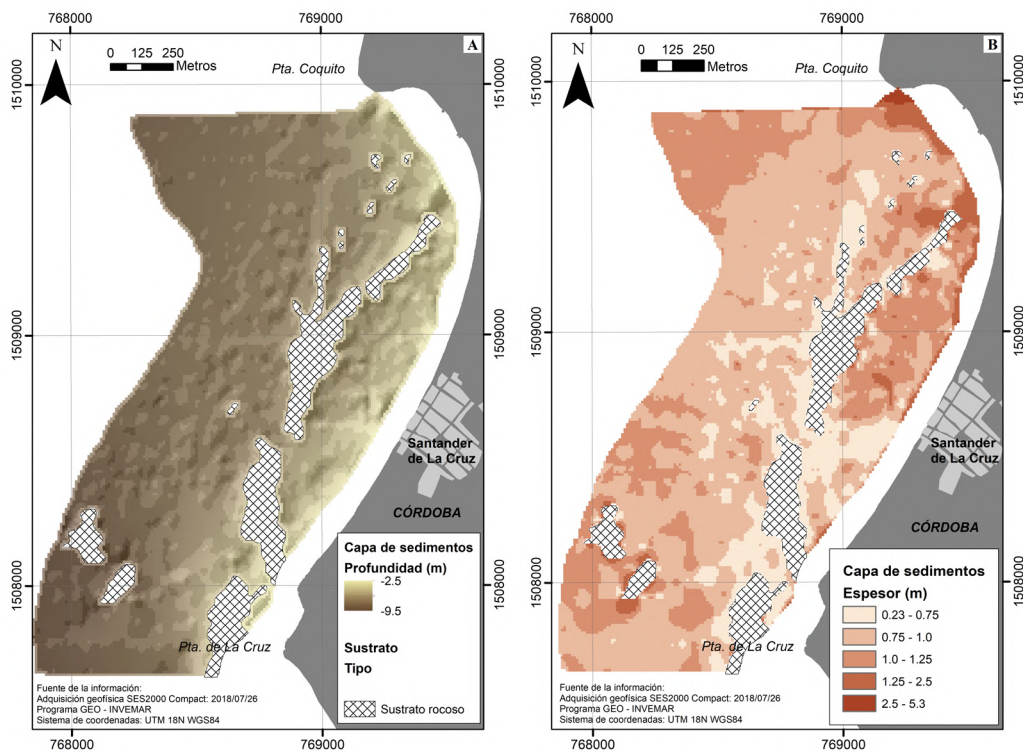


Figura 6. A. Profundidad a la base del depósito sedimentario o superficie del basamento. B. Espesor de la capa de sedimentos superficiales en el área de estudio.

Discusión

La franja rocosa sumergida identificada en los rasgos morfológicos del fondo marino en la ensenada frente al corregimiento de Santander de la Cruz tiene características naturales para la conformación de un arrecife. Dentro de las características físicas del litoral relevantes para este estudio, se destaca que es una terraza litoral inclinada formada por areniscas y arcillolitas con alturas notables en las Puntas Coquito y de la Cruz (~10 m) y alturas mínimas de 0,5 m al interior de las bahías (Correa *et al.*, 2007a). Estas unidades geológicas forman acantilados considerados geotécnicamente frágiles debido a su composición, la meteorización y sus rasgos estructurales (Rangel-Buitrago y Posada-Posada, 2005).

A pesar de que no se han evaluado las características geotécnicas de la roca sumergida, la presencia del sustrato rugoso en el área indica que la formación geológica a partir de la cual se ha desarrollado tiene condiciones de resistencia a la energía del oleaje y, por tanto, favorece que sobresalga desde el fondo marino. A nivel general, la plataforma somera se extiende hasta 3 km de distancia de la línea de costa, en la cual Correa *et al.* (2007a) describen que se presenta de forma cóncava con relieves positivos posiblemente asociados a sustratos rocosos (areniscas). Es notable cómo esta forma del relieve condiciona el depósito costero al cerrar de manera natural la cuenca de sedimentación a nivel local.

Para definir la viabilidad de implantar arrecifes artificiales en la bahía en frente a Santander de la Cruz, es necesario evaluar el tipo de organismo que pueda adaptarse y consolidar un biohermo (acumulaciones biogénicas), de acuerdo con las condiciones de temperatura, salinidad y turbidez que permitan su desarrollo óptimo. Un fragmento de roca obtenido en campo mostró la correspondencia de la franja sumergida con la continuidad de las lutitas de la Unidad Moñitos, que forman el sustrato sobre el cual se incrustan nemátodos y briozoos, entre otros organismos posibles formadores de biohermos.

Adicionalmente, esta información, junto con las direcciones de procedencia del oleaje en la zona, reflejará si los bajos rocosos presentes de manera natural están alineados de manera favorable para que exista una zona de amortiguamiento del oleaje. La construcción de una obra que favorezca el crecimiento de estos bajos podría atenuar de manera significativa la energía de la ola en virtud de su diseño, la ubicación

y procedencia natural del oleaje. Su implementación requiere la comprobación del modelo de transporte de sedimentos en función de la instalación del arrecife artificial, bajo diferentes consideraciones del tipo de material, geometría de la obra de la zona costera, entre otros (Van Rijn, 2011).

La propuesta es que los bajos puedan utilizarse como base para la conformación de un arrecife artificial, que permita la reducción de energía del oleaje al que se expone el área de estudio durante los primeros meses del año (Ordóñez-Zúñiga *et al.*, 2017). Sobre estas estructuras se podría incentivar la localización de ostras u otros organismos que se pueden utilizar como medidas de adaptación basadas en ecosistemas. Dicha estructura ayudaría a mitigar la energía del oleaje hacia la playa, además de prestar otros servicios ecosistémicos, tales como servicios de provisión (pesca) o recreacional (turismo), entre otros (Chen *et al.*, 2013; Hernández-Castellanos, 2017; Ramos *et al.*, 2019). Su localización y detalles de diseño (aún sin evaluar) estarían relacionados con la cadena de elevaciones sumergida paralela a la costa, reforzando el servicio ecosistémico para la retención de arena; en el corto plazo no se prevé que produzca procesos de cierre, debido a la profundidad a la que se encuentra la estructura rocosa (entre 3 y 5 m de profundidad), pero debe ser evaluado en una etapa posterior a través de modelación. Sin embargo, antes de tomar la decisión para su implementación, se deben considerar las consecuencias de la implementación sobre el ambiente físico local, el ecosistema, las actividades socioeconómicas y el impacto en áreas contiguas. Adicionalmente, dado que se opte por la instalación de bases artificiales complementarias a la estructura natural, se requiere de estudios de detalle para modelar el comportamiento en la disipación del oleaje y el transporte de sedimentos, como se dijo anteriormente (Osorio-Cano *et al.*, 2018). Finalmente, se debe considerar el conocimiento tradicional y el concepto de la comunidad para que el arrecife implementado sea aceptado y sostenible en el tiempo.

Las tendencias observadas espacialmente en la distribución de sedimentos muestran la posible incidencia del aporte de los arroyos continentales, con tamaños de sedimentos intermedios (arenas) que se transportan hacia el sur por deriva litoral (Correa *et al.*, 2007b). Debido a los procesos erosivos de la punta de la Cruz, es probable la exposición de la plataforma de abrasión conformada por unidades sedimentarias terciarias; esta morfología restringiría el transporte de sedimentos por arrastre, aunque favorecería aquellos

que se encuentran en suspensión. Esto generaría un déficit de sedimentos a nivel regional, ya que hacia la plataforma somera predominan las partículas más finas (limos y arcillas), cuya sedimentación estaría restringida debido a la corriente de deriva.

Frente a la erosión costera son varias las propuestas de alternativas que se pueden realizar, calificadas como: intervención sobre las costas (dura o blanda), relocalización, adaptación o abandono (Rangel-Buitrago *et al.*, 2015; Porro *et al.*, 2020). Utilizando como base la iniciativa de “Construyendo con la naturaleza” (Stronkhorst *et al.*, 2013), se seleccionaron algunas de estas acciones en la generación de modelos conceptuales para la intervención en zonas críticas a nivel nacional. Entre ellas, se menciona el desarrollo de arrecifes de coral, de los cuales uno de sus servicios ecosistémicos es la disipación del oleaje, que reduce las tasas de erosión como una iniciativa a largo plazo (Moberg y Rönnbäck, 2003; Stronkhorst *et al.*, 2013).

Para la implementación de una barrera arrecifal es necesario evaluar las condiciones geológicas, oceanográficas y bióticas bajo las cuales se pretende su desarrollo a nivel local. El conocimiento geológico y sedimentológico se convierte en la base de la descripción del ecosistema, y, por ende, en el primer acercamiento en la validación de la estrategia. Mediante la identificación de las condiciones geológicas favorables puede sustentarse que la existencia de sustratos duros favorece una implementación que no lleva a la afectación de los ecosistemas preexistentes (Wetzel *et al.*, 2014).

Conclusiones

El conocimiento sobre la geología del fondo en el frente costero del departamento de Córdoba permitió la identificación de rasgos morfológicos asociados a litologías duras que forman un relieve sobresaliente. Esta geoforma constituye una base potencial para la implementación de un arrecife artificial como estrategia de mitigación frente a la erosión costera. Las características de los sedimentos muestran la incidencia del sustrato rocoso como barrera entre los aportes continentales y la sedimentación fina del medio marino. La evaluación del estado en que se encuentra la unidad geológica aflorante y su relación con los factores oceanográficos y biológicos permitiría establecer la viabilidad de su implementación para la protección del corregimiento de Santander de la Cruz (Moñitos) u otras zonas donde la erosión costera presenta un grado de amenaza significativo en el departamento.

Agradecimientos

Esta investigación se desarrolló en el marco del convenio n.º 022 de 2018 entre la Corporación Autónoma de los Valles del Sinú y San Jorge CVS y el Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras, INVEMAR. Se agradece a la comunidad de Santander de la Cruz por su interés y permanente preocupación asociada a la problemática de erosión costera. Por los aportes al desarrollo del proyecto, al geógrafo Mauricio Bejarano y demás miembros del Programa Geociencias Marinas y Costeras.

Referencias

- Bardají, T.; Zazo, C.; Cabero, A.; Dabrio, C.J.; Goy, J.L.; Lario, J.; Silva, P.G. (2009). Impacto del Cambio Climático en el litoral. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 17(2), 141-154.
- Bird, C.O.; Sinclair, A.J.; Bell, P.S.; Phillips, M.; Green, C.; Hardiman, N. (2019). Autonomous monitoring of nearshore geomorphology and hydrodynamics to assist decision making in coastal management, using shore-based radar systems: A case study on the Fylde peninsula, UK. *ICE Coastal Management 2019*. La Rochelle, France.
- Blott, S.J.; Pye, K. (2001). Gradistat: A grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26(11), 1237-1248. <https://doi.org/10.1002/esp.261>
- Chen, J.L.; Chuang, C.T.; Jan, R.Q.; Liu, L.C.; Jan, M.S. (2013). Recreational Benefits of Ecosystem Services on and around Artificial Reefs: A Case Study in Penghu, Taiwan. *Ocean & Coastal Management*, 85(Part A), 58-64. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2013.09.005>
- Correa, I.D.; Acosta, S.; Bedoya, G. (2007a). *Análisis de las causas y monitoreo de la erosión litoral en el departamento de Córdoba*. Convenio de transferencia horizontal de Ciencia y Tecnología No. 30. Corporación Autónoma de los Valles del Sinú y del San Jorge-CVS; Universidad EAFIT, Departamento de Geología (Área de Ciencias del Mar). Fondo Editorial Universidad EAFIT, Medellín, 128 pp.
- Correa, I.; Ríos, A.; González, D.; Toro, M; Ojeda, G.; Restrepo, L. (2007b). Erosión litoral entre

- Arboletes y Punta San Bernardo, costa Caribe colombiana. *Boletín de Geología*, 29(2), 115-129.
- DeOliveira, J.F.; Barboza, E.G.; Martins, E.M.; Scarelli, F.M. (2019). Geomorphological and stratigraphic analysis applied to coastal management. *Journal of South American Earth Sciences*, 96. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102358>
- Folk, R.L. (1974). *Petrology of sedimentary rocks*. Hemphill Publishing Company.
- Folk, R.L.; Ward, W.C. (1957). Brazos River bar [Texas]; a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Research*, 27(1), 3-26. <https://doi.org/10.1306/74d70646-2b21-11d7-8648000102c1865d>
- Hernández-Castellanos, I.C. (2017). Diversidad de hidroides (hydroidolina), corales (hexacorallia), octocorales (octocorallia), y ascidias (ascidiacea) en arrecifes artificiales de la bahía de Pozos Colorados, Santa Marta, Colombia. Trabajo de Grado, Universidad Jorge Tadeo Lozano. Bogotá, Colombia.
- Innomar. (2009). *SES-2000, Narrow-Beam Parametric SubBottom Profilers Users Guide*. Innomar Technologie GmbH, 8.
- INVEMAR-CVS. (2013). Monitoreo de la erosión de los entes territoriales de la UAC costera del departamento de Córdoba (p. 68). Convenio No. 025 de 2012.
- INVEMAR-CVS. (2016). Avances en el conocimiento y lineamientos para el control de la erosión en la zona costera del departamento de Córdoba (p. 65). Convenio No. 027 de 2016.
- INVEMAR-CVS. (2017). Avances en el conocimiento y lineamientos para el control de la erosión en la zona costera del departamento de Córdoba (p. 51). Convenio No. 022 de 2017.
- INVEMAR-CVS. (2018). Avances en el conocimiento y lineamientos para el control de la erosión en la zona costera del departamento de Córdoba (p.99). Convenio No. 022 de 2018.
- Miselis, J.L. (2008). Nearshore morphology and lithology: Links to framework geology and shoreline change. PhD Dissertation, College of William and Mary ScholarWorks. <https://doi.org/10.25773/v5-8m7b-2t52>
- Moberg, F.; Rönnbäck, P. (2003). Ecosystem services of the tropical seascape: Interactions, substitutions and restoration. *Ocean and Coastal Management*, 46(1-2), 27-46. [https://doi.org/10.1016/S0964-5691\(02\)00119-9](https://doi.org/10.1016/S0964-5691(02)00119-9)
- Ordóñez-Zúñiga, A.; Peña-Mejía, C.; Bastidas-Salamanca, M.; Ricaurte-Villota, C. (2017). Región 8: Sinú-Urabá. En: C. Ricaurte-Villota, M.L. Bastidas Salamanca (eds.). *Regionalización oceanográfica: una visión dinámica del Caribe* (pp. 138-155). INVEMAR.
- Osorio-Cano, J.D.; Alcérreca-Huerta, J.C.; Osorio, A.F.; Oumeraci, H. (2018). CFD modelling of wave damping over a fringing reef in the Colombian Caribbean. *Coral Reefs*, 37(4), 1093-1108. <https://doi.org/10.1007/s00338-018-1736-4>
- Osorio-Cano, J.D.; Osorio, A.F.; Peláez-Zapata, D.S. (2019). Ecosystem management tools to study natural habitats as wave damping structures and coastal protection mechanisms. *Ecological Engineering*, 130, 282-295. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.07.015>
- Porro, R.; Kim, K.; Spirandelli, D.; Lowry, K. (2020). Evaluating erosion management strategies in Waikiki, Hawaii. *Ocean and Coastal Management*, 188. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2020.105113>
- Ramos, J; Lino, P.G.; Himes-Cornell, A.; Santos, M.N. (2019). Local fishermen's perceptions of the usefulness of artificial reef ecosystem services in Portugal. *PeerJ*, 6:e6206. <https://doi.org/10.7717/peerj.6206>
- Rangel-Buitrago, N.G.; Posada-Posada, B.O. (2005). Geomorfología y procesos erosivos en la costa norte del departamento de Córdoba, Caribe colombiano (sector Paso Nuevo- Cristo Rey). *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 34, 101-119. <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2005.34.0.236>
- Rangel-Buitrago, N.G.; Anfuso, G.; Williams, A.T. (2015). Coastal erosion along the Caribbean

- coast of Colombia: Magnitudes, causes and management. *Ocean and Coastal Management*, 114, 129-144. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.06.024>
- Serrano-Suárez, B.E. (2004). The Sinú river delta on the northwestern Caribbean coast of Colombia: Bay infilling associated with delta development. *Journal of South American Earth Sciences*, 16(7), 623-631. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2003.10.005>
- Stronkhorst, J.; Van der Spek, A.; Van Maren, B. (2013). A Quicksan of Building-with-Nature Solutions to Mitigate Coastal Erosion in Colombia. Interim report.
- Van Rijn, L.C. (2011). Coastal erosion and control. *Ocean and Coastal Management*, 54(12), 867-887. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2011.05.004>
- Wetzel, M.A.; Scholle, J.; Teschke, K. (2014). Artificial structures in sediment-dominated estuaries and their possible influences on the ecosystem. *Marine Environmental Research*, 99, 125-135. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2014.04.008>

Fecha de recibido: 12 de diciembre de 2020

Fecha de aceptado: 11 de septiembre 2023
