



**Influencia de la energía del oleaje incidente sobre las comunidades bentónicas en la  
plataforma calcárea de los Bajos de Punta Caribana, Necoclí (Colombia)**

Geraldin Morelo Muñoz

Seleccione tipo de documento para optar al título de Magíster en Ciencias del Mar

Asesores

Fernando Jose Parra Velandía, Doctor (PhD)

Vladimir Giovanni Toro Valencia, Doctor (PhD)

Universidad de Antioquia  
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales  
Maestría en Ciencias del Mar  
Turbo, Antioquia, Colombia  
2024

---

Cita

(Morelo-Muñoz et al., 2024)

---

**Referencia**

**Estilo APA 7 (2020)**

Morelo-Muñoz, G., Parra-Velandia, F. J., & Toro, V. G. (2024). *Influencia de la energía del oleaje incidente sobre las comunidades bentónicas en la plataforma calcárea de los Bajos de Punta Caribana, Necoclí (Colombia)* [Tesis de maestría]. Universidad de Antioquia, Turbo, Colombia.



Maestría en Ciencias del Mar, Cohorte IV.

Grupo de Investigación Estudios Oceánicos (GeOc).

Centro de Investigación en Ciencias Exactas y Naturales (CIEN).



Seleccione biblioteca, CRAI o centro de documentación UdeA (A-Z)

**Repositorio Institucional:** <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - [www.udea.edu.co](http://www.udea.edu.co)

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

## **Dedicatoria**

A Dios, a mis padres y a Juan Carlos que, gracias a su esfuerzo y motivación hicieron posible este logro, muchas gracias.

## **Agradecimientos**

A la Universidad de Antioquia y a la Corporación Académica Ambiental por permitirme avanzar en mi formación profesional. A mis asesores Fernando Jose Parra Velandia y Vladimir G. Toro por el acompañamiento y apoyo en el desarrollo de esta investigación. A mi coordinador de maestría por siempre estar atento y presto durante todo mi proceso. Al grupo de investigación GEOc por el apoyo. Al Programa Integral para el Monitoreo y Mitigación de la erosión Costera en el Litoral Antioqueño - PIMECLA por el apoyo en la realización de las salidas a campo. A la profe Heazel Grajales por el apoyo en el análisis de datos. A mis colegas Juan Guillermo Torres, Ferney Orejuela, Jose Manuel Zapata, Esneider Julio, Wilmer David Santero, Diomer Tobon e Isabel López, quienes me ayudaron en diferentes momentos durante el desarrollo de la investigación. A Lucho y el señor Gerod por su increíble trabajo y apoyo en el desarrollo de esta investigación.

## Tabla de contenido

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| Resumen .....                     | 9  |
| Abstract .....                    | 10 |
| 1. Introducción .....             | 11 |
| 2. Objetivos .....                | 18 |
| 2.1. Objetivo general .....       | 18 |
| 2.1.1. Objetivos específicos..... | 18 |
| 3. Marco teórico .....            | 19 |
| 4. Metodología .....              | 41 |
| 5. Resultados .....               | 52 |
| 6. Discusión.....                 | 67 |
| 7. Conclusiones .....             | 70 |
| 8. Recomendaciones .....          | 71 |
| 9. Referencias.....               | 72 |

## Lista de tablas

|                      |    |
|----------------------|----|
| <b>Tabla 1</b> ..... | 43 |
| <b>Tabla 2</b> ..... | 45 |
| <b>Tabla 3</b> ..... | 45 |
| <b>Tabla 4</b> ..... | 47 |
| <b>Tabla 6</b> ..... | 56 |
| <b>Tabla 7</b> ..... | 57 |
| <b>Tabla 8</b> ..... | 58 |
| <b>Tabla 9</b> ..... | 62 |

## Lista de figuras

|                        |    |
|------------------------|----|
| <b>Figura 1</b> .....  | 20 |
| <b>Figura 2</b> .....  | 20 |
| <b>Figura 3</b> .....  | 24 |
| <b>Figura 4</b> .....  | 27 |
| <b>Figura 5</b> .....  | 29 |
| <b>Figura 6</b> .....  | 30 |
| <b>Figura 7</b> .....  | 30 |
| <b>Figura 8</b> .....  | 31 |
| <b>Figura 9</b> .....  | 32 |
| <b>Figura 10</b> ..... | 33 |
| <b>Figura 11</b> ..... | 34 |
| <b>Figura 12</b> ..... | 35 |
| <b>Figura 13</b> ..... | 36 |
| <b>Figura 14</b> ..... | 41 |

|                        |    |
|------------------------|----|
| <b>Figura 15</b> ..... | 44 |
| <b>Figura 16</b> ..... | 44 |
| <b>Figura 17</b> ..... | 45 |
| <b>Figura 18</b> ..... | 46 |
| <b>Figura 19</b> ..... | 48 |
| <b>Figura 20</b> ..... | 49 |
| <b>Figura 21</b> ..... | 50 |
| <b>Figura 22</b> ..... | 50 |
| <b>Figura 23</b> ..... | 52 |
| <b>Figura 24</b> ..... | 53 |
| <b>Figura 25</b> ..... | 54 |
| <b>Figura 26</b> ..... | 55 |
| <b>Figura 27</b> ..... | 57 |
| <b>Figura 28</b> ..... | 58 |
| <b>Figura 29</b> ..... | 59 |
| <b>Figura 30</b> ..... | 61 |
| <b>Figura 31</b> ..... | 61 |
| <b>Figura 32</b> ..... | 63 |
| <b>Figura 33</b> ..... | 64 |
| <b>Figura 34</b> ..... | 65 |

## Siglas, acrónimos y abreviaturas

|                        |   |
|------------------------|---|
| <b>A.P.</b>            | Años del presente                                   |
| <b>ArcGIS</b>          | Software de Sistemas de Información Geográfica      |
| <b>CPCe</b>            | Coral Point Count with Excel extensions             |
| <b>CO</b>              | Costado oriental                                    |
| <b>COC</b>             | Costado occidental                                  |
| <b>°C</b>              | Grados centígrados                                  |
| <b>cm</b>              | Centímetros   |
| <b>ERA5</b>            | Reanálisis atmosféricos del clima global producidos |
| <b>ESRI</b>            | Environmental Systems Research Institute            |
| <b>GCRMN</b>           | Global Coral Reef Monitoring Network                |
| <b>GPS</b>             | Sistema de Posicionamiento Global                   |
| <b>GIMP</b>            | Programa de Manipulación de Imágenes GNU            |
| <b>Hs</b>              | Altura de ola significativa                         |
| <b>Hz</b>              | Frecuencia de vibración de una onda                 |
| <b>km<sup>2</sup></b>  | Kilómetros cuadrados                                |
| <b>km</b>              | Kilómetros  |
| <b>m<sup>3</sup>/s</b> | Metros cúbicos por segundo                          |
| <b>m<sup>2</sup></b>   | Metros cuadrado                                     |
| <b>m</b>               | Metros  |
| <b>min</b>             | Minutos   |
| <b>N</b>               | Norte   |
| <b>NE</b>              | Noreste   |
| <b>NO</b>              | Noroeste  |
| <b>NCRI</b>            | National Coral Reef Institute's                     |
| <b>RECON</b>           | Reef Condition Monitoring Program                   |
| <b>ROV</b>             | Vehículo de operación remota                        |
| <b>s</b>               | Segundos  |
| <b>spp</b>             | Especie   |
| <b>Tp</b>              | Periodo asociado al pico espectral                  |

|            |                              |
|------------|------------------------------|
| <b>psu</b> | Unidad práctica de salinidad |
| <b>PVC</b> | Policloruro de vinilo        |
| <b>PNN</b> | Parque Nacional Natural      |
| <b>W</b>   | Occidente                    |
| <b>W/m</b> | Watts por metro              |



## Resumen

Se evaluó la influencia de la energía del oleaje incidente, modificada por los Bajos de Punta Caribana, sobre la cobertura de las comunidades bentónicas. Para caracterizar el oleaje, se instalaron sensores de presión in situ en el área. Adicionalmente, de la base de datos ERA5 se descargaron datos de altura de ola significativa, periodo asociado al pico espectral y dirección promedio. Posteriormente, se calculó la energía del oleaje, el porcentaje de disipación, y se ejecutaron tres casos característicos del oleaje en el modelo Delft3D. Finalmente, se estimó la cobertura de las comunidades usando buceo autónomo, foto-transectos y el programa CPC V.4.1. Se determinó que la dirección predominante del oleaje que llega a Punta Caribana es Noreste. En el costado oriental, la energía del oleaje que llega de esta dirección se ve reducida en 27% por efecto del Bajo. El porcentaje de cobertura de las principales comunidades bentónicas es similar en ambos costados del Bajo, solo el porcentaje de cobertura de esponjas presentó diferencias significativas ( $p = 0.01$ ) entre ambos costados siendo mayor en el costado occidental. A pesar de la diferencia energética del oleaje entre los costados del Bajo no se identificó influencia directa sobre el porcentaje de cobertura de la comunidad bentónica, excepto en el caso de las esponjas. Es necesario evaluar si la diferencia de cobertura de ellas está asociada al gradiente de salinidad, a la sedimentación o a la cantidad de materia orgánica proveniente de descargas continentales cercanas y del río Atrato.

*Palabras clave:* Golfo de Urabá, corales, hidrodinámica, porífera, ambiente subóptimo

## **Abstract**

The influence of the incident wave energy, modified by the Punta Caribana shoals, on the coverage of benthic communities was evaluated. To characterize the wave conditions, in situ pressure sensors were installed in the area. Additionally, data on significant wave height, peak spectral period, and average direction were downloaded from the ERA5 database. Wave energy and dissipation percentage were calculated, and three characteristic wave cases were modeled using Delft3D. Benthic community coverage was estimated using scuba diving, photo-transects, and the CPC V.4.1 program. It was determined that the predominant wave direction reaching Punta Caribana is Northeast. On the eastern side, wave energy from this direction is reduced by 27% due to the shoal. The coverage percentage of the main benthic communities is similar on both sides of the shoal, with only sponge coverage showing significant differences ( $p = 0.01$ ), being higher on the western side. Despite the energy difference in the waves between the sides of the shoal, no direct influence on the benthic community coverage percentage was identified, except for sponges. It is necessary to evaluate whether the difference in sponge coverage is associated with salinity gradients, sedimentation, or the amount of organic matter from nearby continental discharges and the Atrato River.

*Keywords:* Uraba Gulf, corals, hydrodynamics, porifera, suboptimal environmental

## 1. Introducción

Los arrecifes coralinos son ecosistemas bentónicos que bajo condiciones ideales (nutrientes, salinidad, temperatura, transparencia, entre otros) pueden prosperar y desarrollarse formando estructuras complejas de carbonato de calcio sobre los fondos duros. Sin embargo, estas mismas condiciones limitan la distribución de los arrecifes de coral, y los hacen sensibles a los cambios que ocurren en el medio marino. Adicionalmente, la gran cantidad de carbonato de calcio que los arrecifes depositan forman estructuras tridimensionales que modifican sustancialmente la topografía del lecho marino. Estas alteraciones topográficas pueden disipar la energía de las olas entrantes (hasta  $\approx 97\%$ ), reducir la altura de las olas (64–76%) (Lugo-Fernández, Roberts y Suhayda, 1998; Ferrario, Beck, Storlazzi, Micheli, Shepard y Airoidi, 2014), influir en las propiedades físicas y ecológicas del entorno (Geister, 1977 en Pandolfi, 2011), impulsar la dinámica y la absorción de nutrientes por parte de las comunidades bentónicas (Falter et al., 2004), y modificar el transporte y la dispersión de larvas y otros organismos (Wolanski y Sarsenski, 1997). Por consiguiente, describir la hidrodinámica de estos ecosistemas es fundamental para entender su desarrollo morfológico y su zonificación espacial (Kench y Brander, 2006).

En el Caribe Colombiano se presentan arrecifes coralinos geomorfológica y estructuralmente diferentes entre sí, incluyendo atolones oceánicos, archipiélagos diapíricos continentales y arrecifes franjeantes y de parche confinados al interior de bahías y ensenadas de aguas relativamente claras y protegidas del oleaje (Díaz, Díaz-Pulido, Garzón-Ferreira, Geister, Sánchez y Zea, 1996). En términos hidrodinámicos, se reportan varios estudios que estudian los arrecifes coralinos y la dinámica física de la zona (Pinzón, Perdomo y Díaz, 1998; Díaz-Pulido, Sánchez, Zea, Díaz y Garzón, 2004; Osorio-Cano, Alcérreca-Huerta, Osorio y Oumeraci, 2018; Fajardo y Lonin, 2022; Lonin, Adames, Payares Varela, Marriaga Rocha, 2022; entre otros).

En el Golfo de Urabá, se han reportado arrecifes franjeantes y de parche en las bahías de Capurganá y Sapzurro, en el margen noroccidental del Golfo (Díaz et al., 1996); y recientemente se reportó la existencia de un parche coralino ( $\approx 0,4 \text{ km}^2$ ) junto a una plataforma calcárea con comunidades coralinas fósiles con aspecto de barrera ( $\approx 5,1 \text{ km}^2$ ) en la zona de los Bajos de Punta Caribana, extremo Oriental del Golfo de Urabá (Parra-Velandia et al., 2017; Morelo-Muñoz y Martínez-Castro, 2018; Nobles, 2023). Este hallazgo ha permitido obtener mayor claridad sobre el funcionamiento ecológico de los arrecifes en zonas subóptimas, dado el impacto directo del Río

Atrato (descarga  $\approx 2500 \text{ m}^3/\text{s}$  época seca y  $5000 \text{ m}^3/\text{s}$  época húmeda; Montoya y Toro, 2006) en términos de salinidad y sedimentos. La zona de Punta Caribana rompe con las reglas ecológicas respecto a las condiciones ambientales que se consideran típicas para el desarrollo de los ecosistemas coralinos tropicales de aguas someras. Sin embargo, no existen estudios sobre la influencia de las condiciones físicas sobre las comunidades coralinas. La gran mayoría de los estudios se han centrado en la dinámica física, como: la influencia del Río Atrato sobre la salinidad superficial (Bernal, Montoya, Garizábal y Toro, 2005), los patrones de circulación de las bahías Sapzurro y Capurganá mediante la implementación de un modelo hidrodinámico (Hoyos, Florville y Palacio, 2008), la dinámica oceanográfica del Golfo de Urabá (Jaramillo, 2010; Toro et al., 2019), y el estudio de la pluma del Río Atrato (Montoya, Toro-Botero y Gómez-Giraldo, 2017).

Para el caso del ecosistema coralino y plataforma calcárea fósil en Punta Caribana, en la actualidad no existen estudios sobre la dinámica oceanográfica y su influencia sobre las comunidades coralinas bentónicas de la zona. Hasta el presente se cuenta con la descripción de la estructura de las comunidades bentónicas (Correa-Rendón et al., 2015), una descripción preliminar de la estructura de la comunidad coralina y demersal (Parra-Velandia et al., 2017) y un estudio sobre la influencia de las variables oceanográficas sobre la distribución de microgasterópodos (Morelo-Muñoz y Martínez-Castro, 2018). Aún se desconoce como estas comunidades se establecieron a pesar de las condiciones subóptimas de la zona para su desarrollo. Sin embargo, el estudio de núcleos sedimentarios describió la existencia de dos ambientes contrastantes en el Golfo de Urabá, de 2800 a 2325 años antes del presente (A.P.) un ambiente dominado por aguas marinas especialmente hacia el norte del golfo y a partir de 2325 A.P. hasta la actualidad un ambiente de mezcla dominado por aguas estuarinas (Ospina-Hoyos, Palacio-Baena y Vásquez-Bedoya, 2014). Este resultado puede explicar parcialmente la existencia de comunidades coralinas fósiles en la zona de Punta Caribana pues el sector norte del Golfo al ser dominado por aguas marinas presentó condiciones que favorecían el desarrollo de estas comunidades. Sin embargo, el cambio de estas condiciones ocasionó que parte de la comunidad coralina bentónica desapareciera (lo que vemos hoy como plataforma calcárea fósil) y las especies más resistentes sobrevivieran en las zonas mejor protegidas del bajo, configurando lo que vemos hoy en Punta Caribana. Por otro lado, no se cuenta con una descripción de la geomorfología de todo el sistema de Bajos, con mediciones oceanográficas *in situ*, ni con una descripción de la estructura de las comunidades de la plataforma calcárea adyacente que nos podría indicar como fue la dinámica pasada en la zona.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, esta investigación describió la influencia de la energía del oleaje incidente sobre las comunidades bentónicas por medio de la identificación de la composición de las comunidades presentes en la plataforma calcárea.

## **Antecedentes**

En algunos sitios del Mar Caribe, se ha estudiado la geomorfología, la topografía y los efectos de los arrecifes coralinos sobre la dinámica física y ecológica de su entorno. Es así como Ibarra (2008) realizó una descripción de las facies y la estructura geológica del sistema arrecifal de Punta Maroma (Quintana Roo, México) usando análisis de núcleos y la geomorfología. Sus resultados, mostraron la existencia de una sola facie compuesta de guijarros de arrecifes holocénicos y que los huracanes son el principal control del desarrollo del arrecife y no los rasgos topográficos.

En el estudio de la topografía y la comunidad bentónica de los arrecifes en la Costa del Banco en el Golfo de México (Campeche, México), se concluyó que, dada la composición, tamaño y densidad de las colonias de coral, estos arrecifes están sometidos a un gran estrés, incluyendo la presencia de especies invasoras (*Carijoa riisei*). Además, dado que los fondos arenosos que rodean el área presentan baja complejidad topográfica, estos arrecifes son centro de importantes recursos marinos y de biodiversidad (Zarco-Perelló et al., 2013).

La ecología y la salud de los arrecifes están íntimamente conectadas con los procesos físicos y la dinámica de las aguas. En ese sentido, la hidrodinámica de la laguna arrecifal en un arrecife franjeantes en Yucatán (Puerto Morelos, México) fue determinada por la influencia de cuatro principales forzamientos: el oleaje como agente dominante de la circulación en la laguna arrecifal, la marea y el viento y en último lugar, la Corriente de Yucatán (CY) que incide en la eficiencia de los flujos inducidos por oleaje. Se observó como la interacción de estos factores durante el verano causó la formación de condiciones propicias para la aparición de blanqueamiento coralino (Coronado, 2005).

En Colombia la mayoría de las áreas coralinas relevantes del Caribe y el Pacífico han sido estudiadas con algún grado de detalle, incluidas las áreas cercanas a Punta Caribana (Díaz et al., 2000; Urriago et al., 2011). Por ejemplo, la interpretación de fotografías aéreas, observaciones de campo y perfiles de esconda permitió clasificar a Isla Fuerte como un complejo arrecifal holocénico

parcialmente emergido de la plataforma continental. Y al Bajo Bushnell como un banco coralino aislado en un sector marginal de la plataforma (Díaz et al., 1996) según la nomenclatura propuesta por Geister (1983). Así mismo se determinó que, a pesar de su proximidad geográfica, entre las dos áreas se presentan diferencias ambientales marcadas (grado de exposición al oleaje, inclinación del sustrato, profundidad y sedimentación) reflejadas en la ausencia/presencia de especies y en la composición y estructura de las comunidades bentónicas (Díaz et al., 1996).

De acuerdo con el análisis de fotografías aéreas y video-transectos se estableció que Isla Arena, formación coralina en el área de influencia de la pluma del Río Magdalena al suroccidente de Bocas de Ceniza, presenta 10 zonas ecológicas dominadas por una o más especies de coral, cuya distribución está determinada por el tipo de sustrato y la energía del oleaje. En este estudio se halló también que las 14 especies de coral encontradas son particularmente resistentes a condiciones subóptimas como alta turbidez y turbulencia (Pinzón et al., 1998).

La descripción de la geomorfología de las unidades ecológicas del complejo de arrecifes de las Islas del Rosario e Isla Barú en Cartagena, Bolívar, mostró que este complejo arrecifal es el resultado de sucesivas etapas de construcción y erosión asociadas a los cambios del nivel del mar. Este sitio presenta relieve irregular con varios tipos geomorfológicos básicos (franjeantes, bancos y parches) y dominan corales masivos e incrustantes, junto con algas oportunistas (características de las unidades del Caribe). Así mismo, su distribución está dada por la intensidad del oleaje, y la disponibilidad de luz y sustrato duro. Posiblemente, este sitio no se ha desarrollado al máximo debido a su escasa edad geológica (10,000 años), a la influencia de aguas turbias y sedimentos, y dada la poca profundidad por su cercanía al continente. Estas condiciones anteriormente descritas, también son similares a las encontradas en el Archipiélago de San Bernardo y en Isla Fuerte (Díaz et al., 1996).

En la zona del Golfo de Morrosquillo, la caracterización del estado de las formaciones coralinas en la región de San Antero, Caribe Colombiano, con base en la cobertura de los principales componentes bentónicos registró 16 especies de coral (15 escleractinios y un milleporino), con una alta cobertura global del grupo (45,4 %), seguido de macroalgas (24,3 %) y sustrato abiótico (20,4 %). Los resultados indicaron que estas formaciones coralinas están en buen estado, a pesar del bajo número de especies registradas (Ruidíaz-Ruidíaz et al., 2021).

En Isla Tesoro al norte del Archipiélago de las Islas del Rosario en el Mar Caribe Colombiano, se realizaron mediciones sobre el perfil del arrecife con el fin validar un modelo y

cuantificar la amortiguación de las olas causadas por la ruptura de las olas y la rugosidad del arrecife en diferentes condiciones. Los resultados arrojaron que la altura de ola presenta variación en su atenuación a lo largo del perfil del arrecife, presentando diferencias de hasta el 55% entre los diferentes escenarios de arrecifes con superficies lisas y ásperas específicamente en condiciones de olas moderadas, además, la zona de la terraza y la cresta del arrecife son las zonas donde se presenta la mayor disipación, donde la rugosidad del arrecife no es significativa en atenuación del oleaje bajo condiciones extremas, siendo la disipación por rotura el mecanismo dominante gracias a la morfología del arrecife (Osorio-Cano et al., 2018).

En el sector Nor-Oriental de la Isla de San Andrés, se caracterizó la circulación del agua inducida por el oleaje sobre la barrera de arrecife de coral perteneciente a la reserva de la Biosfera Seaflower. Con base a información batimétrica levantada con ecosonda y procesamiento de datos obtenidos de imágenes satelitales, se utilizó el modelo SWAN y se determinó un comportamiento bimodal en la hidrodinámica del área de estudio dependiente en gran medida de la altura, el periodo y la dirección del oleaje. Y se determinó que el flujo medio de energía de olas era el responsable del crecimiento evolutivo de la barrera en su ubicación y orientación actual (Fajardo y Lonin, 2021).

En la Isla Cayos de Serranilla en el Caribe Colombiano, por medio de la correlación entre la estimación de la batimetría sintética utilizando imágenes satelitales Worldview2 y los datos batimétricos in situ obtenidos con un ecosonda monohaz, se logró ingresar los datos al modelo espectral de oleaje SWAN en tres dominios con el fin de propagar el oleaje desde aguas profundas hasta la barrera arrecifal obteniendo perfiles logarítmicos asociados al sustrato del fondo (arenas y coral). Se obtuvo el clima de olas para 20 años (hasta 2018), con una altura significativa de 1.7 m, un periodo pico de 7.3 s y una dirección de 93° E. En las vecindades de Cayos de Serranilla se evidenció el efecto de refracción por el fondo y se pudo corroborar la dirección del oleaje respecto a la barrera de coral (Lonin, Adames, Payares y Marriaga, 2022).

En el Golfo de Urabá, las formaciones coralinas en el costado Oeste del Golfo han sido poco estudiadas. En general, dichos estudios se han realizado como parte de trabajos, enfocados en la descripción de sus aspectos generales (Prahly y Erhardt, 1985), contexto geográfico y propiedades ecológicas (Wells, 1988), y estructura ecológica y geomorfológica (Díaz et al., 2000). En el Costado oeste del Golfo hasta el año 2002 se habían identificado arrecifes coralinos franjeantes y de parche en cuatro sitios: Cabo Tiburón, Capurganá, El Aguacate y Sapzurro. En Cabo Tiburón,

la cobertura coralina fue de 37% y está estuvo dominada por *Pseudodiplora strigosa*, *Montastraea cavernosa* y *Colpophyllia natans*, con abundante presencia de gorgonáceos. En Capurganá se reportaron zonas con cobertura coralina de 60% dominadas por *Siderastrea siderea* y *Agaricia tenuifolia* y zonas con 31% de cobertura dominadas por *Pseudodiplora strigosa*, *Montastraea cavernosa* y *Colpophyllia natans* con numerosos gorgonaceos de tipo abanico, plumas y varas. El Aguacate, con 47% de cobertura coralina, tenía colonias de *Siderastrea siderea* y *Agaricia tenuifolia* con tamaño considerable y algas filamentosas. En Sapzurro, el promedio de cobertura coralina fue de 30%, con colonias de mayor tamaño y similitudes específicas con Cabo Tiburón en cuanto a composición (Garzon-Ferreira et al., 2002).

Por otro lado, aunque la costa continental del Caribe colombiano presenta zonas con condiciones ambientales favorables para el asentamiento y desarrollo de comunidades coralinas como Islas de San Bernardo, Islas del Rosario, Isla Fuerte y el PNN Tayrona (Diaz et al., 2000), también se han reportado zonas de crecimiento en condiciones atípicas, entre las que se pueden mencionar Bahía de Portete (La Guajira), influenciada por grandes cantidades de sedimentos que se depositan sobre el mar (Solano, 1994; Diaz et al., 2000). El Banco las Ánimas (Magdalena) frente al complejo de la Ciénaga Grande de Santa Marta con la influencia del Río Magdalena (Díaz et al., 1994; Diaz et al., 2000), Isla Arena (Bolívar) localizada a 8 km de la costa al suroccidente de Bocas de Ceniza (Pinzón et al., 1998; Diaz et al., 2000; Sierra, 2018). El Bajo Salmedina (Bolívar, 6 km al occidente de la Bahía de Cartagena) presenta tres elevaciones de origen diapírico influenciadas por los flujos de sedimentos de las aguas servidas de la Bahía de Cartagena y, dependiendo de la época del año, la influencia de las descargas continentales del Río Magdalena (Diaz et al., 2000; Domínguez et al., 2010). En la Bahía de Cartagena se encuentra el arrecife de Varadero (Bolívar), ubicado en el canal de navegación entre Bocachica e Isla de Barú con una superficie aproximada de 1,1 km<sup>2</sup>, está influenciado por la contaminación y sedimentación terrestre que desembocan en la bahía a través del canal del Dique (López-Victoria et al., 2015; Pizarro et al., 2017). En la región de San Antero (Córdoba) sobre la desembocadura del Río Sinú, en los sectores de Playa Blanca, Punta Bello y Punta Bolívar, se reportó la presencia de pequeñas formaciones coralinas (Ruidíaz-Ruidíaz et al., 2021). La Isla Tortuguilla (Córdoba) localizada a 9 km de Puerto escondido tiene un área ocupada por formaciones coralinas de 0,7 km<sup>2</sup>, caracterizada por un alta turbidez y sedimentación, en esta se desarrollan formaciones de arrecifes de tipo parche (Diaz et al., 2000; López y Márquez, 2000). Al noreste del golfo, entre el delta del Río Sinú y Punta



Caribana se presentan altas descargas de ríos que provocan alteración de las propiedades químicas del agua como baja salinidad y una alta turbidez, dependiendo de la época climática, generando condiciones atípicas para la formación de comunidades coralinas (Rangel y Idarraga, 2010), sin embargo, en Punta Caribana se han descrito comunidades bentónicas asociadas a bajos arrecifales (Correa-Rendón et al., 2015; Parra-Velandia et al., 2017). Finalmente, en la zona cercana a la desembocadura del Río San Juan sobre una franja de arena lodosa litoclástica y lodosa lito bioclástica en el área de influencia directa de los sedimentos del Río Mulatos, Río San Juan y en menor proporción por los procedentes del Golfo de Urabá (Rangel y Idarraga, 2010) se ha descrito recientemente el Bajo San Juan (Nobles, 2023).

## 2. Objetivos

### 2.1. Objetivo general

Evaluar la influencia entre la energía del oleaje incidente, y modificado por la plataforma calcárea de los Bajos de Punta Caribana, con la cobertura de las comunidades bentónicas.

#### 2.1.1. *Objetivos específicos*

Describir la estructura espacial y relieve de la plataforma calcárea de los Bajos de Punta Caribana por medio de análisis de imágenes satelitales y verificación en campo.

Determinar la cobertura de las comunidades bentónicas en la plataforma calcárea de los Bajos de Punta Caribana usando la metodología de foto transectos.

Describir las características del oleaje como altura significativa de las olas, periodo, energía y porcentaje de disipación del oleaje en la zona a través de mediciones in situ y dirección del oleaje a través de sensores satelitales.

Establecer la influencia de las coberturas de las comunidades bentónicas y el efecto de la plataforma en la disipación del oleaje.

### 3. Marco teórico

#### Oleaje

El oleaje en los océanos es generado por diversos factores, siendo el principal de ellos el viento, el cual, genera las ondas más comunes y de mayor densidad energética (McCormick, 1981). En particular, la forma más sobresaliente de la energía en el océano corresponde a las ondas superficiales generadas por el viento (wind sea) y generado por tormentas lejanas (swell).

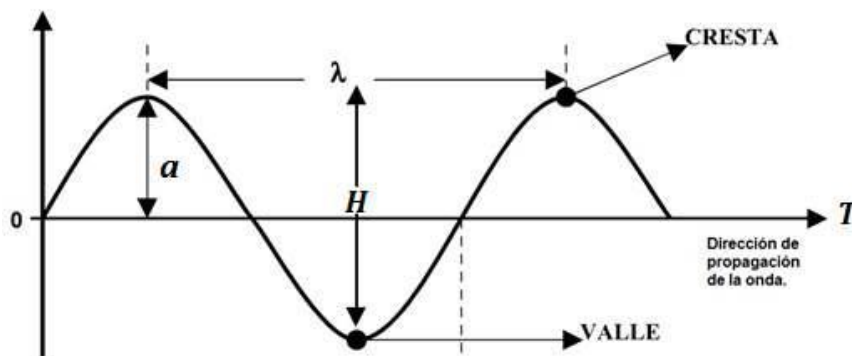
Cuando el viento sopla sobre de la superficie del océano, las moléculas de aire interactúan con las moléculas de agua modificando la superficie del océano y generando inicialmente ondas capilares (*ripples*). Estas ondas pueden crecer bajo la acción continua del viento, dejar el área de generación y propagarse libremente viajando miles de kilómetros con una pérdida de energía que depende de la pendiente del mismo oleaje y de otros factores marino-costeros (Ardhuin et al 2009).

Las olas se caracterizan por su longitud de onda ( $\lambda$ ) y por medio de sus parámetros integrales, altura significativa ( $H_s$ ), y el periodo asociado al pico espectral ( $T_p$ ) y dirección promedio ( $^\circ$ ) (Figura 1). La longitud de onda es la distancia entre dos crestas consecutivas, la altura es la diferencia de la distancia vertical entre una cresta y un valle, y el periodo es el tiempo en segundos que tarda un valle o una cresta de la ola en recorrer su longitud de onda. La frecuencia ( $f$ ) de la ola se define como el número de oscilaciones (cresta a cresta o valle a valle) de la superficie del mar por segundo y es el inverso del periodo (The Open University, 1989).

De acuerdo con la teoría lineal, el oleaje puede describirse a partir de la caracterización de una onda individual (senoidal pura). Pero en general el océano no se compone de ondas senoidales puras, sino una superposición de muchas de ellas, por lo tanto, un estado típico del mar se compone de una superposición de ondas, cada una con características propias (velocidad, periodo, altura de onda y dirección; The Open University, 1989). La potencia del oleaje es en otras palabras la velocidad a la cual se transmite la energía del oleaje a través de la superficie del océano en un intervalo de tiempo. Por ello se describe inicialmente la naturaleza de las olas.

**Figura 1**

Esquema del perfil de una onda senoidal pura, donde  $a$ =amplitud de la onda,  $\lambda$ =longitud de la onda,  $H$ =altura de la onda y  $T$ =periodo de la onda.

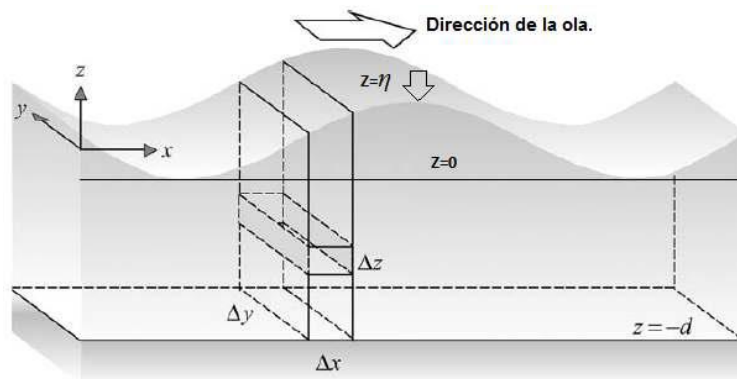


Nota: The Open University, 1989.

El oleaje no representa un flujo de masa sino un flujo de energía, desde su origen hasta su disipación en forma de rompiente. Esta energía es de dos tipos: cinética y potencial. La energía potencial se puede obtener utilizando oleaje regular (parámetros integrales) y oleaje irregular (espectro del oleaje). La presencia de una onda superficial implica que las partículas del fluido se muevan desde su posición original a alguna otra (Figura 2). Estos cambios de posición requieren un trabajo realizado en contra de la gravedad, y esto representa la energía potencial (Holthuijsen 2007).

**Figura 2**

Columna de agua en una onda armónica, que se utiliza para derivar las ecuaciones de energía de la ola.



Nota: Holthuijsen 2007.

Para calcular la energía potencial, se considera un volumen de agua de espesor  $\Delta z$  en una columna con un área superficial horizontal  $\Delta x \Delta y$ . La energía potencial instantánea de este volumen de agua, relativa a  $z=0$ , es entonces  $\rho g z \Delta x \Delta y \Delta z$ .

La energía potencial ( $E_p$ ) correspondiente a una onda inducida en toda la columna de agua, desde el fondo ( $-d$ ) hasta la superficie ( $\eta$ ), es igual a la energía en presencia de la onda, menos la energía en ausencia de esta ( $z=0$ ) por unidad horizontal de área superficial en un periodo de tiempo promedio:

$$E_p = \overline{\int_{-d}^{\eta} \rho g z dz} - \overline{\int_{-d}^0 \rho g z dz} = \overline{\int_0^{\eta} \rho g z dz}$$

Donde  $\rho$  es la densidad del agua,  $g$  la gravedad y la barra superior representa el promedio sobre un periodo de las olas. Para una onda armónica con amplitud ( $\alpha$ ), el resultado de la integral es:

$$E_p = \frac{1}{2} \overline{\rho g \eta^2}$$

La varianza de la elevación de la superficie del mar  $\eta(t)$  es, por definición, el promedio del cuadrado de las elevaciones de la superficie (respecto a su media)  $\eta^2$  (la barra superior indica el promedio en el tiempo). Para una onda armónica de amplitud  $\alpha$ , la varianza es  $\eta^2 = 1/2\alpha^2$ , por lo tanto:

$$E_p = \frac{1}{4} \rho g \alpha^2$$

Por otro lado, la energía cinética ( $E_k$ ) en la columna de agua, desde el fondo hasta la superficie, en el periodo promedio y por unidad de área superficial, está dada por:

$$E_k = \overline{\int_{-d}^{\eta} \frac{1}{2} \rho u^2 dz}$$

donde es  $u$  la velocidad de la onda. El resultado de esta integral para el caso de una onda armónica con amplitud ( $\alpha$ ) es:

$$E_k = \frac{1}{4} \rho g \alpha^2$$

De modo que, dentro de las aproximaciones de la teoría lineal tenemos que la energía potencial es igual a la energía cinética ( $E_p = E_k$ ), y la energía total ( $E_T$ ) inducida por una ola está definida por la suma de la energía potencial más la energía cinética ( $E_T = E_p + E_k$ ), es entonces la energía total (expresada en Jules/m<sup>2</sup>) inducida por una ola, por unidad de área horizontal en un tiempo promedio (Holthuijsen 2007):

$$E_T = \frac{1}{2} \rho g a^2$$

La ecuación anterior se puede expresar en términos de altura de ola (H), cambiando la amplitud por la altura al considerar que  $a = H/2$ , entonces obtenemos que:

$$E_T = \frac{1}{8} \rho g H^2$$

La transferencia de energía de las olas de un punto a otro punto en la dirección que viaja la ola es caracterizada por el flujo de energía o más comúnmente potencia de la ola (wave power) (McCormick 1981), definida por la siguiente ecuación:

$$P = (E_T) (C_g)$$

donde  $C_g$  es la velocidad de grupo del oleaje y está definida como:  $C_g = 1/2C$ , donde  $C$  es la celeridad de la ola, que se puede expresar como:  $C = (g \cdot T) / 2\pi$ . Rescribiendo la ecuación anterior tenemos que la potencia del oleaje es:

$$P = \left( \frac{1}{8} \rho g H^2 \right) \left( g \frac{T}{4\pi} \right)$$

En unidades de Watts (W). Realizando una simplificación de la ecuación anterior tenemos que:

$$P = \frac{\rho g^2 H^2 T}{32\pi} \left( \frac{W}{m} \right)$$

donde  $T$  es el periodo de la ola (segundos). Es decir, el potencial medio de energía de una ola individual idealizada, varia con el cuadrado de la altura de ola ( $H$ ) y con el periodo de esta ( $T$ ).

### **Comunidades bentónicas**

Las comunidades bentónicas son comunidades biológicas que viven en o sobre el lecho marino. Estas suelen contener taxa como algas, pastos marinos, manglares y corales, dependientes de la luz para obtener energía principalmente de la fotosíntesis, y/o animales como moluscos, esponjas y gusanos, que obtienen su energía consumiendo otros organismos o materia orgánica. Estos organismos habitan en sustratos que varían desde arena no consolidada hasta sustratos duros como piedra caliza o roca ígnea (Weiser, 1959).

Las comunidades y los hábitats bentónicos juegan un papel importante en el mantenimiento de la integridad de los ecosistemas marinos y los servicios ecológicos que brindan. Existe una fuerte evidencia de que la presencia de comunidades bentónicas puede ser importante para el mantenimiento de la biodiversidad a través de la provisión de hábitats estructuralmente complejos y diversos, la provisión de refugio y el suministro de alimento. Algunos de estos hábitats son importantes áreas de crianza para especies de fauna y forman la base de redes alimentarias marinas que sustentan pesquerías productivas y económicamente importantes, por lo que, la pérdida de comunidades y hábitats bénticos se considera como una de las mayores amenazas para la integridad ecológica y la biodiversidad en todo el mundo (Weiser, 1959).

### **Áreas coralinas y sus características:**

#### **Áreas coralinas**

Son zonas del fondo marino caracterizadas y moldeadas por la presencia de corales pétreos. Tal definición comprende los arrecifes de coral, los bancos coralinos de profundidad, los tapetes coralinos y las comunidades bentónicas con una presencia importante de corales. En estas áreas las formaciones coralinas son el rasgo dominante, pero también hay una serie de biotopos asociados, cada uno con características físicas, bióticas y funcionales, que constituyen unidades ecológicas del paisaje (Andrade y González, 1995; Mumby, Green, Edwards y Clark, 1997).

## Unidades ecológicas

Representan rasgos característicos del paisaje que los diferencian de otras unidades ecológicas. Cuando los rasgos bióticos son relevantes, las unidades ecológicas representan ensamblajes de especies o de otras categorías taxonómicas, grupos funcionales o formas de crecimiento que se caracterizan por su distribución en patrones espaciales. Cuando los rasgos bióticos no son observables o relevantes la unidad se identifica por sus rasgos abióticos que en las áreas coralinas describen tipos de sustratos.

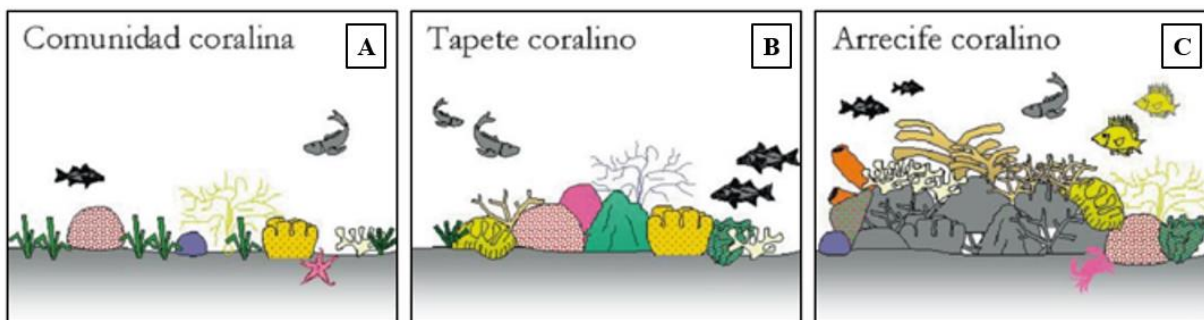
La presencia y distribución de las diferentes unidades ecológicas en las áreas coralinas responde a una serie de procesos geomorfológicos, hidrográficos y biológicos que operan a diferentes escalas de tiempo y espacio (e.g. tectonismo, cambios del nivel del mar, acreción, erosión, sedimentación, oleaje, simbiosis, entre otros) (Andrade y González, 1995; Mumby, Green, et al. 1997).

## Formaciones coralinas

Pueden clasificarse de acuerdo con su nivel de desarrollo en comunidades coralinas, tapetes y arrecifes coralinos (Figura 3), de menor a mayor desarrollo (Díaz et al., 2000):

**Figura 3**

*Diagramas de las formaciones coralinas: Comunidad coralina A), Tapete coralino B) y Arrecife coralino C).*



*Nota:* Díaz et al., 2000.

Las comunidades coralinas (Figura 3A) son mosaicos irregulares de colonias coralinas aisladas que sirven de hábitat para otros corales y organismos sésiles. Los tapetes coralinos (Figura 3B) son formaciones de corales pétreos creciendo agregados sobre fondos duros, generalmente rocosos, pero sin que se presente un desarrollo importante de una matriz calcárea o andamiaje arrecifal (Díaz et al., 2000). Finalmente, los arrecifes de coral (Figura 3C) son porciones del paisaje



marino moldeadas y dominadas por la presencia y los procesos geomorfológicos y ecológicos de las formaciones coralinas; constituyen uno de los escenarios más característicos de las costas tropicales. Estos comprenden una serie de biotopos y hábitats asociados, usualmente distribuidos en forma de mosaico, que se distinguen entre sí por la naturaleza física del sustrato (sedimentos, escombros coralinos, rocas), por componentes bióticos conspicuos que cubren el fondo (algas, fanerógamas, esponjas, abanicos de mar, etc.) y por poseer elementos característicos de fauna y flora (Prahl y Erhardt, 1985; Birkeland, 1997; Díaz et al., 2000).

### **Condiciones subóptimas**

En condiciones típicas los arrecifes de coral y las comunidades coralinas se desarrollan mejor en aguas con salinidades relativamente altas (33–36 psu), cálidas (16°–29° C), con muy bajos niveles de nutrientes, y con alta transparencia y abundante luz ya que las algas simbióticas (Zooxantelas) la requieren para la fotosíntesis (Díaz et al., 2000). Estas comunidades están generalmente ausentes de las zonas de influencia de las descargas de aguas dulces con alta carga de sedimentos (Díaz et al., 2000; The Coral Reef Alliance, 2003). Sin embargo, debido a los efectos del Cambio Climático las comunidades coralinas enfrentan un desafío significativo para adaptarse a condiciones subóptimas o extremas debido a factores como el agotamiento del oxígeno, el aumento de la temperatura superficial del mar y la acidificación de los océanos, entre otros (Wagner, Kramer y Van Woosik, 2010). Los arrecifes que se encuentra en aguas turbias (subóptimas) enfrentan factores de tensión que los arrecifes de aguas claras no sufren, como la disminución de la intensidad de la luz que impacta la fotosíntesis realizada por las zooxantelas. Sin embargo, los estudios de campo han demostrado que estos arrecifes costeros turbios presentan menor mortalidad de corales que los arrecifes de aguas claras cuando se exponen a temperaturas elevadas similares (Wagner, et al 2010). Esta resistencia al estrés térmico se explicaría principalmente por la baja luminosidad del ambiente turbio, que limita el estrés de irradiación solar en los corales, y su blanqueamiento, aunque no se puede descartar un efecto de selección natural (Burt, et al. 2020). Por lo tanto, la turbidez puede percibirse tanto como una amenaza o como un factor de supervivencia durante los eventos de altas temperaturas. Sin embargo, la turbidez natural a menudo se ve agravada por la escorrentía de sedimentos acompañada de contaminantes químicos (pesticidas, insecticidas, desechos, aguas residuales) y/o biológicos (aguas servidas) (Burt, et al. 2020).

## Formación y tipos de arrecifes

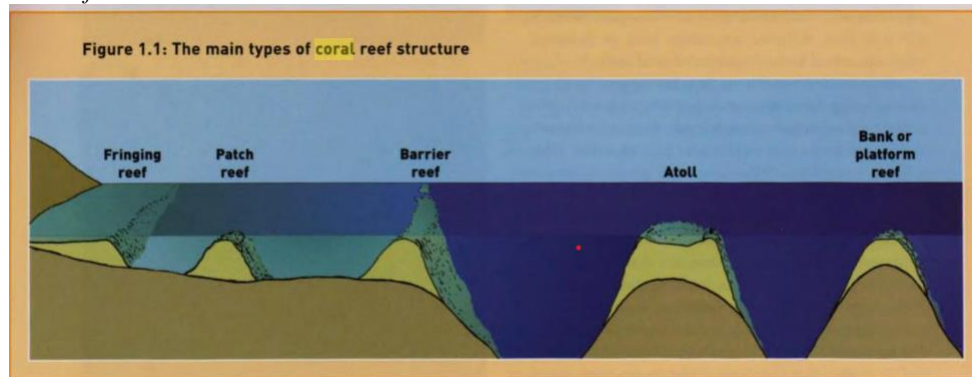
El desarrollo de un arrecife coralino es un proceso que tarda de cientos a miles de años, y que involucra complejos procesos ecológicos, físicos y geológicos. Estas formaciones calcáreas son construidas por un balance entre las actividades de tres grupos funcionales de organismos. En primer lugar, los organismos hermatípicos (formadores de arrecifes) capaces de fabricar esqueletos duros y formar grandes colonias o agregados. Estos organismos pueden ser algas rojas (orden Corallinales), celenterados (orden Scleractinia), moluscos (familia Vermetidae), anélidos (familias Serpulidae y Sabellariidae) y crustáceos (algunos géneros clase Cirripedia). En segundo lugar, están los bioerodadores, organismos que fragmentan y erosionan los esqueletos de carbonato de calcio depositados por los primeros y son ellos esponjas (familia Clionidae), bivalvos (género *Lithophaga*), cirripedios (género *Lithotrya*), sipuncúlidos (género *Aspidosiphon*), poliquetos (familia Eunicidae), actinopterigios (género *Arothron* y familia Scaridae), moluscos (géneros *Acmaea* y *Acanthopleura*) y equinodermos (género *Diadema*). En tercer lugar, están los organismos estabilizantes (Esponjas y algas de numerosos grupos) que consolidan los fragmentos y sedimentos calcáreos y eventualmente darán paso a su cementación diagenética (inorgánica) u orgánica (bacterias y algas) como roca coralina (Prahl y Erhardt, 1985; Díaz et al., 2000).

La actividad de los organismos hermatípicos da origen a parches coralinos, o “núcleos de condensación”, cuyo crecimiento (acreción) hacia arriba y hacia los lados hace que éstos núcleos se fusionen entre sí, se compacten, se levanten hacia la superficie y den origen a una formación dura, rugosa y estructuralmente compleja denominada arrecife, cuya estructura final dependerá de la geología, la geomorfología y las condiciones oceanográficas (corrientes, oleaje, temperatura, transparencia) (Birkeland, 1997; Díaz et al., 2000).

De acuerdo con su forma, origen y localización con respecto a la costa, los arrecifes suelen clasificarse en cuatro grandes tipos: arrecifes franjeantes, de barrera, atolones y de plataforma (Schuhmacher, 1982). Los arrecifes franjeantes se desarrollan directamente a lo largo del borde de la costa, y alcanzan un ancho de hasta 1 kilómetro (km); el frente del arrecife tiende a crecer hacia afuera de la costa; los arrecifes más desarrollados de este tipo pueden estar separados decenas de metros de la línea de costa por una laguna de poca profundidad. Los arrecifes de barrera suelen desarrollarse en sentido paralelo a la línea de costa y están separados de ésta por una laguna amplia de hasta 20 km de ancho. Los atolones son arrecifes de forma aproximadamente circular que se levantan desde aguas oceánicas profundas hasta la superficie y encierran una laguna relativamente

profunda. El desarrollo de los atolones está por lo general asociado a una isla volcánica que se ha hundido paulatinamente. Finalmente, los arrecifes de plataforma se desarrollan como domos o bancos ovalados que se levantan aisladamente sobre la plataforma continental (Figura 4).

**Figura 4**  
*Tipos de arrecifes.*



*Nota:* Spalding, Ravilious y Green, 2001.

### **Influencia del arrecife de coral en el medio circundante**

Estas estructuras modifican sustancialmente la topografía del lecho marino y su dimensión influyendo en las propiedades físicas, y ecológicas, del medio circundante (Schuhmacher, 1982). Debido a su batimetría complicada, pendientes abruptas, la competencia que ejercen los distintos agentes dinámicos y la rugosidad del coral, los arrecifes de coral crean un ambiente físico muy diferente del que se puede experimentar en cualquier otro medio oceánico. A pesar de esto, la hidrodinámica en estos sistemas se rige por los mismos mecanismos que fuerzan la circulación en otras cuencas someras: viento (Frith y Mason, 1986), marea (Atkinson et al., 1981; Wolanski, 2001) y los gradientes de densidad (Hoitink, 2003). Además, la circulación tiene una contribución adicional debida al oleaje que rompe en la barrera, y que en muchas lagunas arrecifales puede llegar a ser el agente forzante principal en la generación de corrientes (Symonds et al., 1995; Hearn, 1999; Massel, 1999).

En términos ecológicos, el flujo generado por el oleaje sobre la barrera y hacia el interior de la laguna arrecifal es también un factor crítico en la distribución de comunidades coralinas ya que este flujo controla las condiciones de luminosidad, produce gradientes de temperatura, de concentración de nutrientes y oxígeno entre las diferentes zonas del arrecife, e influye en el nivel de turbulencia. Dando como resultado una gran variedad de microambientes, permitiendo así la

existencia de diversas asociaciones de organismos (Díaz et al., 2000). A demás, se sabe que los organismos que componen los arrecifes coralinos forman las superficies más ásperas del océano costero, por lo que las tasas de disipación de energía de las olas por fricción pueden ser un orden de magnitud mayor sobre los arrecifes (Smith, 1993) que sobre un fondo arenoso (Lowe et al., 2005). Por lo tanto, la energía de las olas que llega a las playas es mucho menos que la de los arrecifes (Frihy et al., 2004).

A medida que el oleaje se propaga por la zona menos profunda del arrecife, la atenuación por la ruptura de la ola puede disipar entre el 50% y el 95% de su energía (Lugo-Fernández et al., 1998, Kench y Brander, 2006). La transformación y la disipación de energía de las olas está controlada por la morfología de la estructura del arrecife (elevación, pendiente del arrecife y anchura plana del arrecife), la profundidad relativa del agua en el borde del arrecife (Gourlay, 1994, Kench y Brander, 2006) y las características de las ondas incidentes (Lowe et al., 2005).

Como se ha mencionado anteriormente, la rugosidad de las formaciones coralinas y las fricciones generadas son parámetros que se han venido investigando (Franklin et al., 2013; Rogers et al., 2016). Estos parámetros se han medido a través de los años por el método de cadena y flexómetro y por medio del censo visual directo de la superficie del arrecife a través del buceo. Sin embargo, estos métodos son apropiados para áreas de arrecifes pequeños y no para grandes áreas, por lo que, se han implementado técnicas más sofisticadas como ecosondas multi-haz para la recopilación de datos más precisos en las áreas coralinas. Adicionalmente, es posible complementarlo con las imágenes satelitales, fotogrametría con drones y modelos numéricos (Burns et al., 2015; Cheriton et al., 2016).

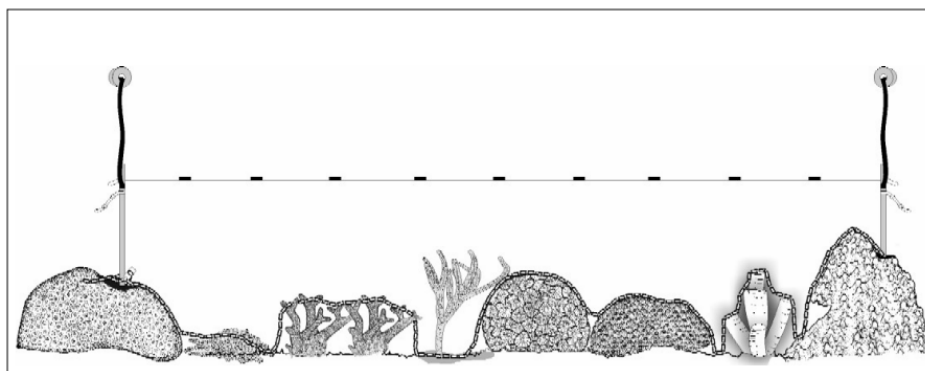
### **Metodologías de monitoreo en arrecifes de coral**

La mayoría de las metodologías para el monitoreo en arrecifes de coral son similares, sin embargo, existen algunos programas de monitoreo que varían en los protocolos implementados de acuerdo al contexto ambiental y de la escala del área a monitorear (Navas et al., 2012), por ejemplo: a escala global, los programas Global Coral Reef Monitoring Network (GCRMN) y Reef Check implementan los transectos lineales para monitorear el bentos; y a escala regional, Caribbean Coastal Marine Productivity Program, Mesoamerican Barrier Reef System y Reef Condition Monitoring Program (RECON) implementan los protocolos de transectos lineales y con puntos de intercepto para monitorear el bentos.

**Los transectos lineales** corresponden a la extensión de 10 metros (m) de un flexómetro o cadena anclada en sus extremos a dos estacas de acero inoxidable preferiblemente. Estas se enterrarán sobre sustrato inerte (roca) o en segmentos muertos de colonias coralinas (Figura 5). Es importante que los transectos no se traslapen o queden establecidos a menos de tres metros de distancia unos de otros a lo largo de su extensión. Antes de iniciar con censo visual sobre los transectos, se realizará un esquema donde se indiquen características particulares de la zona de muestreo que permitan la reubicación de las estacas en muestreos posteriores, además, se registrará su extensión, su número y la profundidad de las estacas. Finalmente se coloca una línea indicando la dirección en que se realizó censo. Cada censo deberá realizarse en la misma dirección siempre, garantizando así la replicabilidad.

**Figura 5**

*Esquema de transecto lineal para el monitoreo de ecosistemas de arrecifes coralinos.*



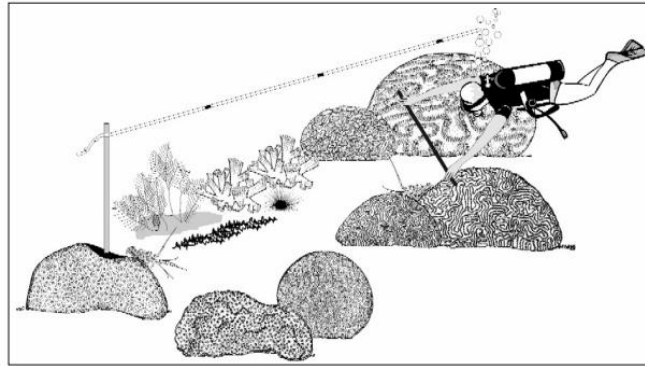
*Nota:* Garzón-Ferreira et al., 2002.

Una vez iniciado el censo visual para el registro de los componentes de fondo, el investigador debe desplazarse lentamente sin tocar el cabo, ubicándose justamente encima del mismo, lo más perpendicular respecto al fondo, evitando así errores de lectura. Se determinará la categoría y/o la especie de organismo a lo largo del transecto o debajo de los puntos distribuidos cada diez centímetros (cm) a lo largo del transecto. Las colonias de coral se deberán identificar a nivel de especie, con los grupos restantes la identificación a este nivel es opcional y se puede trabajar a nivel de grupo o forma de crecimiento (CARICOMP, 2001; Garzón-Ferreira et al., 2002).

También se pueden realizar transectos de banda de 10 x 2 m teniendo como eje central el flexómetro o la cadena que forman el transecto. El censo visual consiste en ubicar un tubo de PVC a partir del eje central para obtener la amplitud de 1 m de longitud del sustrato que será revisado detalladamente y luego continuar con el otro costado del eje central (Figura 6).

**Figura 6**

*Método del transecto de banda 10x2m.*



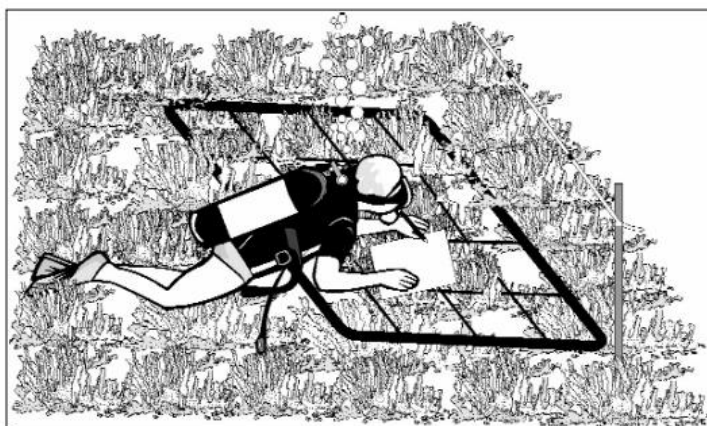
*Nota:* Garzón-Ferreira et al., 2002.

Durante los censos visuales en ambos costados, se registrarán el número de individuos de los organismos y categorías. Sin embargo, existen otros métodos como lo son los cuadrantes, foto transectos y videos transectos (Rogers et al., 1994; Hill y Wilkinson, 2004).

Los cuadrantes visuales: se implementan teniendo como eje central un transecto de banda de 10x2 m. Este método se aplica en zonas donde el crecimiento tipo ramificado y denso de las especies dificulta la diferenciación de colonias, por lo que se utiliza cuadrantes de 1 m<sup>2</sup> dividido en 16 sub-cuadrantes de 25x25 cm (Figura 7), los cuales se ubicaran en ambos costados reemplazando la colonia como unidad de muestreo (Garzón-Ferreira et al., 2002).

**Figura 7**

*Método de cuadrantes en arrecifes coralinos.*

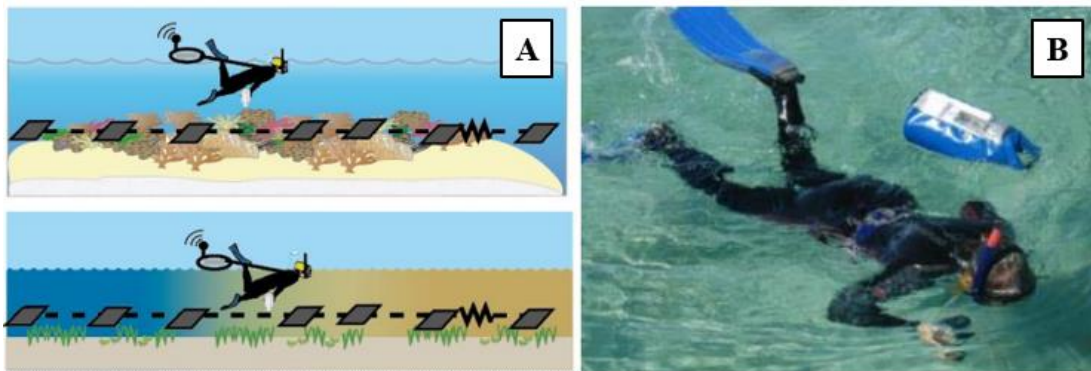


*Nota:* Garzón-Ferreira et al., 2002.

El método de foto cuadrantes y videos (Figura 8) proveen información más detallada y precisa, pero requieren programas específicos para el análisis de imágenes y procesamiento de la información colectada (Rogers et al., 1994; Hill y Wilkinson, 2004; Roelfsema y Phinn, 2009).

**Figura 8**

*Diagrama de foto transectos georreferenciados para monitorear hábitats bentónicos de arrecifes de coral y pastos marinos A) y Buzo remolcando el sistema GPS-flotador B).*



*Nota:* Roelfsema y Phinn, 2009.

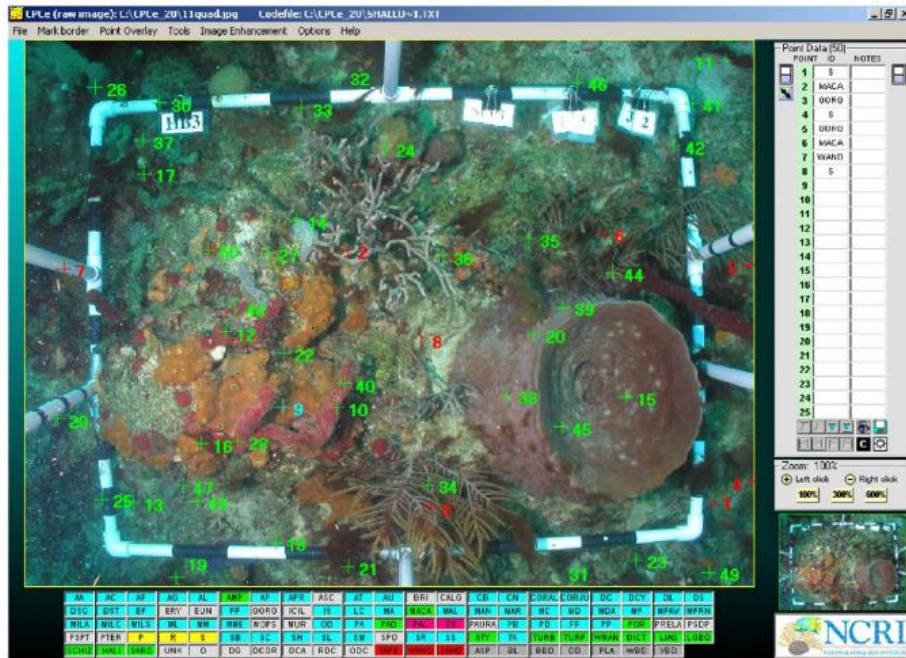
Una de las opciones que se emplea consiste en que un buzo con una cámara vaya tomando fotos o videos del hábitat bentónico a lo largo del transecto y tiempo establecido (toma de foto cada 3 patadas o intervalo de 2 m). A medida que el buzo avanza en el transecto, va remolcando un GPS adaptado a una bolsa de aire o flotador que va registrando continuamente las coordenadas (Figura 6B). Una vez realizados los transectos, el trabajo en oficina consiste descargar las fotos y vincularlas con las coordenadas del GPS para lo que se puede utilizar software como Shelve, Open Coral AI (Reef Support, 2022), Agisoft MetaShape™ (Agisoft LLC. 2020), entre otros. Este software permite sincronizar la hora de la cámara y el GPS para determinar su posición en el espacio y poder visualizarla. Finalmente, utilizando el software Coral Point Count excel (Kohler et al., 2006), es posible evaluar cuantitativa o cualitativamente el bento determinando: el porcentaje de cobertura, composición de especies e indicadores de salud (Roelfsema y Phinn, 2009).

**Software CPCe:** Este software es una herramienta diseñada por el National Coral Reef Institute's (NCRI) de Nova Southeastern University Oceanographic Center, que permite el monitoreo y la evaluación de manera rápida y eficiente de la cobertura de arrecifes de coral en un área específica, utilizando un número específico de puntos aleatorios que se superponen en la fotografía permitiendo identificar por medio de categorías (códigos) visualmente la especie de

fauna/flora o el tipo de sustrato que se encuentra debajo de cada punto (Figura 9) (Kohler y Gill, 2006).

**Figura 9**

*Captura de pantalla de la imagen con puntos aleatorios superpuestos. Las categorías (códigos) para identificar se muestran debajo de la imagen.*



*Nota:* Kohler y Gill, 2006.

Los puntos de datos se guardan en un archivo de datos. cpc. Este archivo contiene el nombre de la imagen, el nombre del archivo que contiene las categorías (códigos) identificadas, el número y coordenadas de los puntos superpuestos y los datos del código asignado a cada punto. Este archivo se guarda y se puede volver a él para su análisis o modificación. Una vez procesadas las imágenes, se guardan los datos automáticamente en hojas de cálculo de Excel en las cuales se especifican las diferentes categorías de cada especie/tipo de sustrato con sus respectivos parámetros estadísticos (media, desviación y error estándar) y el cálculo del índice de diversidad de Shannon-Weaver. para cada especie (Figura 10) (Kohler y Gill, 2006).



**Figura 10**

Ejemplo de hoja de cálculo de Excel generada por CPCe que muestra un resumen las categorías con los datos del análisis estadístico.

|    | A  | B         | C         | D         | E         | F | G           | H                | I                 | J |
|----|--|-----------|-----------|-----------|-----------|---|-------------|------------------|-------------------|---|
| 5  |  |           |           |           |           |   |             |                  |                   |   |
| 6  | <b>TRANSECT NAME</b>                         | transect1 | transect2 | transect3 | transect4 |   |             |                  |                   |   |
| 7  | <b>Number of frames</b>                      | 1         | 1         | 1         | 1         |   |             |                  |                   |   |
| 8  | <b>Total points</b>                          | 25        | 25        | 25        | 25        |   |             |                  |                   |   |
| 9  | <b>Total points (minus tape-wand+shadow)</b> | 25        | 25        | 25        | 25        |   |             |                  |                   |   |
| 10 | <b>MAJOR CATEGORY (% of transect)</b>        |           |           |           |           |   | <b>MEAN</b> | <b>STD. DEV.</b> | <b>STD. ERROR</b> |   |
| 11 | CORAL  | 48.00     | 24.00     | 16.00     | 48.00     |   | 34.00       | 16.49            | 8.25              |   |
| 12 | SORGONIANS                                   | 8.00      | 20.00     | 40.00     | 8.00      |   | 19.00       | 15.10            | 7.55              |   |
| 13 | SPONGES                                      | 0.00      | 4.00      | 0.00      | 0.00      |   | 1.00        | 2.00             | 1.00              |   |
| 14 | ZOANTHIDS                                    | 8.00      | 20.00     | 0.00      | 0.00      |   | 7.00        | 9.45             | 4.73              |   |
| 15 | MACROALGAE                                   | 24.00     | 28.00     | 20.00     | 28.00     |   | 25.00       | 3.83             | 1.91              |   |
| 16 | OTHER LIVE                                   | 0.00      | 0.00      | 0.00      | 0.00      |   | 0.00        | 0.00             | 0.00              |   |
| 17 | DEAD CORAL WITH ALGAE                        | 0.00      | 4.00      | 20.00     | 8.00      |   | 8.00        | 8.64             | 4.32              |   |
| 18 | CORALLINE ALGAE                              | 0.00      | 0.00      | 0.00      | 0.00      |   | 0.00        | 0.00             | 0.00              |   |
| 19 | DISEASED CORALS                              | 0.00      | 0.00      | 4.00      | 4.00      |   | 2.00        | 2.31             | 1.15              |   |
| 20 | SAND, PAVEMENT, RUBBLE                       | 12.00     | 0.00      | 0.00      | 4.00      |   | 4.00        | 5.66             | 2.83              |   |
| 21 | UNKNOWN                                      | 0.00      | 0.00      | 0.00      | 0.00      |   | 0.00        | 0.00             | 0.00              |   |
| 22 | TAPE, WAND, SHADOW                           | 0.00      | 0.00      | 0.00      | 0.00      |   | 0.00        | 0.00             | 0.00              |   |
| 23 | Sum (excluding tape+shadow+wand)             | 100.00    | 100.00    | 100.00    | 100.00    |   |             |                  |                   |   |
| 24 |  |           |           |           |           |   |             |                  |                   |   |
| 25 | <b>SUBCATEGORIES (% of transect)</b>         |           |           |           |           |   | <b>MEAN</b> | <b>STD. DEV.</b> | <b>STD. ERROR</b> |   |
| 26 | <b>CORAL</b>                                 |           |           |           |           |   |             |                  |                   |   |
| 27 | Acropora cervicornis                         | 0.00      | 0.00      | 0.00      | 0.00      |   | 0.00        | 0.00             | 0.00              |   |
| 28 | Acropora palmata                             | 0.00      | 0.00      | 0.00      | 0.00      |   | 0.00        | 0.00             | 0.00              |   |
| 29 | Acropora prolifera                           | 0.00      | 0.00      | 0.00      | 0.00      |   | 0.00        | 0.00             | 0.00              |   |
| 30 | Agaricia agaricites                          | 0.00      | 0.00      | 0.00      | 0.00      |   | 0.00        | 0.00             | 0.00              |   |
| 31 | Agaricia fragilis                            | 4.00      | 0.00      | 0.00      | 0.00      |   | 1.00        | 2.00             | 1.00              |   |
| 32 | Agaricia grahamae                            | 0.00      | 0.00      | 0.00      | 0.00      |   | 0.00        | 0.00             | 0.00              |   |
| 33 | Agaricia tenuifolia                          | 0.00      | 0.00      | 0.00      | 0.00      |   | 0.00        | 0.00             | 0.00              |   |
| 34 | Agaricia undata                              | 0.00      | 0.00      | 0.00      | 0.00      |   | 0.00        | 0.00             | 0.00              |   |
| 35 | Agaricia lamarckii                           | 0.00      | 0.00      | 0.00      | 0.00      |   | 0.00        | 0.00             | 0.00              |   |
| 36 | Colpophyllia breviserialis                   | 0.00      | 0.00      | 0.00      | 0.00      |   | 0.00        | 0.00             | 0.00              |   |
| 37 | Colpophyllia natans                          | 0.00      | 0.00      | 0.00      | 4.00      |   | 1.00        | 2.00             | 1.00              |   |

Nota: Kohler y Gill, 2006.

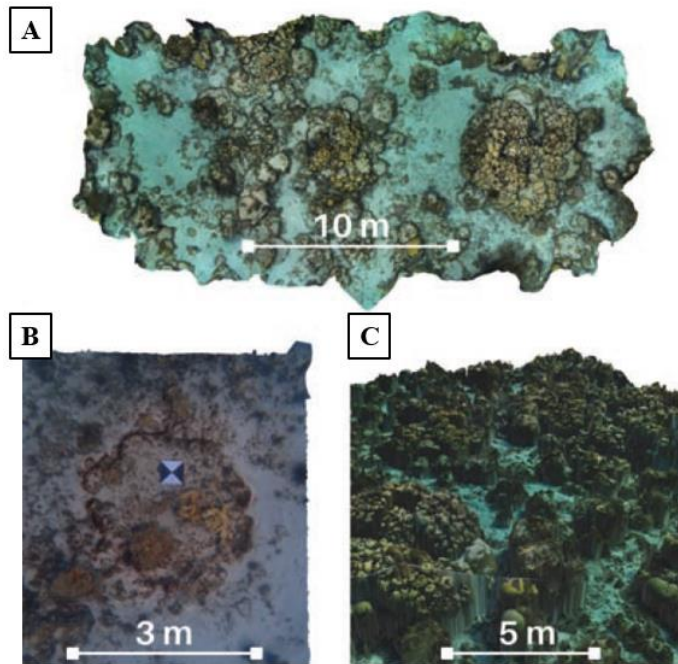
Es importante entender que las estimaciones de coberturas y riquezas de especies bentónicas pueden diferir dependiendo del método de muestreo implementado. No todas las zonas de estudios son iguales y presentan condiciones especiales que deben tenerse en cuenta a la hora de elegir el método, por ejemplo, en los arrecifes con colonias ramificadas se requiere mayor cuidado con los métodos de cadenas y cuadrantes con cuadrículas para no causar daños en el arrecife, además los buzos encargados del monitoreo deben conocer las especies o las diferentes categorías para una correcta identificación. El método de fotocadrante requiere que el buzo tenga experiencia con el manejo de la cámara y pueda capturar bien las fotografías y finalmente los cuadrantes es un método mucho más sencillo, pero también requiere experiencia en conocer e identificar bien las especies (Palacio y Zapata, 2023).

Es por esto por lo que, aprovechando los avances tecnológicos, se han desarrollado nuevas metodologías que permitan proveer la mayor cantidad de información sobre el estado y condición de los arrecifes y así poder orientar las acciones de conservación y restauración (Obura et al., 2019; Vardi et al., 2021). Entre las cuales se encuentra la fotogrametría (Figura 11), esta técnica permite el estudio y la definición de la forma más precisa de las dimensiones o la posición en el espacio de un objeto por medio de datos obtenidos de una o más fotografías, en el caso de los arrecifes

coralinos permite evaluar la estructura, la rugosidad, el crecimiento y los procesos de restauración a largo plazo (Budi et al., 2020; Gordon et al., 2023).

**Figura 11**

*Representaciones digitales de arrecifes coralinos obtenidos a partir de fotomosaicos generados a partir de fotos capturadas con cámaras GoPro Hero 4. Fotomosaico rectangular de 20m x 10m en la isla de Providencia A), Fotomosaico cuadrado de 5m x 5m de una parcela en restauración en el Parque Nacional Natural Old Providence McBean Lagoon B) y Fotomosaico tridimensional de 10 m x 10 m 100 de una porción de arrecife en Mantas Place en Providencia C).*



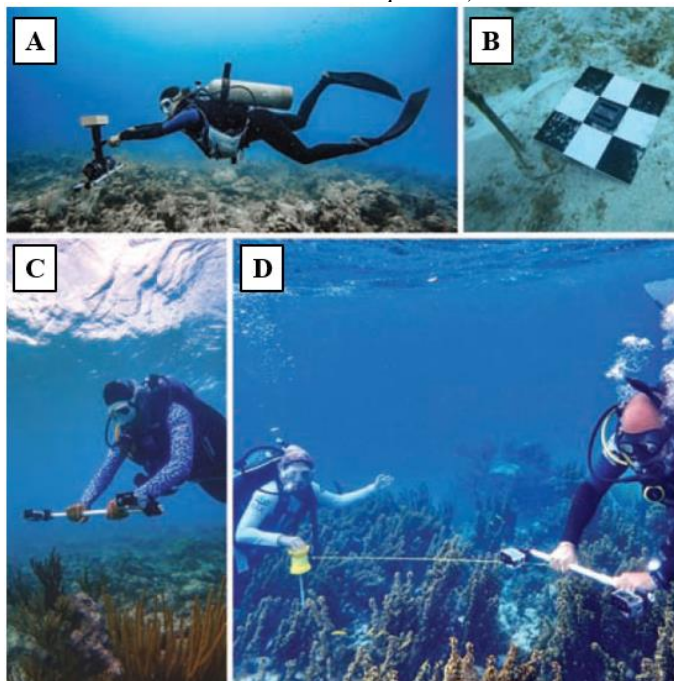
*Nota:* Gnecco et al., 2019 en Montoya, 2023.

La técnica consiste inicialmente en establecer en la zona de estudio puntos de control que proporcionen una referencia constante y conocida para escalar el fotomosaico al final, se deben tomar las coordenadas con GPS y la profundidad, luego se hace el barrido de imágenes con cámaras submarinas de alta resolución a dos metros por encima del arrecife si las condiciones del agua lo permiten, este debe ser continuo, manteniendo la misma distancia al fondo en todo momento (Raoult et al, 2016; Rossi et al., 2019; Budi et al., 2020). El buzo debe mantener la estructura soporte de las cámaras al frente y lejos de su cuerpo como las condiciones lo permitan (Figura 12). Esto eliminará la sombra del buzo de las imágenes capturadas y dará como resultado imágenes más claras y un fotomosaico más preciso. Adicionalmente, se puede complementarse con barridos adicionales desde otras para garantizar que los lados o paredes del objeto sean generados

correctamente durante el procesamiento del fotomosaico en el software respectivo. En caso de duda, el buzo debe hacer pasos adicionales. Aunque más imágenes significan un mayor tiempo de procesamiento, el resultado siempre será una imagen completa. Siempre se debe garantizar una superposición de al menos el 50% entre imágenes. Luego las fotografías son procesadas para construir los mosaicos usando el software respectivo (Agisoft MetaShape™) o programas en línea como Ecological Intelligence for Reef Restoration (EcoRRAP) y finalmente se realizan los análisis respectivos (Raoult et al., 2016; Rossi et al., 2019; Budi et al., 2020; Montoya, 2023; Gordon et al., 2023).

**Figura 12**

*Levantamiento de fotomosaicos para el monitoreo de arrecifes. Un buzo se encarga de la toma de fotos realizando un barrido sobre el arrecife A), Otro buzo se encarga de delimitar y referenciar los puntos de control del terreno B), El montaje para las cámaras puede ser sencillo como un simple tubo de PCV C) y Pareja de buzos realizando un barrido en circular o en espiral D).*



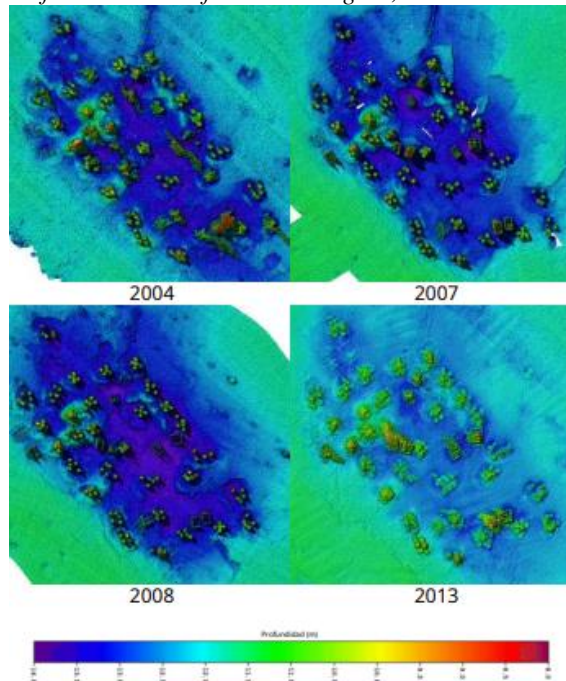
*Nota:* Gnecco et al., 2019 en Montoya, 2023.

Otra metodología que se ha implementado para el monitoreo sistemático de arrecifes coralinos es el uso de ecosondas multihaz dado que esta técnica no está influenciada por las condiciones del agua (principalmente la visibilidad) y la experiencia/habilidades de los buzos en inmersiones visuales e inspecciones con ROV (vehículo de operación remota). Esta técnica permite conocer a detalle la batimetría del fondo marino y las estructuras que componen el arrecife

(Figura 13) por medio de características específicas como resolución espacial, trayectoria y velocidad del sondeo, número de sondeos, pulsos acústicos (frecuencia y ángulo) (Tasseti et al., 2015).

**Figura 13**

*Mapas batimétricos del arrecife coralino artificial en Senigalli, Italia durante cuatro años seguidos.*



*Nota:* Tasseti et al., 2015.

**Cartografía**

La cartografía temática de hábitats marinos, que involucra inferencias acerca de la estructura de los biotopos y su dinámica, tiene múltiples aplicaciones como primer paso hacia la comprensión de estructuras y procesos ecológicos. Es fundamental para los estudios de línea base dirigidos a los planes de conservación y manejo integrado de áreas marinas, encaminados a proyectos de desarrollo. Por esta razón, la cartografía temática se considera una herramienta básica que permite una visión sinóptica de la distribución espacial del mosaico formado por los elementos del paisaje costero, incluyendo los hábitats marinos (Clark, 1996; Cendales, et al. 2002).

Gran parte de la cartografía de hábitats marinos en aguas someras, como arrecifes de coral o praderas de fanerógamas marinas, ha sido obtenida por teledetección óptica a pesar de las limitaciones impuestas por la naturaleza física de las interacciones entre la luz y la columna de agua (Green et al., 1996). La delimitación cartográfica de ecosistemas marinos es difícil a partir de simples datos de campo, especialmente por su condición submareal, por lo que la teledetección es

actualmente una de las fuentes primarias de información para realizar análisis y monitoreo de la extensión de praderas. El uso de imágenes de satélite permite a los científicos disponer de información repetida en el tiempo, y cubrir extensiones de fondos mucho mayores que los alcanzadas a través de trabajos de campo extensos (Matthew y Goodman, 2015).

### **Teledetección**

La teledetección satelital en ecosistemas marinos se vale de información proveniente de: a) la respuesta de los fondos sumergidos sobre el ámbito visible del espectro electromagnético (Yang & Yang, 2009), donde la interpretación es facilitada por la transparencia de la columna de agua y, por tanto, obstaculizada por la presencia de sedimentos suspendidos, y b) el conocimiento previo general de los perfiles de profundidad de la zona a trabajar, ya que de esto también depende la definición precisa de la cobertura de los fondos.

Las aguas costeras turbias ocasionan que la luz incidente en la columna de agua sea absorbida por el fitoplancton, o que sea dispersada por las partículas suspendidas (materia orgánica e inorgánica), restringiendo el paso de la luz hacia el bento y, por tanto, la cantidad reflejada por éste (Dekker et al., 1992). Adicionalmente, la detección de ecosistemas marinos con sensores satelitales se dificulta con la profundidad, debido a la confusión con otras coberturas del fondo. Los fondos con coberturas coralinas o macroalgales suelen confundirse con pastos marinos, por su asociación con organismos fotosintetizadores o con contenidos de clorofila, que generan una respuesta espectral similar a la de los pastos marinos, dificultando el proceso de interpretación (Björk et al., 2008; Matthew y Goodman, 2015). Tal situación obliga a acudir a procesamientos y análisis complejos (Lubin et al., 2001), a valerse de información secundaria de apoyo para relacionar la interpretación (batimetría, mapas de cobertura, tipos de sedimento, geomorfología), y a verificación en campo con levantamiento de puntos de observación (Duarte y Kirkman, 2001).

### **Otros sensores**

Para describir la hidrodinámica en los arrecifes de corales, normalmente se utilizan instrumentos como perfiladores de corriente acústicos, boyas de oleaje, sensores de presión y temperatura, y estaciones meteorológicas, que permiten una descripción meteo-marina en los ecosistemas marinos, logrando capturar procesos que abarcan un rango muy amplio de escalas temporales y espaciales (Coronado, 2005; Fernández-Salas et al., 2012; Maldonado-Sánchez et al.,

2019; Fajardo y Lonin, 2021). De esta manera se pueden proponer modelos conceptuales que expliquen los patrones de circulación observados, para así generalizarlos a la zona de estudio. Estos resultados permiten establecer las conexiones que existen entre los procesos físicos de pequeña-mediana escala, y los procesos ecológicos, así como entender las condiciones de la circulación en la zona (Coronado, 2005; Fernández-Salas et al., 2012; Osorio-Cano et al., 2013; Maldonado-Sánchez et al., 2019; Zea y Gómez-Lor, 2020; Fajardo y Lonin, 2021).

### **Batimetrías**

Es una técnica implementada en la investigación científica marina para realizar el levantamiento del relieve del fondo marino. Esta técnica consiste en la utilización de ecosonda monohaz o multihaz. Las señales son enviadas en forma de pulsos hacia el fondo marino que posteriormente son rebotadas y recibidas por otros sensores con aplicaciones informáticas y sistemas de posicionamiento GPS. Con esta información es posible obtener un modelo digital detallado del fondo marino y de esta manera, dependiente del detalle de la batimetría, se pueden describir los fondos y el relieve y todas aquellas anomalías que en ellos puedan existir (Lee et al., 2010; Naviosdeaviso, 2018; IDEAM, 2023).

### **Modelos numéricos**

Un modelo consiste en una aproximación a un fenómeno natural mediante la representación de la física por medio de conceptos o de elementos matemáticos. En el caso del modelo matemáticos, se implementan algoritmos lógicos y numéricos de acuerdo con la física que se quiere estudiar. Los algoritmos numéricos permiten usar la potencia de cálculo de los ordenadores, verificar y además contrastar el fenómeno estudiado con datos medidos (Domínguez, 2009).

En el caso del océano, el comportamiento físico está asociado a la dinámica de fluidos y otros procesos como la interacción océano-atmosfera. Las ecuaciones utilizadas por los modelos se expresan como ecuaciones diferenciales parciales, las cuales describen la evolución espacial y temporal de las distintas variables. Si bien es posible encontrar soluciones analíticas para algunos fenómenos, en general se utilizan las soluciones numéricas. En este caso un método bastante usado es el de las diferencias finitas, según el cual las derivadas se representan mediante diferencias entre valores correspondientes a puntos discretos tanto en el tiempo y el espacio. La forma óptima como

se toman estas diferencias dependerá del problema específico en cuestión y de la precisión que se busca (Warner et al., 2008; Moreno Navas et al., 2011).

Es importante notar que el número de cálculos será mayor mientras más pequeños sea la resolución espacial ( $\Delta x$ ) y/o temporal ( $\Delta t$ ), debido a que habrá más puntos por resolver y en más instantes en el tiempo. Por esto, la resolución está sujeta a los recursos computacionales de que se disponen y típicamente se usa la máxima resolución que permita obtener los resultados en un plazo aceptable (Papanicolaou et al., 2008).

Como se mencionó, la capacidad computacional impone un límite sobre la resolución espacial que se quiere modelar. Los modelos globales del océano emplean típicamente un  $\Delta x$  de cientos de kilómetros. Sin embargo, existen procesos físicos que tienen escalas espaciales más pequeñas (como la turbulencia) que, sin embargo, tienen un efecto sobre la circulación a escala grande. Estos procesos se pueden representar solo en modelos de baja resolución. La manera como se resuelve este asunto en las mayores escalas es de forma aproximada y por medio de "parametrizaciones" (McWilliams, 1996; Capet et al., 2008; Griffies et al., 2009).

En el caso del oleaje, la caracterización puede ser obtenida a través de mediciones hechas por correntómetros, sensores de presión, boyas, satélites, entre otros. Sin embargo, por el costo operativo y la falta de continuidad en las series de tiempo, las mediciones, no permiten una caracterización adecuada del oleaje, por lo que el uso de un modelo numérico es una opción muy utilizada (Daniel et al., 2015; Posada, 2019; Lonin et al., 2022) y siempre es necesario incorporar las mediciones *in situ* en estos modelos para que la representación sea lo más parecido a lo que realmente sucede en la zona de estudio.

En la actualidad son diversos los modelos numéricos del tipo denominado tercera generación, utilizados para simular las condiciones de oleaje, entre los que se encuentran WaveWatchIII (WAVEWATCH III Development Group, 2019), WAM (Komen, et al 1994), y Delf3D (Deltares, 2023).

Es de notar que Delft3D cuenta con una serie de módulos asociados a la hidrodinámica, propagación de oleaje, calidad del agua, ecología y transporte de sedimentos (Deltares, 2023). El módulo asociado al oleaje es el módulo Delft3D-WAVE y tiene acoplado el modelo SWAN de tercera generación, el cual tiene múltiples aplicaciones en manejo y desarrollo costero y también puede ser usado como un modelo *forecast/hindcast* de oleaje. Este modelo se puede utilizar en diferentes áreas tales como estuarios, lagos, canales, regiones costeras, entre otras. A nivel físico

el SWAN tiene incorporado aspectos como la generación, difracción y reflexión del oleaje, disipación por rotura inducida por la profundidad, *whitecapping* (disipación de la energía del oleaje en aguas profundas) y la fricción de fondo. Por otra parte, el módulo de oleaje permite realizar ejecuciones acopladas con los módulos Delft3D-FLOW y Delft3D-FLOW 3D MOR, de tal forma es posible analizar casos en los cuales se requiera analizar las interacciones ola-corriente (Deltares, 2023).

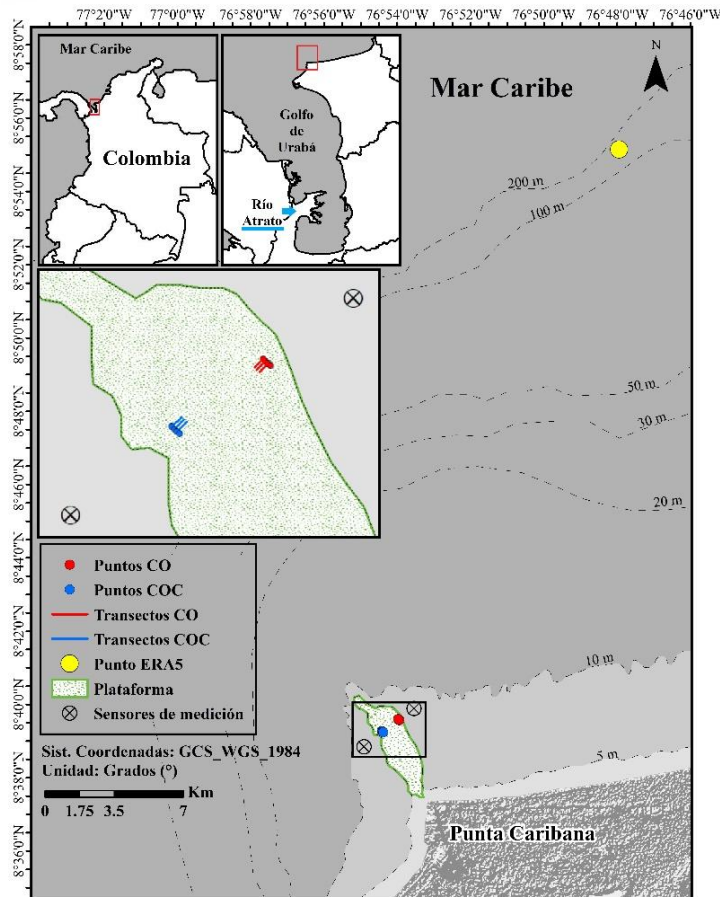


## 4. Metodología

### Área de estudio

**Figura 14**

Mapa de ubicación de los Bajos de Punta Caribana (Necoclí, Antioquia). \*CO (Costado Oriental); COC (Costado Occidental); Punto de ERA5 se encuentra en una profundidad entre 100 y 200 m a una distancia de 31.8 km de los puntos de medición *in situ*.



Nota: Fuente propia

Punta Caribana se ubica en la esquina Suroeste del Mar Caribe en el extremo Oriental del Golfo de Urabá, Colombia (**Figura 14**). En esta zona se encuentra el Cerro de Águila perteneciente a la formación Napipí compuesta por rocas sedimentarias (Lodolitas calcáreas, grises, nodulares y calizas) del Neógeno (González et al., 1999; Haffer, 1967). Esta formación se caracteriza por presentar colinas alargadas en formas de cuchillas, que se extienden hasta Chigorodó por más de 50 km. Estos rasgos geomorfológicos se deben a una o dos escamas plegadas o anticlinales falladas, las cuales poseen flancos Occidentales muy inclinados a invertidos y flancos Orientales

moderadamente inclinados (Hernández, 2008). En la metodología se establecen los enfoques de investigación, esto es, cuantitativo, cualitativo o mixto.

En términos oceanográficos, la dinámica del Golfo de Urabá está influenciada por los vientos, el oleaje, las mareas y las descargas de los ríos, en especial el Atrato, las cuales configuran un estuario altamente estratificado (Toro et al., 2019). Estos factores difieren significativamente durante las épocas seca (diciembre a abril) y húmeda (mayo a noviembre), que se presentan en la zona como respuesta a la migración latitudinal de la Zona de Convergencia Intertropical (Hastenrath, 1990; Montoya y Gómez-Giraldo, 2010; Escobar, 2011).

Con base en modelos globales como Wavewatch III (Tolman, 1989), se estimó que la altura de ola significativa ( $H_s$ ) de las olas en Punta Caribana está entre 0,75 y 1,5 m durante las épocas secas y húmedas, respectivamente (Escobar et al., 2015). Por otro lado, el régimen de marea es micromareal mixto semidiurno con amplitudes máximas de hasta 40 cm (Correa y Vernet, 2004; Quintana et al., 2021). De acuerdo con Morelo-Muñoz y Martínez-Castro (2019), la dirección del oleaje en la zona de los Bajos de Punta Caribana, es proveniente del Oriente con alturas de ola significativa ( $H_s$ ) que van desde 0,2 m (mínima) hasta 1.6 m (máxima), siendo predominante alturas entre 0,4 a 1 m.

Los Bajos de Punta Caribana presentan diferentes categorías de tipos de fondo: La categoría “roca” que consiste en fondos de grandes bloques angulares de rocas metamórficas y sedimentarias; la categoría “pavimento calcáreo – coral muerto” que aplica a aquellas zonas cubiertas por un pavimento de restos coralinos aglomerados, consolidados y litificados, generalmente con poco relieve y numerosas grietas y cavernas, seguida de la categoría ‘cascajo’ que se identifica como zonas cubiertas por fragmentos de roca, escombros calcáreos sueltos o apenas subconsolidados y finalmente, la categoría ‘arena’ que reúne las áreas cubiertas por arena, limo y arcilla (Parra-Velandia et al., 2017).

La composición taxonómica de artrópodos (hexanauplios y malacostracos, 23 spp.), equinodermos (6 spp.), moluscos (34 spp.) y peces (33 spp.) es similar a la reportada para otros sustratos rocosos y calcáreos en el Caribe Sur, con alta afinidad con la de ecorregiones marinas colombianas coralinas y existe una diferencia bien soportada en términos de las condiciones abióticas entre el conjunto del Bajo y las áreas Capurganá, Sapzurro y Parque Nacional Natural Tayrona (Parra-Velandia et al., 2017). El análisis de los factores bióticos y abióticos presenta factores conjugados (dinámica, sedimentación, estacionalidad) que no son óptimos para corales y

peces coralinos. Sin embargo, especies de estos grupos están presentes y aparentemente son saludables (Parra-Velandia et al., 2017). Un trabajo posterior demostró la existencia de una haloclina estable durante la época húmeda que explicaría la persistencia de los corales en el sitio (Morelo-Muñoz y Martínez-Castro, 2019).

### **Fase de organización y campo**

Se realizó una revisión de imágenes de los sensores satelitales Landsat 8 y 9 y Sentinel-2, buscando aquellas imágenes de baja nubosidad con fechas de toma comprendidas entre 2013 y 2022 (Anexo 1). Una vez seleccionadas las imágenes satelitales con mayor visibilidad de la plataforma, se procesaron en ArcGIS (ESRI, 2011) y por medio de manejo de contraste y correcciones de color se prepararon las imágenes para delimitar el borde de la plataforma de los Bajos y las diferentes morfologías que se lograron visualizar en ella.

### **Instalación de los sensores de presión**

Una vez delimitada la plataforma por medio de la información satelital, se seleccionaron los puntos de instalación (**Tabla 1**) de los sensores de presión (**Figura 15**) en ambos costados (Oriental y Occidental) del Bajo. Esto con el fin de poder registrar la altura significativa y el periodo asociado al pico espectral. Es de notar que por las características de los equipos (solo cuentan con un sensor de presión), con estos no era posible obtener información de la dirección del oleaje. La ubicación de los equipos se definió teniendo en cuenta que la dirección promedio del oleaje en esta zona es del Noreste (Padilla Álvarez, 2019; Sánchez y Sipión, 2020; Gallego, 2021).

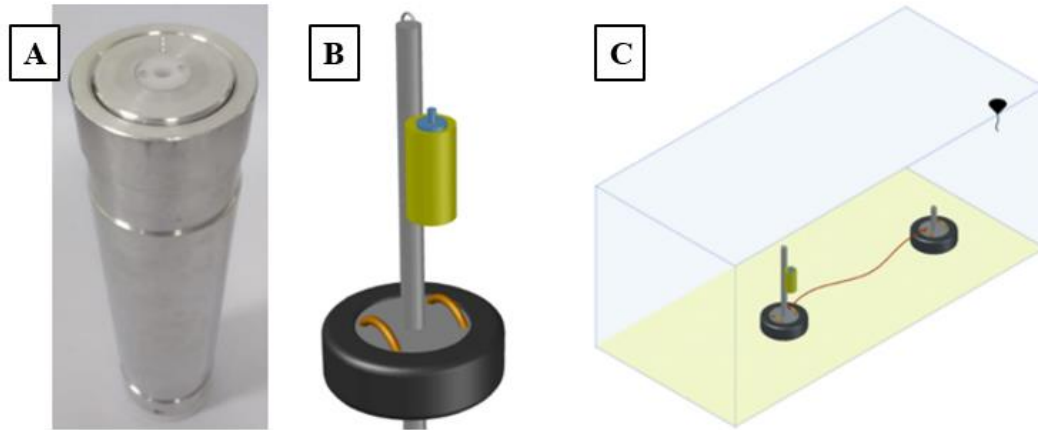
**Tabla 1**

*Ubicación de los sensores de presión*

| <b>Costado</b>   | <b>Coordenadas</b>           | <b>Profundidad (m)</b> |
|------------------|------------------------------|------------------------|
| Oriental (CO)    | 08°39'35.1"N – 076°53'52.2"W | 8                      |
| Occidental (COC) | 08°38'55.1"N – 076°54'22.7"W | 5.3                    |

**Figura 15**

Sensor de presión BlueLog A), Base para instalación de equipos B) y esquema de instalación de la base con los equipos en el fondo marino C).

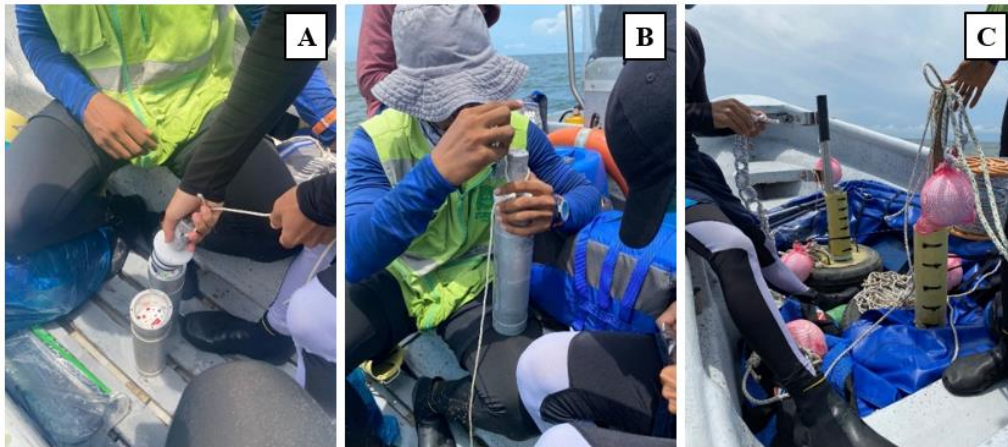


Nota: Informe PIMECLA FASE 1: componentes de mediciones, 2020.

Posteriormente, se realizó la salida a campo el 10 de septiembre de 2022 en la cual se instalaron los dos sensores en el área de estudio (**Figura 16**). Estos equipos se instalaron hasta el día 20 de noviembre para un total de dos meses y 10 días de medición.

**Figura 16**

Preparación de los sensores para posterior instalación en el área de estudio. Configuración del equipo A), Sellado del equipo B) y Ensamble de equipo en la base C).



Nota: Fuente propia

Los equipos se programaron a través de una aplicación móvil en la cual se seleccionaron las características técnicas necesarias para la medición de oleaje (**Tabla 2**). Posteriormente, los equipos se cerraron y finalmente se ubicaron en el fondo en una de las estructuras.

**Tabla 2***Características seleccionadas del sensor de presión*

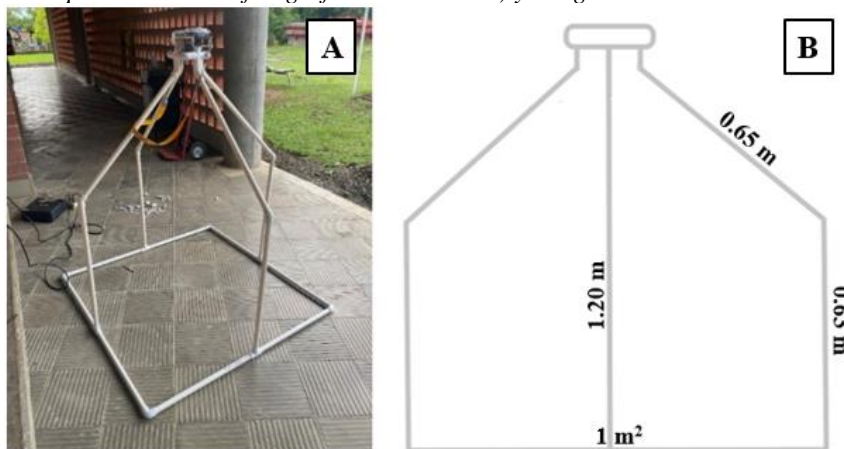
| <b>Características técnicas</b>           |                    |
|---|--------------------|
| Intervalo de medición                     | 30 min             |
| Frecuencia de medición                    | 6 Hz               |
| Número de datos por intervalo de medición | 1024 datos (3 min) |
| Variables medidas                         | Presión (bares)    |

**Muestreo de las comunidades bentónicas**

Se seleccionaron seis puntos en los cuales se establecieron seis transectos ubicados perpendicularmente al borde de la plataforma del bajo y paralelamente a la incidencia del oleaje (**Figura 14**). Una vez se definieron los puntos de muestreo (tres a cada costado) (**Tabla 3**) y la metodología (Foto transecto), se construyó una estructura de PVC que permitiera ubicar la cámara fotográfica Canon Power Shot G7X Mark II, abarcar el área requerida (1 m<sup>2</sup>) y que aportara estabilidad debido a las corrientes (**Figura 17**).

**Tabla 3***Ubicación de los transectos de muestreo de las comunidades bentónicas*

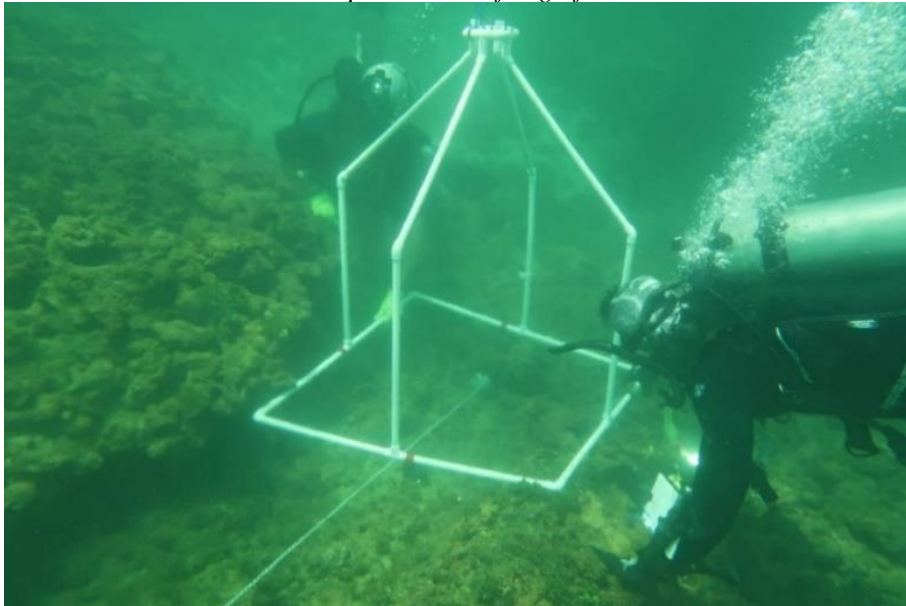
| <b>Costado</b>          | <b>Transecto</b> | <b>Coordenada inicial</b>    |
|-------------------------|------------------|------------------------------|
| <b>Oriental (CO)</b>    | 1                | 76°53'58.719"W 8°39'36.124"N |
|                         | 2                | 76°53'58.033"W 8°39'35.389"N |
|                         | 3                | 76°53'57.297"W 8°39'34.653"N |
| <b>Occidental (COC)</b> | 1                | 76°54'25.247"W 8°39'16.608"N |
|                         | 2                | 76°54'24.463"W 8°39'15.775"N |
|                         | 3                | 76°54'23.727"W 8°39'15.088"N |

**Figura 17***Estructura de PVC para la toma de fotografías: Foto real A) y Diagrama con las dimensiones B)*

En cada uno de los puntos seleccionados de cada costado se instaló el transecto de 10 m (cuerda previamente marcada) usando buceo autónomo, luego se instaló la estructura de PVC (**Figura 18**) y se comenzó a tomar las fotografías en cada cuadrante (cinco cuadrantes distribuidos a lo largo del transecto).

**Figura 18**

*Estructura de PVC ubicada en el transecto para toma de fotografías.*



### **Fase de procesamiento:**

#### **Procesamiento de datos de oleaje**

Se extrajeron los datos de los sensores de presión, se ingresaron y procesaron los datos usando Matlab con el fin de obtener los parámetros integrales del oleaje como: altura de ola significativa ( $H_s$ ) de acuerdo con Svedrup y Munk (1947) y periodo asociado al pico espectral ( $T_p$ ) mediante el análisis del espectro de energía del oleaje descrito en Holthuijsen (2007).

Adicionalmente, se descargaron datos de altura de ola significativa, periodo asociado al pico espectral y dirección promedio (**Tabla 4**) de la reanálisis de la base de datos ERA5 (de un punto determinado (las coordenadas son presentadas en el Anexo 2) (Hersbach et al., 2023). Es de notar que fueron utilizados los datos de ERA5 ya que los sensores de presión no miden la dirección del oleaje. Por lo tanto, se hizo una comparación de datos medidos vs. ERA5 con  $H_s$  y  $T_p$  y con base en este, usar la información de la dirección de ERA5.

Una vez obtenidos los parámetros integrales mencionados, se calculó la energía del oleaje (potencia de la ola) de acuerdo con lo propuesto por (McCormick, 1981) (**Ecuación 1**). Finalmente, se graficaron los resultados con el fin de analizar el comportamiento de los parámetros mencionados.

$$P = \frac{\rho g^2 H^2 T}{32\pi} \left(\frac{W}{m}\right) \text{ (Ecuación 1)}$$

Donde  $\rho$  significa Densidad del agua de mar,  $g$  describe la Gravedad.  $H$  representa la altura significativa del oleaje y  $T$  muestra el periodo asociado al pico espectral.  $W/m$  son las unidades (watt por metro).

**Tabla 4**

*Descripción de los datos de ERA5*

| <b>Descripción de datos</b> |   |
|-----------------------------|---|
| Tipo de datos               | Malla regular                                     |
| Cobertura espacial          | Global  |
| Resolución horizontal       | 0.5°x0.5°   |
| Cobertura temporal          | 3 meses (septiembre, octubre y noviembre de 2022) |
| Resolución temporal         | 1 hora  |

*Nota:* Hersbach et al., (2023).

Una vez se calcularon las series de energía de oleaje en la zona a partir de las mediciones *in situ*, se seleccionaron tres casos representativos, teniendo en cuenta los cálculos de energía en ambos costados mencionados anteriormente y las tres direcciones predominantes del oleaje en la zona de Punta Caribana (Noreste, Norte y Noroeste) reportados por Martínez y Morelo, (2019). Y de esta manera determinar cómo esta energía podría influir en las comunidades bentónicas de la plataforma. Los casos seleccionados en orden de representatividad fueron: Caso 1: Oleaje proveniente del Noreste; Caso 2: Oleaje proveniente del Norte; y Caso 3: Oleaje proveniente del Noroeste.

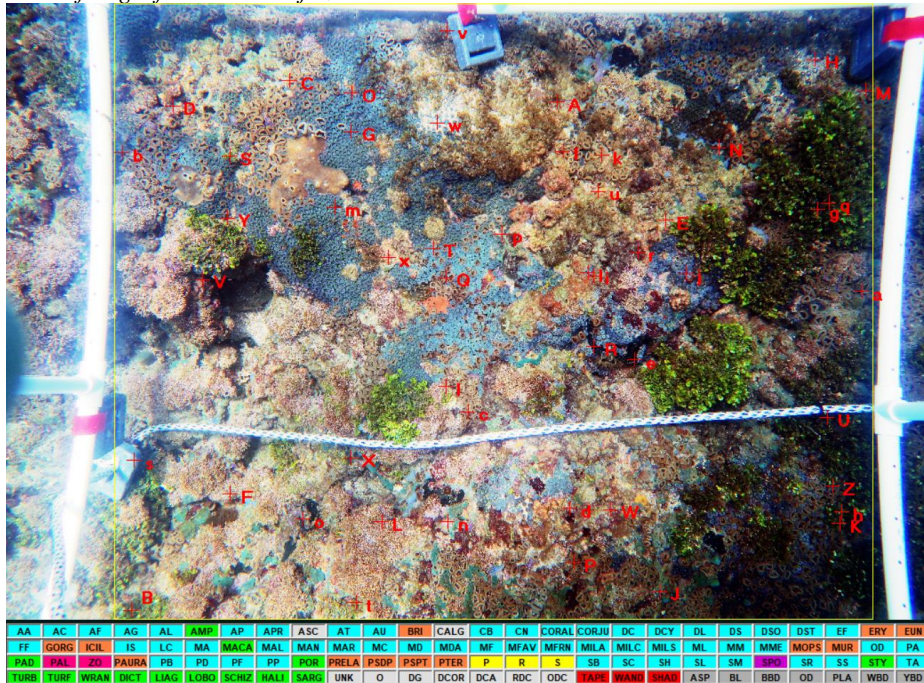


## Procesamiento de fotografías de las comunidades bentónicas

Las fotografías del fondo fueron procesadas mediante GIMP 2.1 aplicando corrección automática del balance de blancos y realce automático del contraste. Posteriormente fueron procesadas en el software CPCe (Coral Point Count with Excel extensions). Cada fotografía fue procesada creando aleatoriamente 50 puntos de evaluación (**Figura 19**) y este procedimiento se aplicó tres veces.

**Figura 19**

Visualización de fotografía en la interfaz de CPCe.

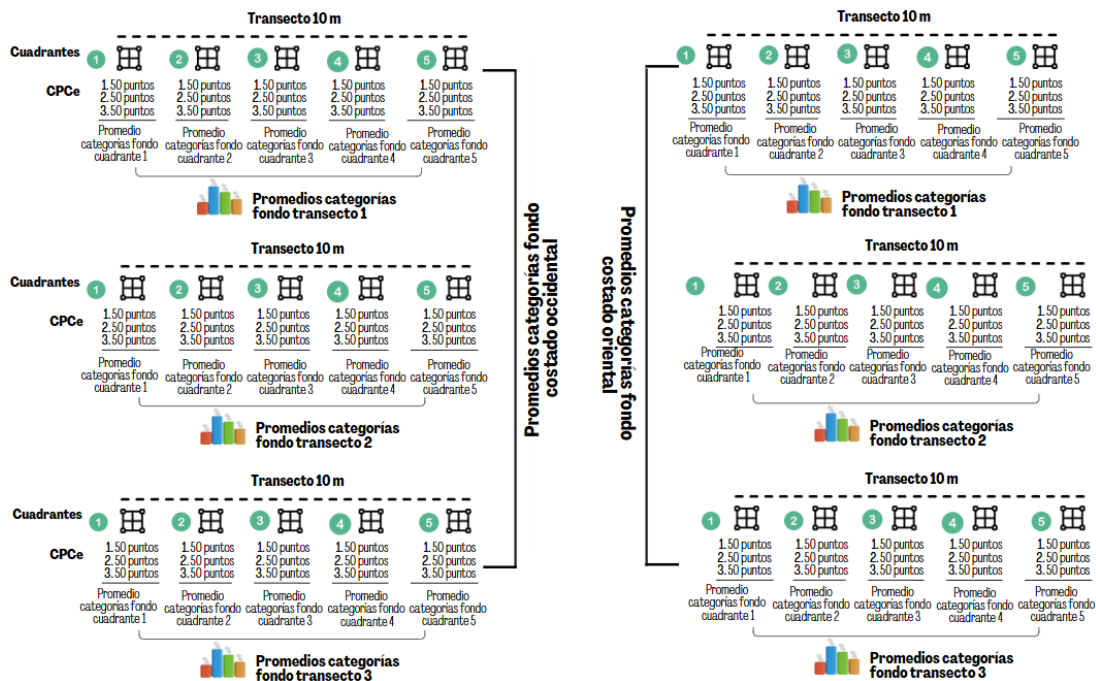


Cada superposición de los 50 puntos daba como resultado una hoja de cálculo de Excel con los porcentajes (%) de los diferentes componentes de cada especie/tipo de sustrato con sus respectivos parámetros estadísticos (media, desviación y error estándar). Finalmente, dado que las corridas son pseudoreplicas, se promediaron los tres resultados para obtener el promedio de porcentajes por cuadrante, luego se promediaron los resultados de los cinco cuadrantes para obtener el promedio de porcentajes por transecto y así sucesivamente hasta obtener el promedio de porcentajes por costado (**Figura 20**).



**Figura 20**

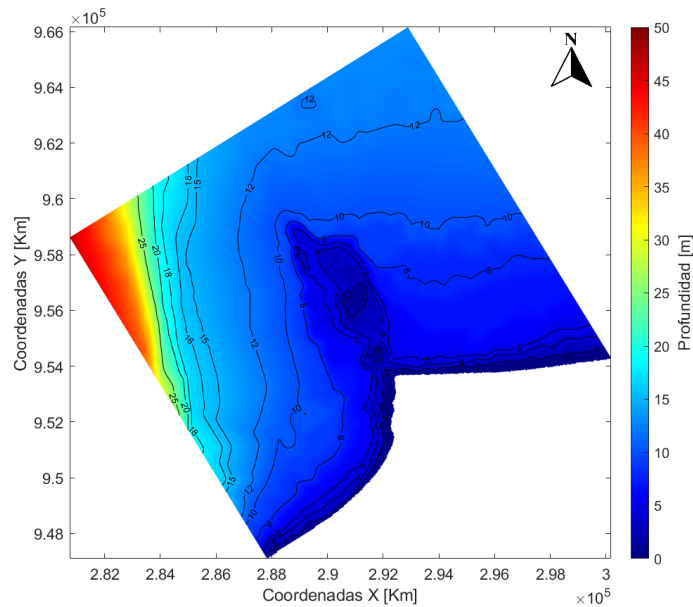
*Diagrama de procesamiento de fotografías de las comunidades bentónicas.*



## Implementación del modelo Delft3D

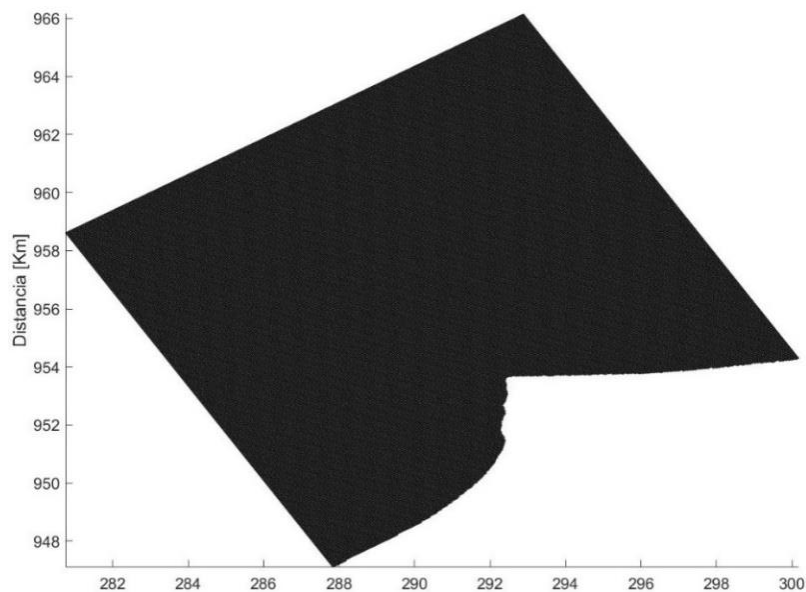
Se realizó una búsqueda de información batimétrica disponible para el área de estudio. Se obtuvieron datos de la carta náutica 412 (Dirección General Marítima et al., 2016). Sin embargo, se encontró que para el área de estudio había datos faltantes de la batimetría, por lo cual se digitalizaron en ArcGIS los datos reportados en la carta náutica 412 de manera física (**Figura 21**).

**Figura 21**  
*Batimetría del área de estudio.*



Posteriormente se diseñó una malla regular de 33 x 33 m para la zona del bajo de Punta Caribana con una extensión de 14.3 km x 13.9 km y tres fronteras abiertas al Este, Norte y Oeste. Finalmente, por medio de la sección QUICKIN del módulo WAVE se realizó una interpolación triangular entre la malla y la batimetría (**Figura 22**).

**Figura 22**  
*Malla de cálculo del área de estudio. El área de estudio se ve negra por la densidad de la malla empleada.*



Luego, se definieron los forzadores del modelo con base en el área de estudio y en la información primaria (mediciones *in situ*) y secundaria (datos satelitales de ERA5). Luego se configuraron las condiciones generales para la simulación (Anexo 3) y para cada caso (**Tabla 9**) y se definieron dos sitios de boyas virtuales que coinciden con la ubicación de los dos sensores de presión instalados *in situ*. Finalmente se realizó la ejecución del modelo y sus resultados fueron comparados con los datos medidos *in situ*.

### **Análisis de datos**

En el caso de las comunidades bentónicas coralinas se calcularon los promedios de porcentajes de coberturas de las diferentes componentes por costado del bajo (costados Oriental y Occidental). Posteriormente se realizó un análisis estadístico descriptivo en el software IBM SPSS STATISTICS (IBM Corp, 2021) por costado con el fin de evaluar los supuestos de distribución. Con el fin de determinar las diferencias entre las coberturas de los costados se realizó una prueba estadística paramétrica para los componentes que cumplieron con los supuestos y no paramétrica Kruskal-Wallis para los componentes que no cumplieron los supuestos y finalmente se realizó un análisis de Escalamiento Multidimensional No-Métrico (nMDS).

En lo relacionado con el oleaje, se graficaron las series de tiempo de cada parámetro integral (Hs, Tp y dirección) y los valores de energía del oleaje, se realizó la comparación entre los datos *in situ* vs ERA5 y se calcularon los estadísticos R<sup>2</sup> (R cuadrado),  $\sigma$  (desviación estándar), RMS (media cuadrática) y Bias (sesgo). Además, se presentaron los resultados de los tres casos de estudio ejecutados en el modelo para análisis. Finalmente se calculó el porcentaje de disipación de energía del oleaje entre los sitios ubicados de ambos costados (Ecuación 2).

$$\text{Disipación de energía del oleaje (\%)} = \frac{\text{Diferencia de energía entre costados}}{\text{Energía inicial}} \times 100 \text{ (Ecuación 2)}$$

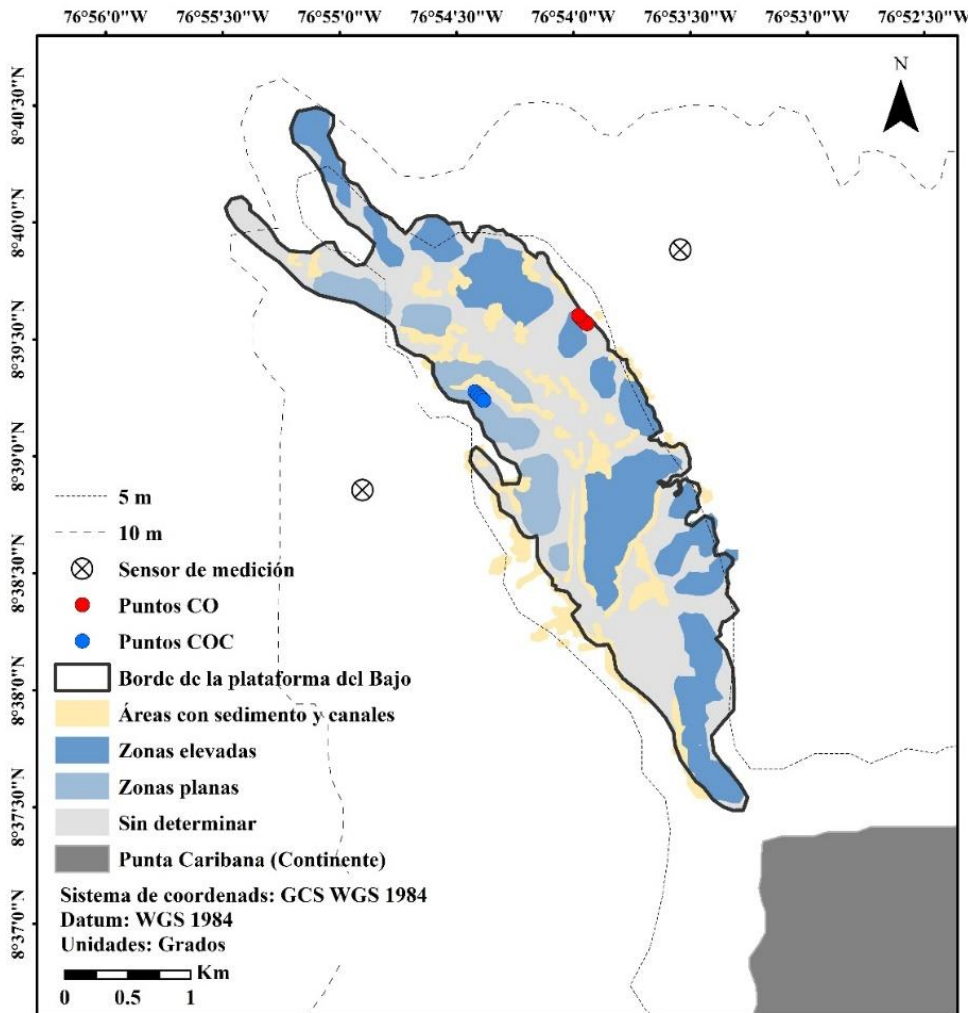
## 5. Resultados

### Descripción de la plataforma

Se identificaron las características morfológicas gruesas de la plataforma y sus costados. Las zonas identificadas (**Figura 23**) corresponden a *Áreas con sedimento y canales* (**Figura 24A**), *Zonas elevadas* (**Figura 24B, 24D y 24F**) y *Zonas planas* (**Figura 24C y 24E**).

#### Figura 23

Esquema de la morfología de la plataforma de los Bajos de Punta Caribana a partir de análisis de imágenes satelitales.

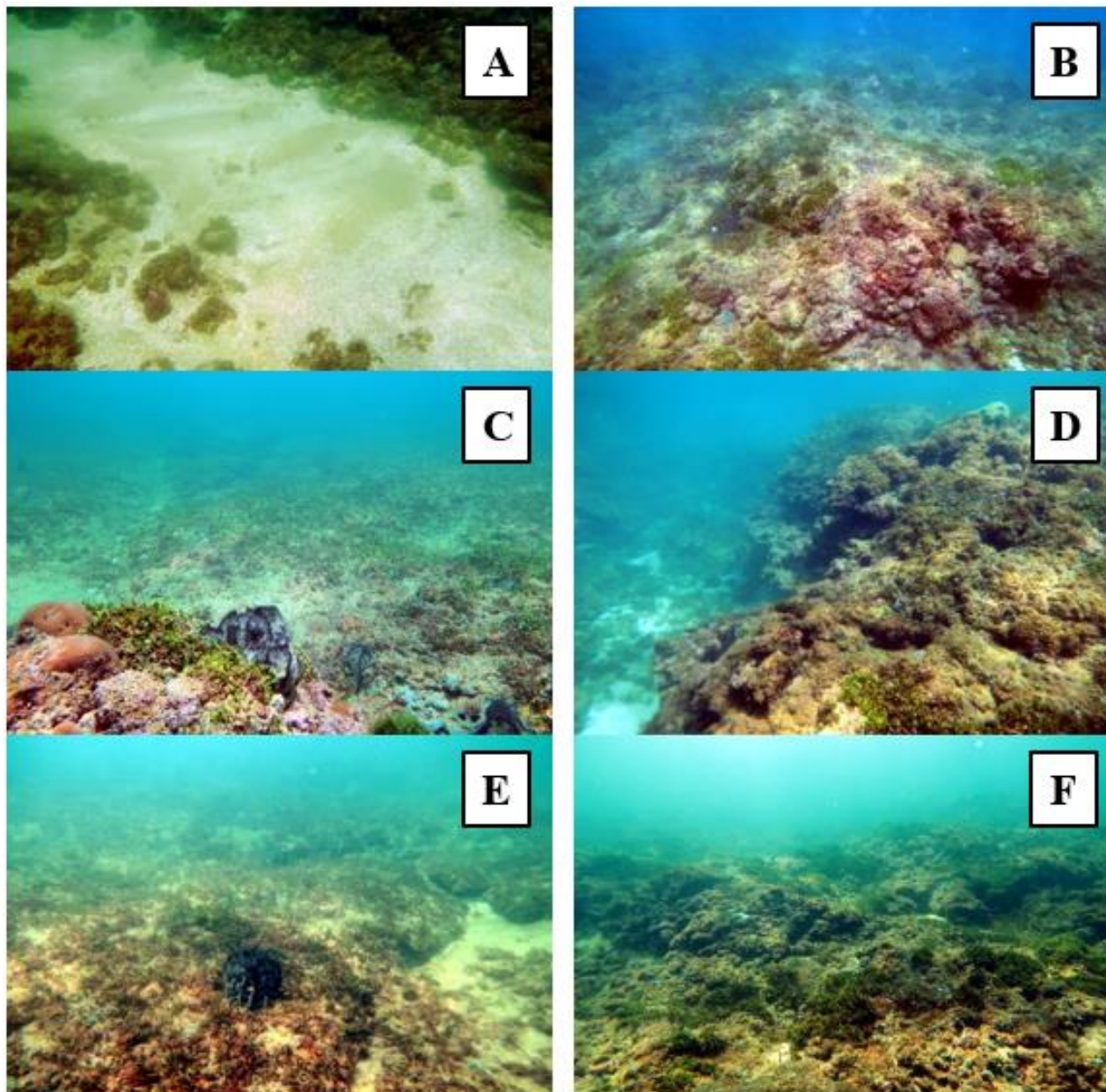


La plataforma del bajo presenta una morfología de barrera alargada en dirección Noroeste (320°), con estructuras heterogéneas compuestas principalmente por sustrato calcáreo, además de zonas y canales de arena que separan las diferentes elevaciones que la conforman (**Figura 24**). El

costado Occidental (COC) presenta profundidades entre 3 a 6 m con una zona relativamente plana con menor rugosidad cubiertas por macroalgas, esponjas y arena (**Figura 24C**). El costado Oriental (CO) presenta profundidades entre 6 a 9 m, con mayores elevaciones desde el fondo de la plataforma y mayor rugosidad (cavernas, montículos y fragmentos de corales fósiles y macroalgas, **Figura 24D**), el centro de la plataforma presenta canales de arena y variación en las elevaciones (**Figura 24A**).

**Figura 24**

*Fotografías del aspecto físico de los costados: Occidental (Columna A) y Oriental (Columna B).*

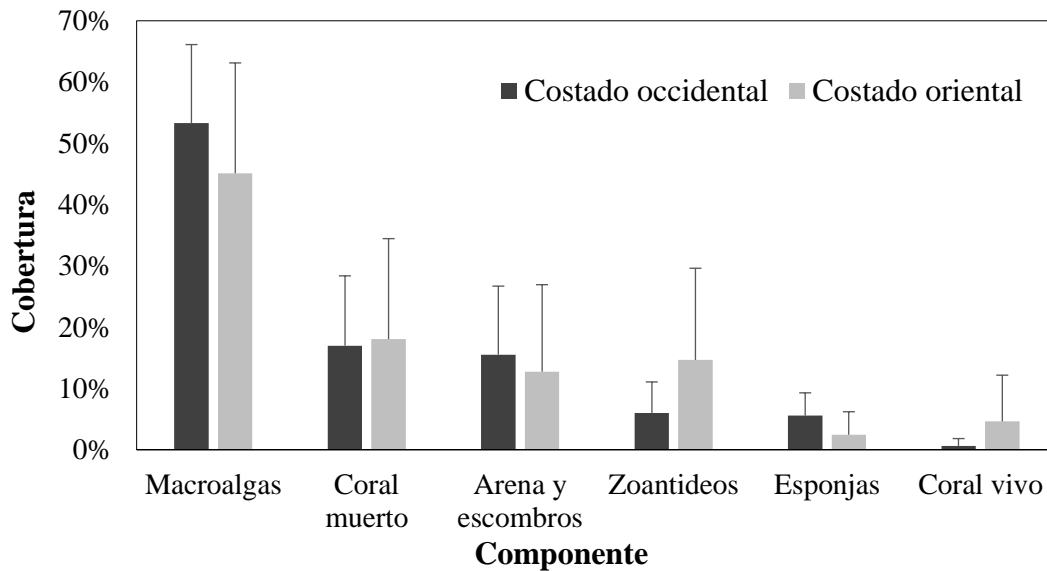


## Comunidad bentónica

La composición porcentual de los componentes de fondo en los costados Occidental y Oriental del Bajo de Punta Caribana fueron, en orden de magnitud, macroalgas, coral muerto, arenas y escombros, zoantídeos, esponjas y coral vivo (**Figura 25**).

**Figura 25**

*Promedio y desviación estándar de la cobertura de los principales componentes de la comunidad bentónica coralina en ambos costados del Bajo de Punta Caribana.*

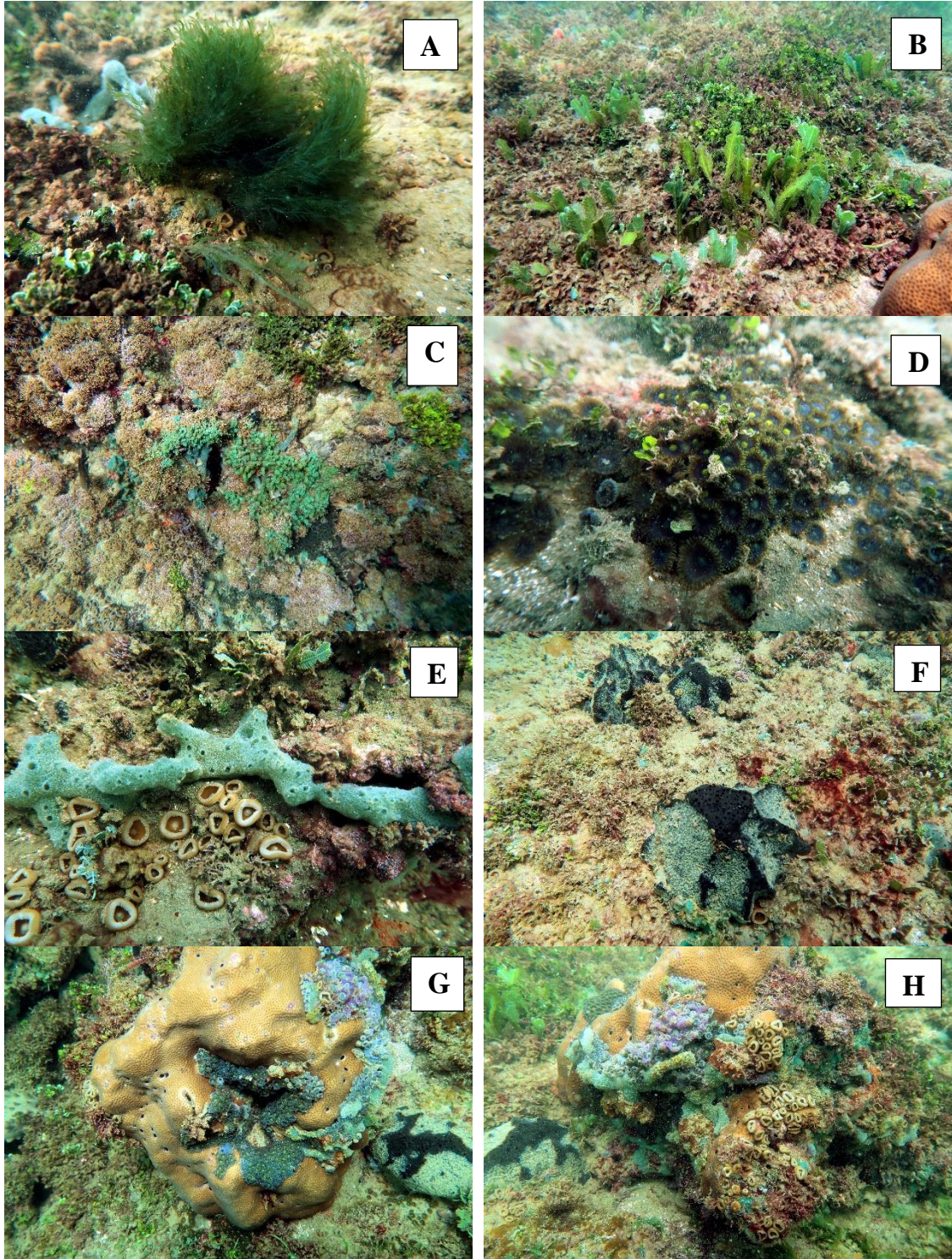


El componente macroalgas es dominante en ambos costados (Occidental  $53.3 \pm 12.9\%$  y Oriental  $45.1 \pm 18.1\%$ ), seguido del componente coral muerto con algas ( $17 \pm 11.4\%$  y  $18 \pm 16.4\%$  respectivamente), los otros componentes dominantes son diferentes entre los costados. El componente arena, pavimento y escombros tiene mayor cobertura en el costado Occidental ( $15.5 \pm 11.1\%$ ) que en el costado Oriental ( $12.7 \pm 14.2\%$ ). La cobertura de zoantídeos fue menor en el costado Occidental ( $6 \pm 5.1\%$ ) que en el costado Oriental ( $14.6 \pm 14.8\%$ ). La cobertura de esponjas fue mayor en el costado Occidental con ( $5.6 \pm 3.7\%$ ) mientras que en el costado Oriental ( $< 2\%$ ). Finalmente, la cobertura de coral vivo, tanto en el costado Oriental como en el Occidental, presento valores muy bajos ( $< 3\%$ ).



**Figura 26**

Algunos componentes de la comunidad bentónica coralina en los costados del Bajo de Punta Caribana. *Bryopsis ramulosa* A); *Caulerpa sertularioides* B); *Caulerpa racemosa* C); *Zoanthus pulchellus* D); *Amphimedon viridis* y *Dictyopteris delicatula* E); *Ircina strobilina* F); *Siderastrea siderea* G); *Amphiroa brasiliana* H).



En la **Figura 26** se observan algunas de las especies de la comunidad bentónica en los costados del bajo, en la **Tabla 6** se listan las 16 especies que fueron identificadas. No se encontraron diferencias en composición entre las especies registradas a ambos costados, ni se hallaron especies exclusivas de un costado.

**Tabla 5**

*Listado de especies bentónicas registradas en los costados de los Bajos de Punta Caribana*

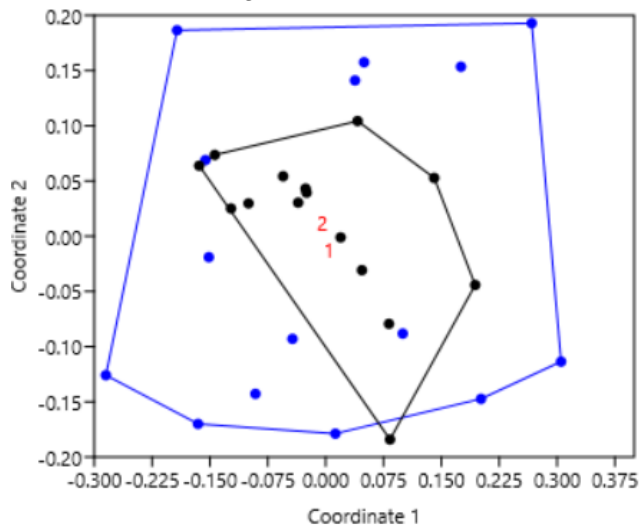
| <b>Componentes</b>  | <b>Familia</b>          | <b>Especie</b>                  | <b>Autor</b>                   |
|---------------------|-------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| Coral vivo          | Siderastreidae          | <i>Siderastrea siderea</i>      | Ellis & Solander, 1786         |
|                     | Agariciidae             | <i>Agaricia agaricites</i>      | Linnaeus, 1758                 |
| Zoantídeos          | Zoanthidae              | <i>Zoanthus pulchellus</i>      | Ellis, 1768                    |
|                     | Sphenopidae             | <i>Palythoa caribaeorum</i>     | Duchassaing & Michelotti, 1860 |
| Macroalgas (Pardas) | Dictyotacea             | <i>Dictyopteris delicatula</i>  | J.V.Lamouroux, 1809            |
| Macroalgas (Verdes) | Bryopsidaceae           | <i>Bryopsis ramulosa</i>        | Montagne, 1842                 |
|                     | Caulerpáceae            | <i>Caulerpa sertularioides</i>  | M.Howe, 1905                   |
|                     |                         | <i>Caulerpa racemosa</i>        | J.Agardh, 1873                 |
| Halimedaceae        | <i>Halimeda opuntia</i> | (Linnaeus) J.V. Lamouroux, 1816 |                                |
| Macroalgas (Rojas)  | Corallinaceae           | <i>Amphiroa brasiliana</i>      | Decaisne, 1842                 |
|                     |                         | <i>Amphiroa rigida</i>          | J.V.Lamouroux, 1816            |
| Esponjas            | Niphatidae              | <i>Amphimedon viridis</i>       | Duchassaing & Michelotti, 1864 |
|                     | Axinellidae             | <i>Dragmacidon reticulatum</i>  | Ridley & Dendy, 1886           |
|                     | Scopalinidae            | <i>Scopalina ruetzleri</i>      | Wiedenmayer, 1977              |
|                     | Clionaidae              | <i>Cliona varians</i>           | Duchassaing & Michelotti, 1864 |
|                     | Irciniidae              | <i>Ircina strobilina</i>        | Lamarck, 1816                  |
|                     |                         | Sp2. No identificada            |                                |

Se realizó un análisis de Escalamiento Multidimensional no-Métrico (nMDS) sobre la matriz de similaridad de Bray-Curtis que indicó dos grupos parcialmente superpuestos. Los resultados sugieren que hay poca diferencia entre las coberturas totales de los componentes de la comunidad bentónica identificada de ambos costados (**Figura 27**).



**Figura 27**

*nMDS de los componentes de la comunidad bentónica coralina identificada de ambos costados: costado Oriental (1- Azul); costado Occidental (2- Negro) \*.*



Para determinar si existían diferencias en la composición y coberturas de cada uno de los componentes de la comunidad bentónica entre ambos costados, primero se evaluaron los supuestos de normalidad y homocedasticidad. Este análisis indicó que no existe distribución normal ni homogeneidad de varianza (**Tabla 7**) en ningún caso excepto para el componente macroalgas que, sí cumplió con ambos supuestos. Por lo anterior, se decidió trabajar este componente con ANOVA. Para los demás componentes, a pesar de diferentes transformaciones, no fue posible mejorar la normalidad ni la homogeneidad de varianza por lo que se les aplicó la prueba de Kruskal-Wallis (**Tabla 7**).

**Tabla 6**

*Valores de p resultantes del supuesto de normalidad*

| <b>Componentes</b>           | <b>Costado Occidental</b> | <b>Costado Oriental</b> | <b>Prueba</b>  |
|------------------------------|---------------------------|-------------------------|----------------|
| Macroalgas                   | <i>0.45</i>               | <i>0.67</i>             | Anova          |
| Coral muerto                 | <i>0.42</i>               | <i>0.03</i>             | Kruskal-Wallis |
| Arena, pavimento y escombros | <i>0.00</i>               | <i>0.02</i>             | Kruskal-Wallis |
| Zoantídeos                   | <i>0.01</i>               | <i>0.03</i>             | Kruskal-Wallis |
| Esponjas                     | <i>0.70</i>               | <i>0.00</i>             | Kruskal-Wallis |
| Coral vivo                   | <i>0.00</i>               | <i>0.00</i>             | Kruskal-Wallis |

La prueba de ANOVA para el componente macroalgas, indicó que no existen diferencias estadísticamente significativas de la cobertura de macroalgas entre ambos costados del Bajo ( $p = 0.16$ ). La prueba de Kruskal-Wallis aplicada al resto de los componentes tampoco mostró diferencias estadísticamente significativas entre las coberturas de coral muerto, arena y escombros, zoantídeos y coral vivo. En el caso del componente esponjas, sí existen diferencias entre las coberturas de ambos costados ( $p = 0.01$ ) (**Tabla 8**).

**Tabla 7**

*Resultados de la prueba no paramétrica Kruskal-Wallis*

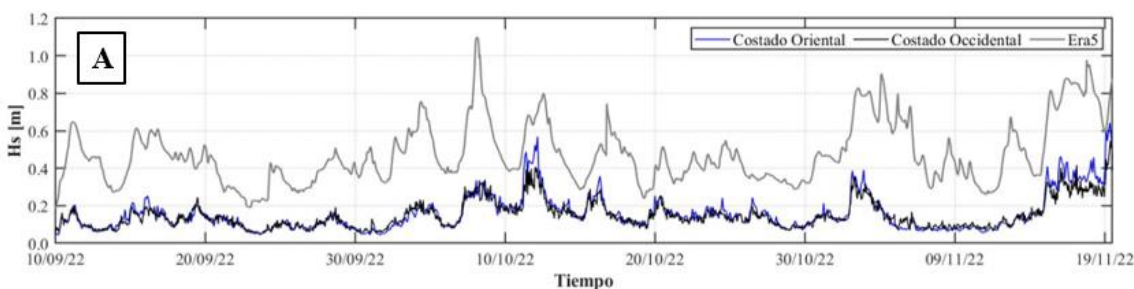
| <b>Componentes</b> | <b>Valor de <math>p</math></b> |
|--------------------|--------------------------------|
| Coral muerto       | 0.87                           |
| Arena y escombros  | 0.32                           |
| Zoantídeos         | 0.20                           |
| Esponjas           | 0.01*                          |
| Coral vivo         | 0.24                           |

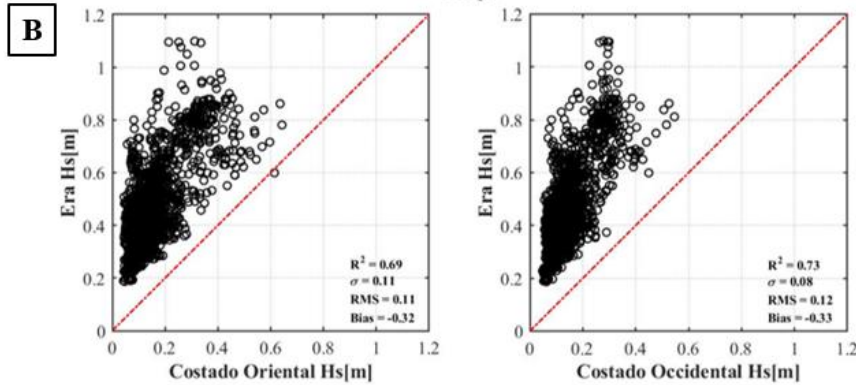
### **Caracterización del oleaje**

Se obtuvieron series temporales de la altura significativa (Figura 28) y periodo asociado al pico espectral (**Figura 29**) en costado Oriental y Occidental y a partir de información de la base de datos ERA5.

**Figure 28**

*Serie temporal de altura significativa de los sensores instalados in situ (Oriental color azul, Occidental color negro) y la base de datos ERA5 color gris A) y Comparación de Hs medido y datos ERA5 B). \*Línea roja punteada: tendencia central de los datos; Estadísticos:  $R^2$  (R cuadrado),  $\sigma$  (desviación estándar), RMS (media cuadrática) y Bias (sesgo).*

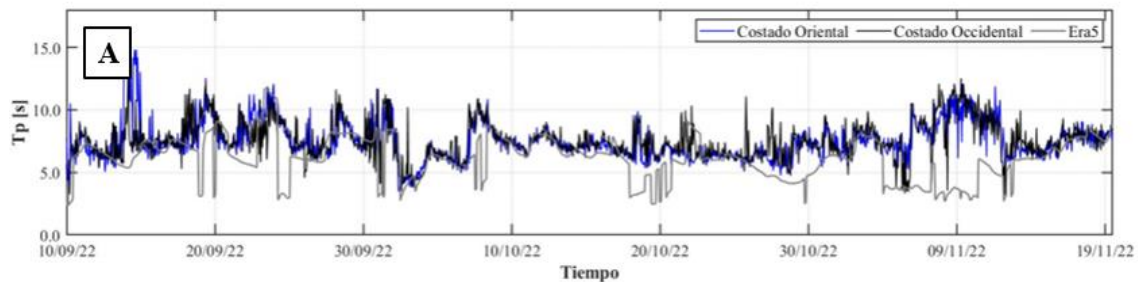


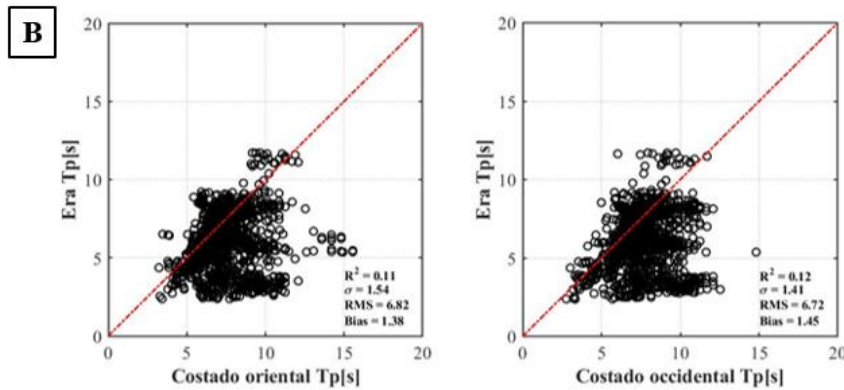


Las series temporales de altura significativa muestran un comportamiento similar para los datos medidos y valores mayores, aunque con el mismo patrón, al comparar los datos medidos y los de ERA5. En el costado Oriental se registraron alturas de ola entre 0.03 y 0.94 m con un valor promedio  $0.2 \pm 0.1$  m, mientras que en el costado Occidental se registraron alturas entre 0.04 y 0.54 m con un valor promedio  $0.14 \pm 0.07$  m. Los datos de ERA5 registraron valores entre 0.2 y 1.1 m con un valor promedio  $0.5 \pm 0.2$  m. Este análisis preliminar sugiere que los datos medidos del costado Oriental tienen valores mayores comparados con el costado Occidental. Mientras que las alturas de ola registradas por ERA5 siempre son mayores comparadas con los datos medidos *in situ* durante todo el periodo de tiempo. De acuerdo con autores como Molina, 2021; Santana, 2021; Bompoil, 2022; Bahamóndez y Aguirre. 2023, este resultado es de esperarse.

### Figura 29

Serie temporal del periodo asociado al pico espectral de sensores instalados *in situ* (Oriental color azul, Occidental color negro) y la base de datos ERA5 color gris A) y Comparación de  $T_p$  medido y datos ERA5 B). \*Línea roja punteada: tendencia central de los datos; Estadísticos:  $R^2$  (R cuadrado),  $\sigma$  (desviación estándar), RMS (media cuadrática) y Bias (sesgo).





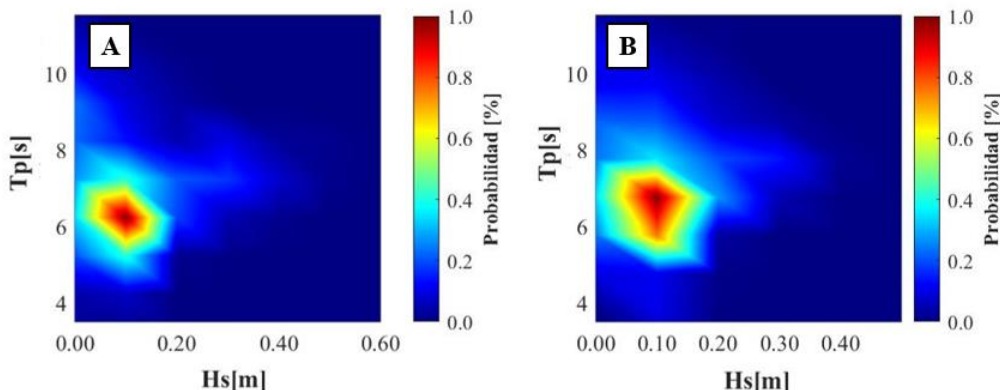
En términos generales, los valores del periodo asociado al pico espectral medidos presentaron valores similares la mayor parte del tiempo. Sin embargo, el periodo reportado por ERA5 fue menor en algunos momentos al ser comparados con los datos medidos en los costados. Para el costado Oriental se registraron periodos entre 3.0 y 16.3 s con un valor promedio  $7.5 \pm 1.7$  s, mientras que en el costado Occidental se registraron periodos entre 2.7 y 14.8 s y un valor promedio  $7.6 \pm 1.7$  s. Los datos de ERA5 mostraron valores entre 2.4 y 11.7 s con un valor promedio  $6.1 \pm 1.7$  s. Los resultados sugieren amplia variación en los periodos durante el periodo de tiempo estudiado (**Figura 29A**). Esta variación probablemente puede estar asociada a la ocurrencia de eventos climáticos y oceánicos de origen lejano (oleaje swell).

Con base en la comparación de Hs y Tp para datos medidos y ERA5, se encontraron valores de Hs mayores para ERA5 ya reportados por varios autores para zonas cercanas a la línea de costa (Padilla, 2019; Gallego, 2021). Sin embargo, es de notar que tanto los datos medidos como ERA5 tienen el mismo patrón como un offset de 0.3 m y 0.4 m para sector oriental y occidental respectivamente. En el caso de Tp los datos medidos y de ERA5 son similares. Teniendo en cuenta lo anterior, en los siguientes análisis solo se usarán los datos de dirección de ERA5.

Teniendo en cuenta los resultados anteriores, se calculó la probabilidad conjunta entre Hs y Tp para los datos medidos en los dos costados del bajo (Figura 30). Se observa como en el costado Oriental existe una probabilidad del 80% que presente oleaje con Hs entre 0 a 0.2 m y T entre 5.2 a 7.2 s (**Figura 30A**). Mientras que en el costado Occidental la probabilidad de que se presente oleaje con Hs entre 0 a 0.17 m y Tp entre 5.2 a 7.7 s es del 70% (**Figura 30B**).

**Figura 30**

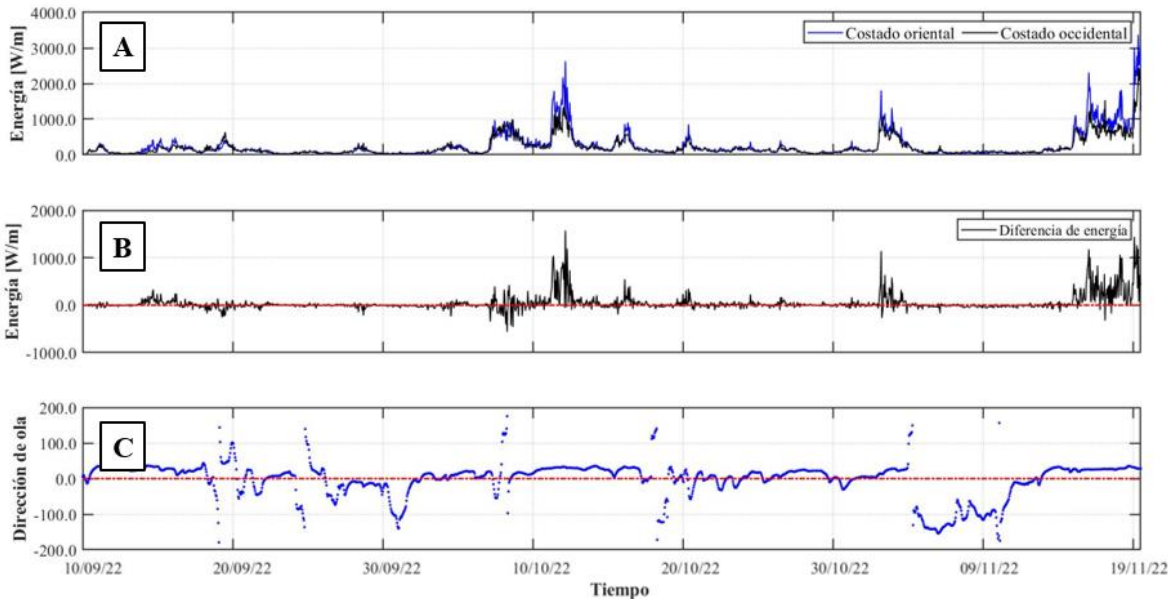
Probabilidad conjunta de ocurrencia entre la altura de ola significativa y periodo asociado al pico espectral. Costado Oriental A) y costado Occidental B).



En términos de energía del oleaje, se observa de manera general poca variación (**Figura 31A**). Sin embargo, se presentan picos durante ciertos días en los que la energía del oleaje aumenta considerablemente. En términos de costados: en el Oriental se registran valores de energía del oleaje entre 7.0 y 3371.1 W/m con un valor promedio de  $250.2 \pm 371.3$  W/m. Mientras que en el Occidental se registran valores de energía entre 10.5 y 2437.8 W/m con un valor promedio de  $208.1 \pm 253.4$  W/m.

**Figura 31**

Series temporales de energía del oleaje medido en el costado Oriental (azul) y costado occidental (negro A); Diferencia de energía entre los dos costados B) y Dirección del oleaje ERA5 C).



En la **Figura 31B** se observa la diferencia de energía entre el costado Oriental y el costado Occidental. Los valores positivos indican que la energía del oleaje en el costado Oriental es mayor y los valores negativos indican mayor energía en el costado Occidental. Se observa como en general la energía es mayor en el costado Oriental que en el Occidental. Se presentan picos de energía que coinciden con los picos de altura significativa. En términos de dirección del oleaje, se observa como en la mayor parte del tiempo estudiado el oleaje provenía del noreste (40 y 50°). Sin embargo, en ciertos días, se registraron direcciones provenientes desde el norte (-15 y 15°), noroeste (-40 y 55°) y suroeste (-130 y -150°) (**Figura 31C**).

Con base en lo anterior, se seleccionaron tres casos característicos de oleaje los cuales fueron implementados en el modelo Delft3D (**Tabla 9**). Los casos tienen en cuenta la diferencia de energía, la dirección registrada y el periodo en el cual se presentó.

**Tabla 8**

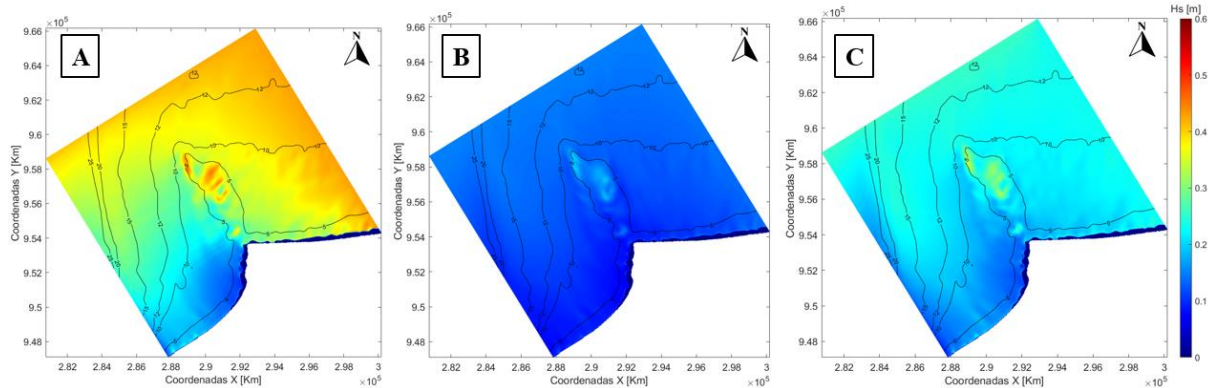
*Casos característicos del oleaje*

| <b>Caso</b> | <b>Energía</b>                         | <b>Dirección de oleaje</b>           | <b>Periodo de tiempo</b> |
|-------------|--|--------------------------------------|--------------------------|
| 1           | Mayor en el costado Oriental           | Oleaje proveniente del Noreste (NE)  | 10 al 15 octubre 2022    |
| 2           | Energía similar en ambos costados      | Oleaje proveniente del Norte (N)     | 22 al 28 septiembre 2022 |
| 3           | Mayor energía en el costado Occidental | Oleaje proveniente del Noroeste (NO) | 7 al 10 octubre 2022     |

En la **Figura 32** se presentan los campos de oleaje de un instante de tiempo de los tres escenarios característicos durante el periodo de tiempo estudiado. En este caso para el oleaje proveniente del noreste (A), norte (B) y noroeste (C).

**Figura 32**

Resultados de  $H_s$  en un instante de tiempo de los tres casos característicos modelados en Delft3D. Caso 1 oleaje proveniente del Noreste A); Caso 2 oleaje proveniente del Norte B) y Caso 3 oleaje proveniente del Noroeste C).



Para el **caso 1** cuando el oleaje proviene del NE se observan valores promedio de  $H_s$  entre 0.4 y 0.5 m, un aumento de altura de la ola ( $> 0.5$  m) al llegar al bajo. Es de notar que posteriormente al pasar el oleaje por encima del bajo los valores disminuyen formando una zona de poca altura ( $< 0.1$  m) en la zona de playa Bobalito (Figura 32A). En el **caso 2** cuando el oleaje proviene del N se observa que los valores espaciales de altura de ola son menores que el caso 1 y varían entre 0.05 y 0.2 m. Nuevamente los valores aumentan levemente en la parte del frente del bajo, sin embargo, al parecer no se presenta mayor variación cuando el oleaje llega a la costa de manera paralela (Figura 32B). Finalmente, el **caso 3** cuando el oleaje proviene del NO, las alturas oscilan entre 0.15 y 0.35 m, generándose un ligero incremento en la altura al llegar al bajo ( $\sim 0.38$  m) y posteriormente al pasar el bajo una disminución ( $\sim 0.25$  m). Se realizó una comparación de los resultados medidos y modelados (**Figura 33**), con el fin de verificar que el modelo estuviera representando de manera adecuada la dinámica del bajo durante el tiempo estudiado.

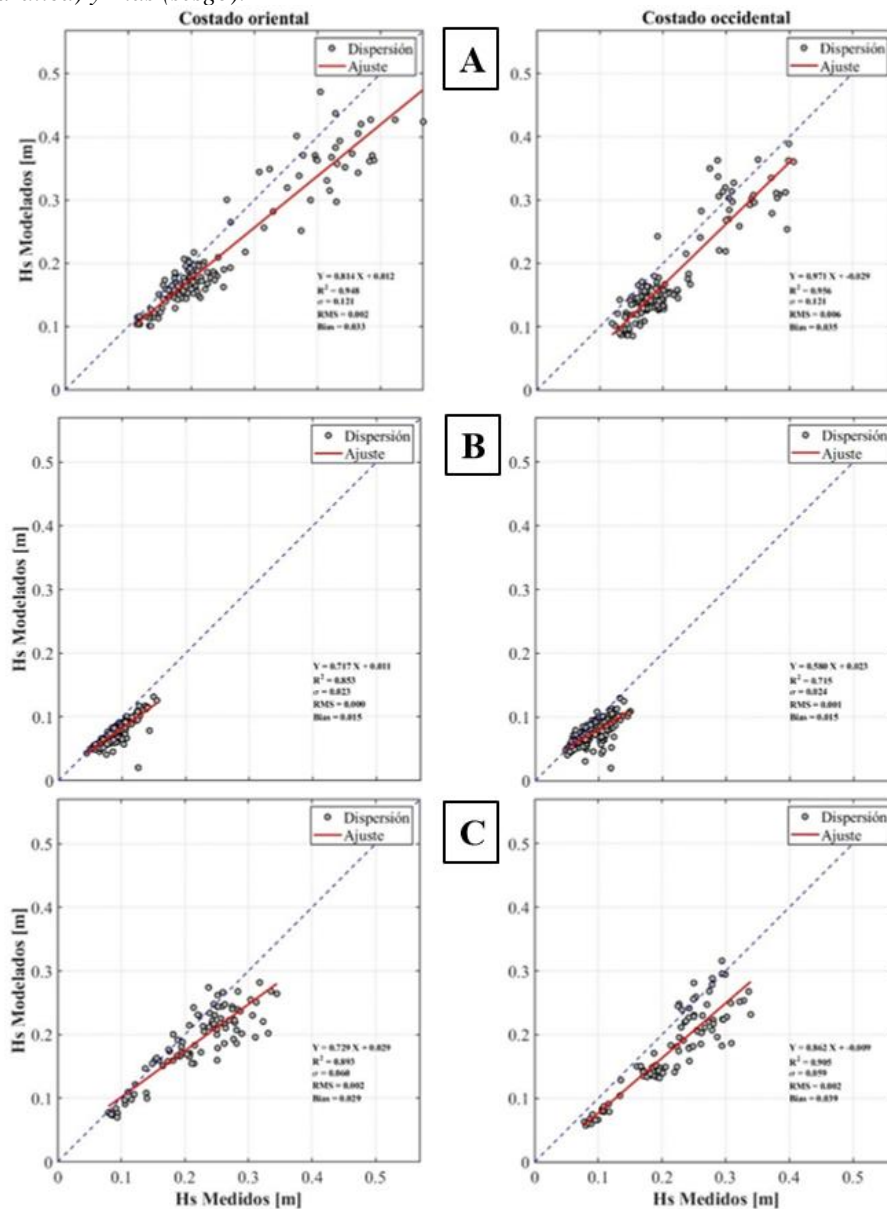
En términos generales, en la **Figura 33** se observa como los valores de  $H_s$  modelados son similares a los medidos en la zona de estudio. Sin embargo, se observa como las alturas de ola modeladas son ligeramente menores que las medidas: en el **caso 1** (A) tanto las alturas medidas y modeladas del costado oriental son mayores que las del lado occidental. Para el **caso 2** los valores de altura son similares y menores en comparación con el caso 1 tanto en las medidas como en los modelados. Finalmente, en el **caso 3** las alturas presentan una ligera variación entre datos medidos y modelados. Sin embargo, se observa una tendencia y valores similares. Los resultados anteriores sugieren que, el modelo representa de manera adecuada la dinámica natural de la zona de estudio. Adicionalmente para cada caso se calculó la energía del oleaje modelada y la diferencia de energía



modelada entre los dos costados (Anexo 4) para posteriormente compararla con la diferencia de energía de oleaje medida.

**Figura 33**

Comparación de Hs medido y modelado en cada costado: Caso 1 (A); Caso 2 (B); Caso 3 (C). \*Línea roja punteada: tendencia central de los datos; Estadísticos: R2 (R cuadrado),  $\sigma$  (desviación estándar), RMS (media cuadrática) y Bias (sesgo).



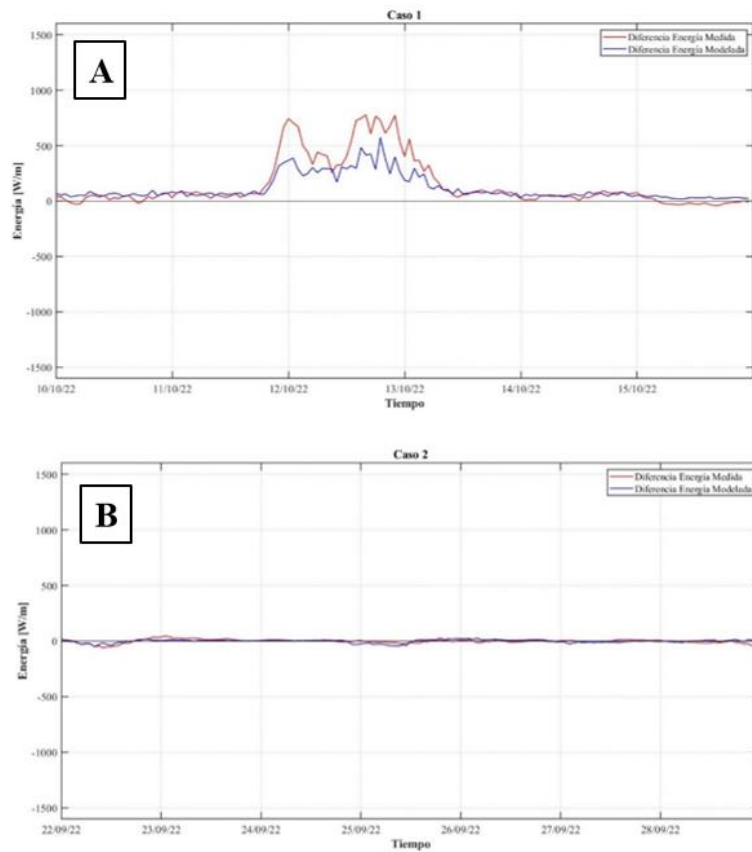
En la **Figura 34** se presentan las diferencias de energía entre el costado oriental y occidental para los casos 1 a 3. Para el **caso 1** (A) cuando el oleaje proviene del NE tanto la diferencia de energía del oleaje modelada y medida presentan un comportamiento similar indicando con valores

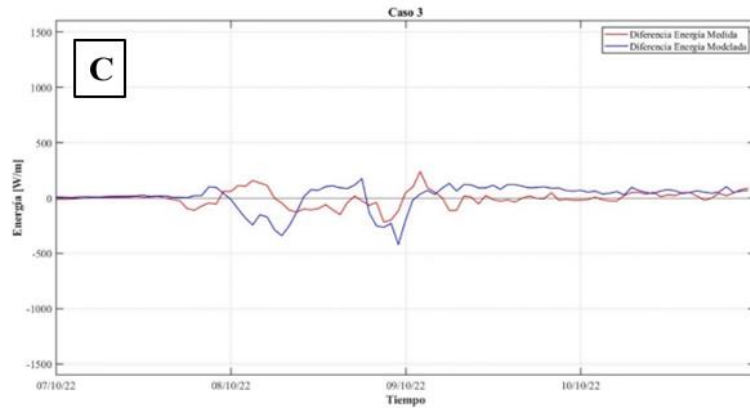


positivos que hay mayor energía en el costado Oriental con valores entre  $\sim 250$  y  $800$  W/m. El **caso 2** (B) con oleaje proveniente del N se registra un comportamiento similar entre ambas diferencias con valores de diferencia de energía menores respecto al caso 1 ( $\sim -100$  y  $80$ W/m). Finalmente, el **caso 3** (C) cuando el oleaje proviene del NO se observa que la diferencia de energía del oleaje modelada y medida coinciden en su comportamiento en la mayoría del tiempo. Sin embargo, se presenta un momento en el cual las diferencias son positivas en las mediciones y negativas en la modelación. Esto se podría deber a que el oleaje en este caso en la modelación solo se consideró oleaje del NO y en las mediciones se pudo haber presentado al mismo tiempo oleaje del NE.

**Figura 34**

*Comparación de diferencia de energía del oleaje modelada y medida en los tres casos.*





Finalmente, en términos de porcentaje de disipación de energía medida, en el **caso 1** cuando el oleaje proviene del NE el bajo logra disipar en promedio el  $27.5 \pm 17.8\%$  de energía del oleaje. En el **Caso 2** cuando el oleaje proviene del N el bajo no disipa energía. En el **caso 3** con oleaje del NO el bajo logra disipar en promedio el  $26.7 \pm 23.04\%$  de energía. Este resultado indica que efectivamente el bajo de Punta Caribana funciona como una barrera natural que logra disipar la energía del oleaje proveniente ya sea del NE y del NO, permitiendo así la protección de las zonas de playa aledañas en términos de erosión costera.

## 6. Discusión

Los resultados muestran que la plataforma del Bajos de Punta Caribana presenta un relieve irregular caracterizado por zonas elevadas en el costado oriental (CO) con mayor rugosidad debido a estructuras coralinas fósiles, fragmentos y sedimentos gruesos. Mientras que el costado Occidental (COC) presenta zonas de menos elevación con menor rugosidad compuestas por planicies cubiertas por macroalgas y sedimentos finos. Este paisaje sugiere que la zona ha sufrido cambios ambientales, probablemente debido al régimen de lluvias, corrientes y alta sedimentación, que ocasionaron la muerte y deterioro de diferentes especies (Díaz et al., 1996; Ospina-Hoyos et al., 2014) resultando en el paisaje actual en términos de composición y estructura de la comunidad bentónica.

Este estudio realizó la primera caracterización del oleaje con mediciones in situ en los Bajos de Punta Caribana, resultados que indican que la dirección predominante del oleaje en esta zona es del Noreste. Siendo el CO el que presenta en promedio mayor altura y energía del oleaje en comparación con el COC. Este resultado coincide con Padilla Álvarez (2019) y Gallego (2021) en la dirección predominante del oleaje, y con Sánchez y Sipión (2020) que indicaron que el oleaje local dominante en Punta Caribana proviene del Noreste y presenta amplia variación energética. Así mismo, en términos de energía el CO presenta oleaje más energético, lo cual le permite que en estas condiciones de dirección (NE Y NO) funcione como una barrera que logra disipar el ~27 % de energía hacia el COC proporcionando protección costera en zonas aledañas. Esta disipación de energía probablemente sea debido a la altura y rugosidad del Bajo, pues de acuerdo con Lugo-Fernández et al., (1998) la disipación de energía por parte de los arrecifes está altamente relacionada con la fricción generada con la rugosidad del fondo.

Es de notar, que en este estudio por razones técnicas no fue posible medir la rugosidad del bajo y queda como trabajo futuro. Sin embargo, por la morfología que se conoce del bajo y las diferentes características físicas identificadas en ambos costados, la rugosidad y su altura probablemente sean factores importantes. Precisamente, Osorio-Cano et al (2018) reportó que la disipación de energía de las olas en los arrecifes está mayormente relacionada con la topografía de los arrecifes, sin dejar de lado los efectos que puede generar la rugosidad y otros factores. Vale la pena mencionar, que la simulación de los tres casos representó de manera adecuada la dinámica medida in situ, ya que permitió corroborar que efectivamente cuando se presenta oleaje tanto del NE y NO, el Bajo funciona como reductor de energía en las zonas contrarias. Mientras que cuando

el oleaje proviene del N el Bajo y sus playas traseras reciben en ambos costados energía similar. Esto coinciden con los resultados obtenidos por Gallego (2021) al evaluar escenarios de Hs en el modelo Delft3D con direcciones de NE ya que esta dirección representó el 52.24 % de la probabilidad de ocurrencia, dando como resultado oleajes más energéticos en Punta Caribana respecto a Punta Arena y Necoclí.

La comparación de la composición específica de la comunidad bentónica entre ambos costados de la plataforma de los Bajos no presento diferencias a pesar de la reducción de energía del oleaje registrada (27%). Se reportan 16 especies de organismos bentónicos que también han sido reportadas en otras áreas coralinas en el Golfo de Urabá (Parra-Velandia et al., 2017; Valderrama & Zea, 2003) y en el Caribe Colombiano (Cendales et al., 2002; Díaz et al., 1996; Martínez & Acosta, 2005; Ruidíaz- Ruidíaz et al., 2021).

En cuanto a la cobertura por componentes, las macroalgas son el componente con mayor cobertura (> 45 %) en ambos costados sin diferencias significativas entre ellos. Al igual que en otros estudios en el Caribe Colombiano (Rodríguez-Ramírez & Garzón-Ferreira, 2003; Vega-Sequeda et al., 2008; Ruidíaz- Ruidíaz et al., 2021), a pesar de las condiciones subóptimas de turbidez y sedimentación en la zona. Carpenter (1986); McCook (1999), indican que factores de estrés coralino sumandos a la disminución de herbívoros permiten el establecimiento, el desarrollo y mayor cobertura de macroalgas, lo que explicaría la presencia de estas en la zona. Adicionalmente, factores como la salinidad, el oleaje y el tipo de sedimento influyen en su distribución local (Bula-Meyer, 1977).

Por otro lado, el bajo porcentaje de cobertura de coral vivo (< 3 %) se debe posiblemente a factores de estrés como turbidez del agua y sedimentación (Escobar, et al., 2015; Montoya, et al., 2017) pues el aumento de sedimentos en el agua impide el desarrollo de larvas, la alimentación de los pólipos y la realización del proceso fotosintético de las zooxantelas (Pinilla et al., 2007). Sin embargo, este porcentaje indica que a pesar de las condiciones subóptimas de la zona algunas especies pueden soportar estas condiciones de estrés, pues encontramos en su mayoría pequeñas colonias de *Agaricia agaricites* y *Siderastrea siderea* especies que son resistentes a la sedimentación. Así mismo, la distribución de los corales en la plataforma no parece obedecer a la orientación frente al oleaje o a la disipación de este, por lo que es necesario evaluar otros factores como la transparencia, la profundidad y la granulometría de los sedimentos adyacentes. Sin embargo, el porcentaje de cobertura de zoantídeos (parientes de los corales) especialmente

*Zoanthus* y *Palythoa* fue mayor en el Bajo (~11%), y también lo es en las terrazas y crestas arrecifales del Caribe Colombiano, donde estos géneros suelen dominar y tener alta cobertura (Díaz et al., 2000). Un oleaje mas intenso en el costado occidental podría explicar la alta cobertura (aunque no significativa) de estas dos especies en dichos costados y en el Bajo en general dadas sus características biológicas que los hace resistentes frente a los factores de estrés (Acevedo, 2007; Oliveria et al., 2022).

El componente de esponjas si presento diferencias significativas, siendo mayor su cobertura en el COC. Estas diferencias pueden estar relacionadas con factores como el tipo de sustrato, la intensidad lumínica, la turbulencia, la exposición al oleaje, entre otros (Díaz et al., 1990; Schmahl, 1990; Zea, 1993) condiciones en las que prefieren habitar estos organismos. De acuerdo con Zea (2001) las esponjas prefieren estar lejos de los efectos del oleaje energético, como se comprobó aquí.

Por otro lado, de acuerdo con Fell et al. (1989) y Valderrama y Zea, (2003) ciertas especies de esponjas se excluyen en fuertes gradientes de salinidad, sin embargo, este estudio mostró que las esponjas prefieren el COC y como se demostró en el trabajo de Martínez y Morelo, (2018), este costado presenta fluctuaciones en la salinidad debido a las descargas de agua de los ríos del Golfo (en especial el río Atrato) mientras que el CO está dominado por aguas totalmente marinas durante la época húmeda, al menos. Otro factor discordante, es el tipo de sustrato, aunque normalmente las esponjas prefieren sustratos firmes con relieve heterogéneo para sujetarse (Díaz & Zea, 2008; Ilan & Abelson, 1995; Parra-Velandia & Zea, 2003), el COC presenta menor rugosidad y más sedimentos finos que no proporcionan estabilidad. Según Zea (2001), Hooper y Kennedy (2002), de Voogd et al (2006) y Bell et al (2015), estos sedimentos en suspensión generan afectaciones sobre las esponjas como obstrucción y reducción de la actividad de bombeo, reducción de la eficiencia de la alimentación, entre otros procesos, sin embargo, las condiciones subóptimas como aguas menos saladas, con mayor cantidad de materia orgánica y nutrientes en suspensión favorecen el desarrollo de algas y organismos filtradores principalmente las esponjas dando como resultado mayor representatividad en términos de ocupación de espacio (abundancia) (Keypas, 1996; Zea, 2001; Cháves-Fonnegra *et al.*, 2007; Sheppard et al., 2009; de Goeij et al., 2013; Ardila, 2013). Probablemente estas condiciones facilitan que las esponjas y las algas encuentren un ambiente más atractivo para habitar en el COC, además de la protección que ofrece ante la energía del oleaje en comparación con el CO que presenta mayor energía lo que explicaría su mayor cobertura.

## 7. Conclusiones

El bajo de Punta Caribana presenta un relieve irregular caracterizado por zonas elevadas en el costado Oriental con mayor rugosidad compuesta por estructuras de coralinas fósiles, fragmentos y sedimentos gruesos. Mientras que el costado Occidental presenta zonas de menor elevación con menor rugosidad compuesta por planicies cubiertas por macroalgas y sedimentos finos.

El porcentaje de cobertura de las comunidades bentónicas es similar en ambos costados del bajo, siendo la comunidad de macroalgas la dominante y siendo el menor porcentaje el de coral vivo. Se exceptúa la cobertura de esponjas que, sí presentó diferencias significativas, siendo mayor en el costado Occidental.

A partir de las mediciones *in situ* se encontró que la dirección predominante del oleaje que llega a Punta Caribana es la dirección Noreste. Al costado Oriental llega oleaje de esta dirección con energía del oleaje que se ve reducida en magnitud por efecto de bajo, logrando disipar el 27% de energía hacia el costado occidental. Esta reducción en magnitud de la energía del oleaje se pudo reproducir con un modelo numérico el cual permitirá predecir como podría ser la disipación de energía por parte del bajo para diferentes escenarios de altura, periodo y dirección de oleaje.

Finalmente, a pesar de la diferencia energética del oleaje entre los costados del Bajo no se identificó influencia directa sobre el porcentaje de cobertura de la comunidad bentónica, excepto en el caso de las esponjas. Es necesario evaluar si la diferencia de cobertura de ellas está asociada al gradiente de salinidad, a la sedimentación o a la cantidad de material alimentario disponible (materia orgánica y nutrientes) proveniente de descargas continentales cercanas y del río Atrato.

## **8. Recomendaciones**

Se sugiere hacer la batimetría detallada de los Bajos de Punta Caribana para describir en detalle sus características morfológicas.

Se sugiere ampliar espacialmente el análisis de la dinámica del oleaje y corrientes con mayor cantidad de instrumentos *in situ* y estos situados por más tiempo para conocer en detalle el comportamiento de estas en toda el área de los Bajos de Punta Caribana.

Para el caso de las comunidades bentónicas, se sugiere ampliar espacialmente los puntos de censo para identificar si la cobertura de estas comunidades presenta o no variaciones en toda la extensión del bajo y hacer un levantamiento de las comunidades coralinas fósiles hoy cubiertas por arena.

Se plantea analizar las variaciones de salinidad, la sedimentación y disponibilidad de materia orgánica y nutrientes en suspensión en la zona a lo largo del año con el fin de corroborar si estas son factores que afectan la presencia y porcentaje de cobertura de esponjas.

## 9. Referencias

- Acevedo Soto, V. (2007). *Effects of sedimentation on the distribution and ecology of the reef zoanthid Palythoa Caribaeorum*. [tesis de maestría, Universidad de Puerto Rico. Mayagüez campus]. Biblioteca digital Universidad de Puerto Rico.
- Agisoft LLC. (2020). Agisoft Metashape 2.1.1 Professional edition. [www.agisoft.com/downloads/installer/](http://www.agisoft.com/downloads/installer/). Consultado abril 2024
- Andrade, A. y A. González. (1995). Base de datos para la zonificación ecológica: Una propuesta. *Revista SIG-PAFC*, 2: 30–85.
- Ardhuin, F., Charon, B., & Collard, F. (2009). Observation Of Swell Dissipation Across Oceans. *Geophys. Res. Lett.*, 36, 5. <http://bit.ly/3XeFEHB>
- Ardila R, M. E. (2013). *Ocupación de espacio por esponjas y otros componentes sésiles en arrecifes del Caribe colombiano en relación con la materia orgánica en suspensión*. [Tesis de maestría. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias, Departamento de Biología. Bogotá, Colombia]. Repositorio Universidad Nacional.
- Atkinson, M., Smith, S. V. & Stroup, E. D. (1981). Circulation in Enewetak atoll lagoon. *Limnology and Oceanography*, 26(6): 1074–1083. <https://bit.ly/3VeCfWz>
- Bahamóndez, S. & Aguirre, C. (2023). Sistema de simulación numérica para la costa de Chile central mediante el acoplamiento de modelos numéricos. *Obras y proyectos*. 33, 15-22. <https://bit.ly/4c1lrcu>
- Bell, J. J., McGrath, E., Biggerstaff, A., Bates, T., Bennett, H., Marlow J. & Shaffer, M. (2015). Sediment impacts on marine sponges. *Marine Pollution Bulletin*. 94(1-2): 5-13. <https://bit.ly/45htgbL>
- Bernal, F. G., Montoya, J. L. J., Garizábal, C. C. & Toro, B. M. (2005). La complejidad de la dimensión física en la problemática costera del Golfo de Urabá, Colombia. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia. *Gestión y Ambiente*. 8(1): 123–135. <https://bit.ly/3KxybvG>
- Birkeland, C. 1997. Life and death of coral reefs. *Springer Science & Business Media*. 536.
- Björk, M., Short, F., Mcleod, E. & Beer, S. (2008). Managing seagrasses for resilience to climate change. *IUCN Resilience Science Group Working Paper Series*. Suiza. 56. <https://bit.ly/4c6ah6a>.
- Bompoil, M. (2022). *Estudio del efecto del cambio climático en la inundación del tramo costero de la playa de la misericordia (Málaga): Análisis de los factores que contribuyen a la incertidumbre en la cota de inundación*. [tesis de maestría. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Cantabria. Santander]. Repositorio digital CEPAL.
- Budi, C. A., Wibisono, A. C., Saptarini, D., Permadi, R. I., Budisusanto, Y., & Hidayat H. (2020). Underwater Photogrammetry Application for Coral Reef Mapping and Monitoring. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*. 10(1). <https://bit.ly/3XdtkHJ>



- Bula-Meyer, G., (1977). Algas marinas bénticas indicadoras de un área afectada por aguas de surgencia frente a la costa Caribe de Colombia. *An. Inst. Inv. Mar. Punta Betín*, 9. 45–71. <https://bit.ly/4c7X8cS>
- Burns, J.H.R., Delparte D., Gates R.D. & Takabayashi, M. (2015). Integración de la fotogrametría de estructura a partir del movimiento con software geoespacial como una técnica novedosa para cuantificar las características ecológicas 3D de los arrecifes de coral. *PeerJ* 3. <https://bit.ly/3VeDFQT>
- Burt, J., Camp, E., Enochs, I., Johansen, J., Morgan, K., Riegl, B. & Hoey, A. (2020). Insights from extreme coral reefs in a changing world. *Coral Reefs*. 39. 495–507. <https://bit.ly/3Vxj9MK>
- CARICOMP. (2001). CARICOMP Methods manual levels 1 and 2: Manual of methods for mapping and monitoring of physical and biological parameters in the coastal zone of the Caribbean. Data Management Center, Univ. West Indies, Jamaica.
- Carpenter, R. (1986). Partitioning herbivory and its effects on coral reefs algal communities. *Ecological Monographs*. 56 (4): 345–363. <https://bit.ly/3ySIWqW>
- Capet X., J. C., McWilliams, M. J., Molemaker, & Shchepetkin, A. (2008). Mesoscale to Submesoscale Transition in the California Current System. Part I: Flow Structure, Eddy Flux, and Observational Tests. *Journal of Physical Oceanography*. 38. 29–43. <https://bit.ly/45j8VTE>
- Cendales, M.H., Zea, S. & Díaz, J. M. (2002). Geomorfología y unidades ecológicas del complejo de arrecifes de las Islas del Rosario e Isla Barú (Mar Caribe, Colombia). *Rev. Acad. Colomb. Cienc*, 26(101):497–510. <https://n9.cl/12pal5>
- Chaves-Fonnegra, A., Zea, S., & Gómez, M. L. (2007). Abundance of the excavating sponge *Cliona delitrix* in relation to sewage discharge at San Andrés Island, SW Caribbean, Colombia. *Bol. Invest. Mar. Cost.*, 36. 63-78. <https://n9.cl/t6z9g>
- Cheriton, O.M., Curt, D. S. & Kurt J. R. (2016). Observaciones de la transformación de las olas sobre un arrecife de coral y la importancia de las olas de baja frecuencia y los niveles de agua en alta mar para el ascenso, el sobrelavado y las inundaciones costeras. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 121 (5): 3121–3140. <https://n9.cl/u3pb1>
- Clark, J.R. (1996). Coastal zone handbook. Boca Raton: CRC Press, 720p.
- Coronado, M, C.A. (2005). *Influencia de los forzamientos ambientales en la hidrodinámica de la laguna arrecifal de Puerto Morelos, Q. Roo, México*. [tesis de Maestría en Ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE)].
- Correa, I. D., & Vernet, G. (2004). Introducción al problema de la erosión litoral en Urabá (sector Arboletes-Turbo) Costa Caribe Colombiana. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras (INVEMAR)*, 33. 7–28. <https://n9.cl/bx9quv>
- Correa-Rendón, J. D., Quan-Young, L. I., Parra-Velandia, F. J., Chaverra-Castañeda, F. A., Guzmán-Henao, S. E., & Andrade-Gamboa, D. B. (2015). Descripción de un nuevo ecosistema coralino en el Caribe sur: Bajos de la Punta Caribana (Colombia). Corporación para el Desarrollo Sostenible de Urabá (CORPOURABA).
- Daniel, I., Higgins Álvarez, A., Ayala Mantilla, C., Martínez Duarte, P., Tigreros Benavides, P. & Muñoz Vargas, A. (2015). Caracterización del régimen del viento y el oleaje en el litoral

- del departamento del Atlántico, Colombia. *Bol. Cient. CIOH*, 33: 231–244. <https://n9.cl/oqv6g>
- de Voogd, N.J., Cleary, D.F., Hoeksema, B.W., Noor, A., & Van Soest, R.W. (2006). Sponge beta diversity in the Spermonde Archipelago, SW Sulawesi, Indonesia. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 309. 131. <https://n9.cl/7uo7r>
- de Goeij, J.M., van Oevelen, D., Vermeij, M.J.A., Osinga, R., Middelburg, J.J., de Goeij, A., & Admiraal, W. (2013). Surviving in a marine desert: the sponge loop retains resources within coral reefs. *Science*. 342. 108-110. <https://n9.cl/b611b>
- Dekker, A., Malthus, T., Wijnen, M., & Seijnan, E. (1992). Remote sensing as a tool for assessing water quality in Loosdrecht lakes. *Hydrobiología*, 233. 137–159. <https://n9.cl/ixnhz>
- Deltares. (2021). Deltares systems - Wave User Manual. <https://n9.cl/3rpj8>
- Díaz, J. M., Cortés, M., Ramírez, G., & Blanco, J. A. (1994). El Banco de las Animas: Una amplia formación arrecifal desarrollada sobre un antiguo delta del Río Magdalena. *Boletín Ecológico*. 27(1): 27–28. <https://n9.cl/xrx5r>
- Díaz, J. M., Sánchez, J. A., & Díaz-Pulido. (1996). Geomorfología y formaciones arrecifales recientes del Isla Fuerte y Bajo Bushnell, Plataforma Continental del Caribe Colombiano. *Bol. Invest. Mar. Cost.* Santa Marta. 25: 87–105. <https://n9.cl/lsaqq>
- Díaz, J.M., Barrios, L. M., Cendales, M. H., Garzón-Ferreira, J., Geister, J., López-Victoria, M., Ospina, G. H., Parra-Velandia, F., Pinzón, J., Vargas-Angel, B., Zapata, F. A., & Zea, S. (2000). *Áreas coralinas de Colombia*. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras - INVEMAR, Serie Publicaciones Especiales No.5.
- Díaz, M. J. M., Díaz-Pulido, G., Garzón-Ferreira, J., Geister, J., Sánchez, J. A. & Zea, S. (1996). *Atlas de los arrecifes coralinos del Caribe Colombiano. I. Complejos arrecifales oceánicos*. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras-INVEMAR. Serie publicaciones especiales, N°2. Santa Marta, Colombia.
- Diaz, M. C., Álvarez, B. & R. Laughlin. (1990). The sponge fauna on a fringing coral reef in Venezuela. II. Community Structure En K. Rützler (ed.): New perspectives in sponge biology. *Smithsonian Institution Press*, Washington, D.C.
- Díaz, M. & Zea, S. (2008). Distribución de esponjas sobre la plataforma continental de la Guajira, Caribe Colombiano. *Bol. Invest. Mar. Cost.* Santa Marta. 37(2). 27–43. <https://n9.cl/y9o4co>
- Díaz-Pulido, G., J.A. Sánchez, S. Zea, J.M. Díaz, & J. Garzón. (2004). Esquemas de distribución espacial en la comunidad bentónica de arrecifes coralinos continentales y oceánicos del Caribe Colombiano. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 28 (108). 11. <https://n9.cl/4nb4l>
- Dirección General Marítima & Varios. (2016). Carta 412 Golfo de Urabá. Bogotá, Colombia: Dirección General Marítima. ISBN 978-958-5411-17-3.
- Domínguez, E. (2009). Modelación matemática: Una introducción al método. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá.
- Domínguez, J. G., Gómez, J. C., Ricaurte, C., Mayo, G., Orejarena, J., Díaz, J. M., & Andrade, C. A. (2010). Cobertura de los fondos y paisajes bentónicos asociados a formaciones diapíricas en los Bancos de Salmedina, plataforma continental del Caribe Colombiano. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras – INVEMAR*. 39(1). 117–135. <https://n9.cl/h451l>

- Duarte, C. & Kirkman, H. (2001). Methods for the measurement of seagrass abundance and depth distribution. En: F.T. Short y R. G. Coles (Eds) *Global Research Methods. Elsevier Science B.V. Ámsterdam*. <https://n9.cl/f08o3>
- Escobar, C. A. (2011). Relevancia de los procesos costeros en la hidrodinámica del Golfo de Urabá (Caribe Colombiano). *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*. 40(2). 101–120. <https://n9.cl/ft8yl>
- Escobar, C. A.; Velásquez, L., & Posada, F. (2015). Marine currents in the Gulf of Urabá, Colombian Caribbean Sea. *Journal of Coastal Research, Coconut Creek (Florida)*. 31(6). 1363–1374. <https://n9.cl/xym6t3>
- Environmental Systems Research Institute [ESRI]. (2011). ArcGis Desktop (Versión 10.8) [software]. ESRI
- Fajardo, O. J., & 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). 13–31. <https://doi.org/m2w9>
- Falter, J. L., Atkinson, M. J. & Merrifield, M. A. (2004). Mass-transfer limitation of nutrient uptake by a wave-dominated reef flat community. *Limnology and Oceanography*. 49(5). 1820–1831. <https://doi.org/bwn76f>
- Fernández-Salas, L.M., Sánchez Leal, R.F., Rueda, J.L., López-González, N., González-García, E., López-Rodríguez, F.J., Bruque, G., Vázquez, J.T., & Díaz-del-Río, V. (2012). Interacción entre las masas de agua, los relieves submarinos y la distribución de especies bentónicas en el talud continental del Golfo de Cádiz. *Geo-temas*. 13. 569–573. <https://n9.cl/ajnp6>
- Fell, P. E., Knight, P-A. & W. Rieders. (1989). Low salinity tolerance of and salinity-induced dormancy in the estuarine sponge *Microciona prolifera* (Ellis & Solander) under long-term laboratory culture. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 133. 195–211. <https://doi.org/bskz4s>
- Ferrario, F., Beck, M., Storlazzi, C., Micheli, F., Shepard, C., & Airoidi, L. (2014). La eficacia de los arrecifes de coral para la reducción y adaptación del riesgo de peligro costero. *Nat. Commun.* 5. <https://doi.org/f57kdk>
- Franklin, Gemma, Ismael Mariño-Tapia & Alec Torres-Freyermuth. (2013). Effects of reef roughness on wave setup and surf zone currents. *Journal of Coastal Research*. 165. 2005–2010. <https://n9.cl/3j2a0y>
- Frihy, O. E., El Ganaini, M. A., El Sayed, W. R., & Iskander, M. M. (2004). The role of fringing coral reef in beach protection of Hurghada, Gulf of Suez, Red Sea of Egypt. *Ecological Engineering*. 22(1):17–25. <https://doi.org/bvh8sc>
- Frith, C. A. & Mason, L. B. (1986). Modelling wind driven circulation, One Tree Reef, southern Great Barrier Reef. *Coral Reefs*, 4:201–211p.
- Gallego Bermúdez, I. (2021). *Análisis hidrodinámico del oleaje y el nivel del mar en la zona norte del Golfo de Urabá en condiciones actuales y en posibles escenarios de cambio climático* [tesis de pregrado Universidad de Antioquia]. Repositorio virtual Universidad de Antioquia.

- Garzón-Ferreira, J, Reyes-Nivia, M. & Rodríguez, A. (2002). Manual de métodos del SIMAC: Sistema de monitoreo de arrecifes coralinos en Colombia. *Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras - INVEMAR. Ministerio del medio ambiente*. <https://doi.org/m22j>
- Geister J. (1977). The influence of wave exposure on the ecological zonation of Caribbean coral reefs. In: Proceedings of the third international coral reef symposium. 1. 23–29.
- Geister J. (1983). Holozane westindische Korallenriffe: Geomorphologie, Ökologie und Fazies. *Facies*. 9. 173–284. <https://n9.cl/ez1d0>
- Gnecco, M., Maya, M., & Montoya–Maya, P. (2019). Producto 1: trasplante de colonias de *Acropora cervicornis* y *A. palmata* en áreas priorizadas, ensayo de microfragmentación y caracterización ecológica en San Andrés y Providencia – Reserva de Biosfera Seaflower. Documento técnico.
- Gordon, S., Aston, E., Lechene, M., Harianto, J., Bray, P., Figueira, W., Gonzalez Rivero, M., & Ferrari Legorreta, R. (2023). Field photogrammetry in 4D. Reef Restoration and Adaption Program (EcoRRAP). Standard Operational Procedure Number 1: Overview and in-field workflow. *Australian Institute of Marine Science, Townsville*. 62. <https://doi.org/m22p>
- González, H., Cossio, U., Maya, M., Vásquez, E. & Holguín, M. (1999). Geología del Departamento de Antioquia. *Instituto de Investigación e Información Geocientífica, Minero-Ambiental y Nuclear- INGEOMINAS*. Escala 1:400.000. <https://n9.cl/jw6r6>
- Gourlay, M. R. (1994). Wave transformation on a coral reef. *Coastal engineering*. 23(1-2), 17–42. <https://doi.org/fpkxxb>
- Green, E. P., Mumby, P. J., Edwards, A. J. & Clark, C. D. (1996). A review of remote sensing for the assessment and management of tropical coastal resources. *Coastal Management*. 24(1).1–40. <https://doi.org/cfz8zj>
- Griffies, S. et al. (2009). Problems and Prospects in Large-scale Ocean Circulation Models. *Ocean Obs*. 09. 30. <https://n9.cl/u3l4qc>
- Haffer, J. (1967). On the Geology of the Urabá and Northern Chocó regions, NW Colombia. Colombian Petroleum Company - COLPET. *Servicio Geológico Colombiano*.
- Hastenrath, S. (1990). Diagnóstico y predicción de río anómalo descarga en el norte de América del Sur. *Diario del Clima*. 3. 1080–1096.
- Hearn, C. J. (1999). Wave-breaking hydrodynamics within coral reef systems and the effect of changing relative sea level. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 104(C12). 30007–30019. <https://doi.org/ddn7zs>
- Hernández, P, O. (2008). Estudio tectónico estructural a partir del monitorio sísmico y anomalías de campo potenciales. Proyecto: Cartografía geológica y modelamiento estructural de las cuencas de Urabá y Sinú-San Jacinto partir de la interpretación de imágenes de sensores remotos y monitoreo sísmico. Informe final. Convenio interadministrativo. No. 070 de 2008. *Universidad Nacional de Colombia. Departamento de Geociencias. Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH)*.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., & Thépaut,

- J-N. (2023). Datos horarios de ERA5 sobre niveles individuales desde 1940 hasta el presente. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS).
- Hill, J. & C. Wilkinson. (2004). Methods for ecological monitoring of coral reefs. *Australian Institute of Marine Science*. Version 1. 123. <https://n9.cl/rxa129>
- Hoitink, A, J. F. (2003). *Physics of coral reef systems in a shallow tidal embayment*. [tesis de Doctorado, Faculty of Geographical Sciences, Utrecht University].
- Holthuijsen, L. H. (2007). *Waves In Oceanic and Costal Waters*. *Cambridge University Press*.
- Hooper, J. N. A. & Kennedy, J. A. (2002). Small-scale patterns of sponge biodiversity (Porifera) from the Sunshine Coast reefs, eastern Australia. *Invertebr. Syst.*16. 637–653. <https://doi.org/d44jbx>
- Hoyos, R, I. C., Florville, A, T. R., & Palacio, T, C. A. (2008). Caracterización del patrón de circulación de las bahías Sapzurro y Capurganá mediante la implementación de un modelo hidrodinámico en dos dimensiones. Universidad de Antioquia, Medellín. *Boletín Científico CIOH*. No. 26. 47–58. <https://doi.org/m22q>
- Ibarra, F, M. S. (2008). *Geomorfología y facies del sistema arrecifal de Punta Maroma, México*. [tesis de maestría Universidad Nacional Autónoma de México].
- International Busines Machine [IBM]. (2021). *SPSS (Versión 28.0) [software]*. IBM.
- IDEAM. (2023). Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. *Batimetrías*. <https://n9.cl/v14up>
- Ilan, M. & A. Abelson. (1995). The life of a sponge in a sandy lagoon. *Biol. Bull. Rev.* 189. 363–369. <https://doi.org/bt8m3d>
- Jaramillo, L. J. (2010). *Dinámica oceanográfica del Golfo de Urabá y su relación con los patrones de dispersión de contaminantes y sedimentos*. [tesis de doctorado, Universidad Nacional]. Repositorio Universidad Nacional.
- Kench, P. S., & Brander, R. W. (2006). Wave processes on coral reef flats: implications for reef geomorphology using Australian case studies. *Journal of Coastal Research*. 22(1). 209–223. <https://n9.cl/y6d4o>
- Kleypas, J. A. (1996). Coral reef development under naturally turbid conditions: fringing reefs near Broad Sound, Australia. *Coral Reefs*. 15. 153-167. <https://n9.cl/xdbuu>
- Kohler, K. E. & Gill, S. M. (2006). Coral Point Count with Excel extensions (CPCe): A Visual Basic program for the determination of coral and substrate coverage using random point count methodology. *Computers and Geosciences*. 32(9). 1259–1269. <https://doi.org/c6wf9v>
- Komen, G. J., Calaveri, I., M. Donelan, M., Hasselmann, K., Hasselman, S., & Janssen, P.A.E.M. (1994). Dynamics And Modelling of Ocean Waves. *Cambridge Univ. Press*. 532. <https://doi.org/ctr8wr>
- Lee, Z., Hu, C., Casey, B., Shang, S., Dierssen, H., & Arnone, R. (2010). Global Shallow-Water Bathymetry from Satellite Ocean Color Data. *AGU Advance Earth and Space Science*. 91. 429–430. <https://doi.org/df533j>

- Lonin, S., Adames, R., Payares Varela, J. L., & Marriaga, R. 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/m22t>
- López, M., Díaz, J. M., & Márquez, J. C. (2000). Las formaciones coralinas de Isla Tortuguilla (Caribe colombiano). *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras-INVEMAR*. (29). 51–58. <https://doi.org/m22v>
- López-Victoria, M., Rodríguez-Moreno, M., & Zapata, F. A. (2015). A paradoxical reef from Varadero, Cartagena Bay, Colombia. *Coral Reefs*. 34(1). 231. <https://n9.cl/tqcy8>
- Lowe, R. J., Falter, J. L., Bandet, M. D., Pawlak, G., Atkinson, M. J., Monismith, S. G., & Koseff, J. R. (2005). Spectral wave dissipation over a barrier reef. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 110(C4). 1–16. <https://n9.cl/cf7dq>
- Lubin, D., Dustan, P., Mazel, C. & Stamnes, K. (2001). Spectral signatures of coral reefs: features from space. *Remote Sens. Environ.*, 75(1):127–137p.
- Lugo-Fernández, A., Roberts, H. & Suhayda, J. (1998). Transformaciones de olas a través de un arrecife de coral de barrera de borde del Caribe. *Cont. Shelf Rev*. 18. 1099–1124. <https://doi.org/d4rh63>
- Maldonado-Sánchez, J., Mariño-Tapia, I., Herrera-Dorantes, M., & Ardisson, Pedro-Luis. (2019). Hydrodynamic conditions that favor the settlement of *Diadema antillarum* to a western Caribbean coral reef. *University of Miami - Rosenstiel School of Marine, Atmospheric & Earth Science. Bulletin of Marine Science*. 95(2). 251–264. <https://doi.org/m22w>
- Martínez, S. & Acosta, A. (2005). Cambio temporal en la estructura de la comunidad coralina del área de Santa Marta - Parque Nacional Natural Tayrona (Caribe Colombiano). *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*. 34. 161–191. <https://doi.org/m22x>
- Massel, S. R. (1999). Fluid Mechanics for Marine Ecologists. *Springer-Verlag. Springer Berlin, Heidelberg*.
- Matthew, Q. & Goodman, J. (2015). Linking Coral Reef Remote Sensing and Field Ecology: it's a matter of Scale? *J. Mar. Sci. Eng*. 3.1–20. <https://doi.org/gchnxb>
- McCook, L. (1999). Macroalgae, nutrients and phase shifts on coral reefs: Scientific issues and management consequences for the Great Barrier Reef. *Coral Reefs*. 18 (4). 357–367. <https://n9.cl/fuqx1>
- McCormick, M. E. (1981). Ocean Wave Energy Conversion. *Resource, Technologies and Performance*.
- McWilliams J. C. (1996). Modeling the Oceanic General Circulation. *Annual Reviews of Fluid Mechanics*. 28. 215–248. <https://doi.org/b2v79x>
- Molina Solano, A. P. (2021). *Caracterización del oleaje generado por el huracán Matthew (2016), frente a su paso por la península de La Guajira, usando datos de reanálisis*. [tesis de pregrado. Universidad del Norte. Área de Ciencias Básicas, Departamento de Física y Geociencias]. Repositorio Universidad del Norte.
- Montoya Maya, P. H. (2023). Técnicas para el levantamiento de fotomosaicos para el monitoreo ecológico de arrecifes coralinos. Buceo científico: Procedimiento y metodologías.

*Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales Colección Jorge Álvarez Lleras*. 45. 255–265. <https://n9.cl/0jqu66>

- Montoya, L. J., Toro-Botero, F. M., & Gómez-Giraldo, A. (2017). Study of Atrato river plume in a tropical estuary: Effects of the wind and tidal regime on the gulf of Urabá, Colombia. *Dyna Rev. Fac. Nac. Minas*. 84(200). 367–375. <https://doi.org/gg3wcx>
- Montoya, L.J. & Toro, M. (2006). Calibración de un modelo hidrodinámico para el estudio de los patrones de circulación en el Golfo de Urabá, Colombia. *Repositorio Universidad Nacional, Avances en Recursos Hidráulicos*. 13. 37–54. <https://n9.cl/dvts5k>
- Montoya, T. & Gómez-Giraldo. (2010). *Dinámica Oceanográfica del Golfo de Urabá y su Relación con los Patrones de Dispersión de Contaminantes y Sedimentos*. [tesis de posdoctorado. Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Universidad Nacional.
- Morelo-Muñoz, G., & Martínez-Castro, O. J. (2018). *Influencia de las características oceanográficas y sedimentológicas de la época húmeda sobre la distribución de micromoluscos bentónicos de Punta Caribana Nororiente del Golfo de Urabá (Necoclí, Colombia)*. [tesis de pregrado. Universidad de Antioquia. Corporación Académica Ambiental. Ciencias del Mar]. Repositorio Universidad de Antioquia.
- Moreno Navas, J., Telfer, T. C., & Ross, L. G. (2011). Application of 3D hydrodynamic and particle tracking models for better environmental management of finfish culture. *Continental Shelf Research*. 31(6). 675–684. <https://doi.org/d6t27k>
- Mumby, P., E. Green, A. Edwards & C. Clark. (1997). Coral reef habitat mapping: how much detail can remote sensing provide? *Marine Biology*. 130. 192–202. <https://n9.cl/ufr0b>
- Navas Camacho, R., Márquez, J. C. & Cortes Pineda, F. A. (2012). Capítulo 7: Arrecifes de coral. Manual de métodos de ecosistemas marinos y costeros con miras a establecer impactos ambientales. *Instituto de Investigaciones Marinas y Costera (INVEMAR) – Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH)*. 145–150.
- Naviosdeaviso. (2018). Ciencia oceanografía. *¿Qué es la batimetría y para que se utiliza?*. <https://n9.cl/d81ud>
- Nobles, C. A. (2023). *Descripción de las comunidades coralinas en el área de Bajo San Juan (San Juan de Urabá, Antioquia)*. [tesis de pregrado. Corporación Académica Ambiental. Universidad de Antioquia]. Repositorio Universidad de Antioquia.
- Obura, D.O., Aeby, G., Amornthammarong, N., Appeltans, W., Bax, N., & Bishop, J. (2019). Coral Reef Monitoring, Reef Assessment Technologies, and Ecosystem-Based Management. *Frontiers in Marine Science*. 6. <https://doi.org/gn5b7b>
- Oliveira S, M., Visentini K, M., Alves S, M.E., Bejarano, S., Fontenele R, E., & Silva C, I. C. (2022). The flourishing and vulnerabilities of zoantharians on Southwestern Atlantic reefs. *Marine Environmental Research*. 173. 10. <https://doi.org/m223>
- Reef Support. (2022). Open Coral AI. <https://n9.cl/cgv5z>
- Open University course team. (1989). Waves, Tides and Shallow-Water Processes. *The Open University*.
- Osorio A, A. F., Peláez-Zapata, D. S., Guerrero-Gallego, J., Álvarez- Silva, O., Osorio-Cano, J. D., Mauricio Toro, F., & Giraldo, A. (2013). Hidrodinámica aplicada a la gestión y la

conservación de ecosistemas marinos y costeros: Isla Gorgona, Océano Pacífico Colombiano. *Rev. Biol. Trop.* 62. 133–147. <https://n9.cl/90dia>

Osorio-Cano, J. D., Alcéraca-Huerta, J. C., Osorio, A. F. & Oumeraci, H. (2018). CFD modelling of wave damping over a fringing reef in the Colombian Caribbean. *Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature. Coral Reefs.* 37. 1093–1108. <https://n9.cl/gdflr>

Ospina-Hoyos, J. B., Palacio-Baena, J. A., & Vásquez-Bedoya, L. F. (2014). ¿Responden los micromoluscos a los cambios ambientales durante el Holoceno tardío en el sur del mar Caribe colombiano? *Universitas Scientiarum.* 19(3). 233–246. <https://doi.org/m3rk>

Padilla Álvarez, S. (2018). *Análisis espectral del oleaje en el Litoral Antioqueño por medio de modelación numérica.* [tesis de pregrado. Facultad de Ingeniería-Universidad de Antioquia].

Papanicolaou, A. N. T., Elhakeem, M., Krallis, G., Prakash, S., & Edinger, J. (2008). Sediment transport modellin review - current and future developments. *Journal of Hydraulic Engineering, (January).* 1–14. <https://doi.org/c23rsg>

Pandolfi, J. M. (2011). The Paleoecology of Coral Reefs. *Coral Reefs: An Ecosystem in Transition.* 13 – 24. <https://doi.org/cxhhj6>

Parra-Velandia, F. J., Hernández-Morales, A. F., Botero, H.G., Quiceno-Cuartas, P. A., Castellanos-Romero, C. M. & Andrade-Gamboa, D. B. (2017). Caracterización biológica de Punta Caribana: Hexanauplios, Decápodos, Isópodos, Estomatópodos, Peces, Equinodermos y Moluscos. *Corporación para el Desarrollo Sostenible de Urabá (CORPOURABA).* 34.

Parra-Velandia, F. & S. Zea. (2003). Comparación de la abundancia y distribución de algunas características de las esponjas del género *Ircinia* en dos localidades contraste del área de Santa Marta, Caribe colombiano. *Bol. Inv. Mar. Cost.* 32. 75–91. <https://doi.org/m3rn>

Palacio, C, A. M. & Zapata, F. A. (2023). *Comparación de tres métodos para el estudio de las comunidades bentónicas sésiles en arrecifes coralinos. Buceo científico: Procedimiento y metodologías.* Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales Colección Jorge Álvarez Lleras, N°45.

Pinilla A., G, Gutiérrez, Á & Ulloa, G. (2007). *Efectos ecológicos de la derivación de aguas y sedimentos hacia la Bahía de Barbacoas.* [monografía. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia). Repositorio de la Universidad Nacional.

Pinzón, J. H., Perdomo, A. M. & Díaz, J. M. (1998). Isla Arena, una formación coralina saludable en el área de influencia de la pluma del río Magdalena, plataforma continental del Caribe Colombiano. *Bol. Invest. Mar. Cost.* 27. 21–37. <https://doi.org/m3rp>

Pizarro, V., Rodríguez, S. C., López-Victoria, M., Zapata, F. A., Zea, S., Galindo-Martínez, C. T., Iglesias-Prieto, R., Pollock, J., & Medina, M. (2017). Unraveling the structure and composition of Varadero Reef, an improbable and imperiled coral reef in the Colombian Caribbean. *PeerJ.* 5. <https://doi.org/ggvscp>

Posada J., F. (2019). *Modelo hidrodinámico y de oleaje del Mar Caribe.* Universidad EAFIT. Área de Ciencias del Mar. [tesis de maestría. Escuela de ingeniería departamento de geología]. Repositorio Institucional Universidad EAFIT.



- Prahl, H. V., & Erhardt, H. (1985). *Colombia, Corales y Arrecifes coralinos*. Fondo Fen Colombia, Bogotá.
- Quintana, R., Higueta, M., Gutiérrez, L., & Toro, V. (2021). Evaluación de las principales características de la onda de marea al interior del golfo de Urabá. *Bol. Cient. CIOH*. 40(2). 35–46. <https://doi.org/m3rq>
- Rangel, N., & Idárraga, J. (2010). Geología General, Morfología Submarina y Facies Sedimentarias en el Margen Continental y los Fondos Oceánicos del Mar Caribe Colombiano. En: *Biodiversidad del margen continental del Caribe colombiano*. Serie de Publicaciones Especiales, Invemar.
- Raoult, V., David, P.A., Dupont, S.F., Mathewson, C.P, O'Neill, S.J, & Powell, N. N. (2016). GoPros as an underwater photogrammetry tool for citizen science. *PeerJ*. 4. <https://doi.org/gj9bmz>
- Rodríguez-Ramírez, A. & Garzón-Ferreira, J. (2003). Monitoreo de arrecifes coralinos, pastos marinos y manglares en la bahía de Chengue (Caribe colombiano):1993-1999. Santa Marta, Colombia. *INVEMAR, serie de Publicaciones especiales*. 8. 170. <https://doi.org/m3rr>
- Roelfsema, C. M. & Phinn, S. R. (2009). A Manual for Conducting Georeferenced Photo Transects Surveys to Assess the Benthos of Coral Reef and Seagrass Habitats version 3.0. *Centre for Remote Sensing and Spatial Information Science, School of Geography, Planning and Environmental Management. The University of Queensland, Brisbane, Australia*. 33. <https://n9.cl/8fsw2>
- Rogers, C.S., Garrison, G., Grober, R., Hillis, Z-M. & Franke, M. A. (1994). Coral reef monitoring manual for the Caribbean and Western Atlantic. *Virgin Islands National Park*. 120. <https://n9.cl/gld47>
- Rogers, Justin S., Stephen G.M., David A. K. & Robert B. D. (2016). Dinámica de ondas de un atolón del Pacífico con altos efectos de fricción. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 121 (1). 350–367. <https://n9.cl/9ijv8>
- Rossi, P., Castagnetti, C., Capra, A., Brooks, A.J, & Mancini, F. (2019). Detecting change in coral reef 3D structure using underwater photogrammetry: critical issues and performance metrics. *Applied Geomatics*. 12(S1). 3–17. <https://n9.cl/ox9qf>
- Ruidíaz-Ruidíaz, R, Quirós-Rodríguez, J. A, & Campos-Campos, N. H. (2021). Caracterización estructural de las formaciones coralinas en la región de San Antero, Córdoba, Caribe colombiano. *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.* 45(176). 709–720. <https://doi.org/m3rs>
- Sánchez, J. T. & Sipión, E. J. (2020). *Caracterización de los parámetros integrales del oleaje y de las corrientes en los bajos de Punta Caribana, Golfo de Urabá*. [tesis de pregrado. Universidad de Antioquia]. Repositorio Universidad de Antioquia.
- Santana Guzmán, M. (2021). *Caracterización de la energía del oleaje en Yucatán*. [tesis de maestría. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN Unidad Mérida]. Departamento de Recursos del Mar - Cinvestav.
- Sverdrup, H., & Munk, W. (1947). Wind, sea and swell: theory of relation for forecasting. H. O. *Publication 601. U. S. Naval Oceanographic Office*. 89. <https://doi.org/crkvkr>

- Schmahl, G. P. (1990). Community structure and ecology of sponges associated with four southern Florida coral reefs. En K. Rützler (ed.): *New perspectives in sponge biology*. Smithsonian Institution Press. 376–383.
- Sheppard, C. R. C., Davy, S. K., & Pilling, G. M. (2009). *The biology of coral reefs*. Oxford University Press, Oxford. 339. <https://doi.org/gg5mfz>
- Schuhmacher, H. (1982). Korallenriffe, ihre Verbreitung, Tierwelt un Ökologie. *Biologie in unserer Zeit*. 6. 274. <https://doi.org/bgfhx6>
- Sierra, L. (2018). *Estado actual de las unidades ecológicas de isla arena y caracterización de la comunidad arrecifal mediante el uso de imágenes aéreas*. [tesis de pregrado. Universidad Jorge Tadeo Lozano].
- Solano, O. (1994). Corales, formaciones arrecifales y blanqueamiento de 1987 en Bahía Portete (Guajira, Colombia). *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras – INVEMAR*. 23(1). 149–163. <https://doi.org/m3rt>
- Spalding, M., Ravilious, C. & Green, E.P. (2001). *World Atlas of Coral Reefs*. University of California Press, Berkeley.
- Symonds, G., Black, K. P. & Young, I. R. (1995). Wave-driven flow over shallow reefs. *J. Geophys. Res.* 100(C2). 2639–2648. <https://n9.cl/opi3v>
- Tassetti, A. N., Malaspina, S., & Fabi, G. (2015). Using a multibeam echosounder to monitor an artificial reef, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* 207–213. <https://doi.org/gcdd58>
- The Coral Reef Alliance (CORAL). (2003). Introduction to Coral Reef Ecosystems, Threats, and Solutions. *The Coral Reef Alliance: Coral Parks Program Education Series*. 6–21. <https://n9.cl/f3gox>
- Tolman, H. L. (1989). El modelo numérico WAVEWATCH: un tercero Modelo de generación para predicción retrospectiva de olas de viento sobre mareas en mares de plataforma. Delft, Países Bajos: *Universidad Tecnológica de Delft, Informe técnico*. 892. 72.
- Toro, V. G., Mosquera, W., Barrientos, N., & Bedoya, Y. (2019). Circulación oceánica del Golfo de Urabá usando campos de viento de alta resolución temporal. *Boletín Científico CIOH*. 38(2). 26–35. <https://doi.org/d3w5>
- Urriago, Juan Diego, Santodomingo, Nadiezhda, & Reyes, Javier. (2011). Formaciones coralinas de profundidad: Criterios biológicos para la conformación de áreas marinas protegidas del margen continental (100-300 m) en el Caribe colombiano. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras – INVEMAR*. 40(1). 89-113. <https://n9.cl/cu9a97>
- Valderrama, D. & Zea, S. (2003). Esquemas de distribución de esponjas arrecifales (Porifera) del Noroccidente del Golfo de Urabá, Caribe Sur, Colombia. *Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras*. 32. 37–56. <https://doi.org/m3rv>
- Vardi, T., Hoot, W. C., Levy, J., Shaver, E., Winters, R. S., & Banaszak, A.T. (2021). Six priorities to advance the science and practice of coral reef restoration worldwide. *Restoration Ecology*. 29(8). <https://doi.org/gnr57r>
- Warner, J. C., Sherwood, C. R., Signell, R. P., Harris, C. K., Arango, H. G., Harris, K., and Warner, C., Sherwood, C., Signell, R., Harris, C., Arango, H., Ackelson, S.G., Davis, R.E.,

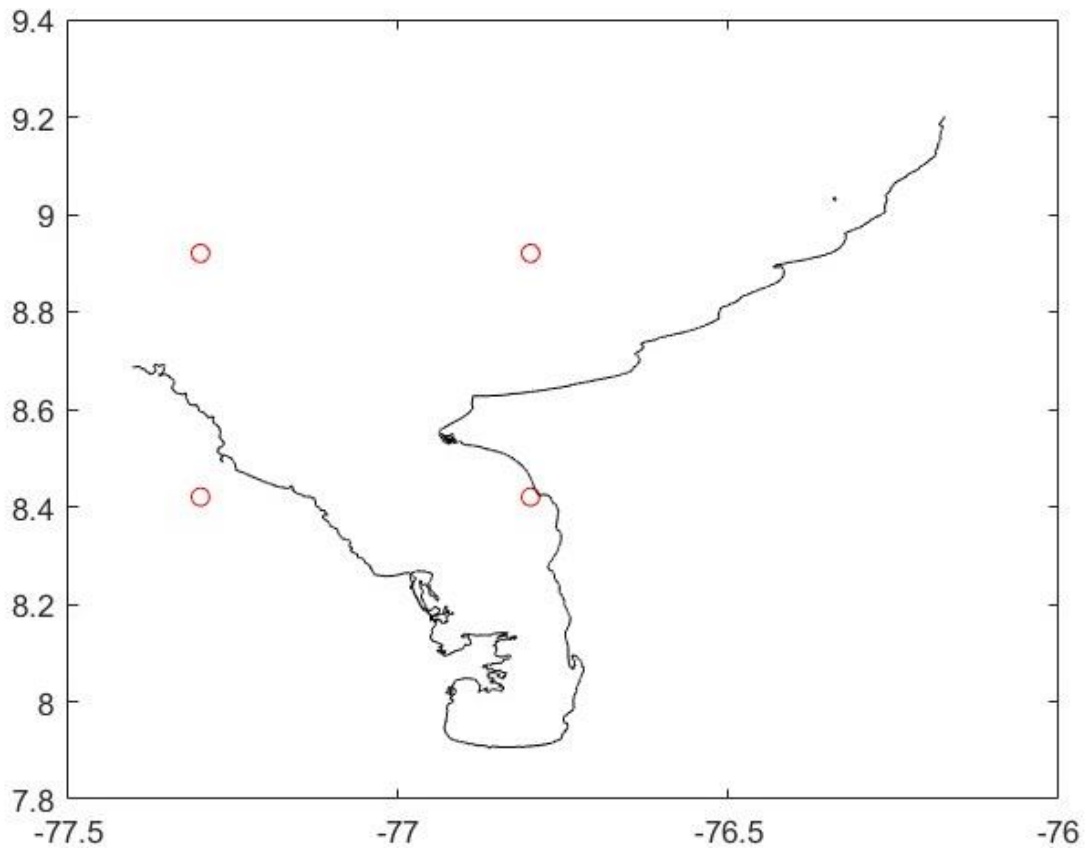
- Feddema, J.J., Klink, K.M., Legates, D.R., O'Donnell, J., & Rowe, C. (2008). Development of a three-dimensional, regional, coupled wave, current, and sediment transport model. *Computers & Geosciences*. 34(10). 1284–1306. <https://doi.org/fc6mz7>
- Wagner, D. E., Kramer, P. & Van Woelik, R. (2010). Species composition, habitat, and water quality influence coral bleaching in southern Florida. *Mar Ecol Prog Ser*. 408. 65–78. <https://doi.org/dfkfvw>
- WAVEWATCH III Development Group [WW3DG]. (2019): User manual and system documentation of WAVEWATCH III (*version 6.07*).
- Weiser, W. (1959). The Effect of grain size on the distribution of small invertebrates inhabiting the beaches of Puget Sound. *Limnol. Oceanogr*. 4. 181–191. <https://doi.org/czwfgm>
- Wells, S. (1988). *Coral reefs of the world*. Vol. 1: Atlantic and eastern Pacific. UNEP Regional seas Directories and Bibliographies, IUCN.
- Wolanski, E. (2001). *Oceanographic processes of coral reefs: physical and biological links in the Great Barrier Reef*. CRC Press.
- Wolanski, E. & Sarsenski, J. (1997). Larvae dispersion in coral reefs and mangroves. *American Scientist*. 85(3). 236–243. <https://doi.org/f7tmk2>
- Yang, D. y Yang, C. (2009). Detection of seagrass distribution changes from 1991 to 2006 in Xincum Bay, Hainan, with satellite remote sensing. *Sensors*. 9. 830–844. <https://doi.org/cjj6fk>
- Zarco-Perelló, S., Mascaró, M., Garza-Pérez, R. y Simoes, N. (2013). Topografía y comunidad coralina de los arrecifes de Sisal, Banco de Campeche, Yucatán, México. *Hidrobiológica*. 23(1). 28–41. <https://n9.cl/8s42c6>
- Zea, S. (1993). Cover of sponges and other sessile organisms in rocky and coral reef habitats of Santa Marta, Colombian Caribbean Sea. *Caribb. J. Sci*. 29 (1-2). 75–88. <https://n9.cl/v1715>
- Zea, S. (2001). Patterns of sponge (Porifera, Demospongiae) distribution in remote, oceanic reef complexes of the Southwestern Caribbean. *Rev. Acad. Colomb. Cienc*. 25 (97). 579–592.
- Zea, S., & Gómez-Lor, N. E. (2020). Caracterización de variables físicas en La Escollera, una laguna costera artificial en Santa Marta, Caribe colombiano. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*. 49 (2). 25–48. <https://doi.org/m3rx>

## Anexos

### Anexo 1. Imágenes utilizadas para la interpretación satelital de la plataforma

| Sensor    | Imagen satelital   |
|-----------|--|
| LANDSAT   | Composite_2020-10-30-00_00_2020-10-30-23_59_Landsat_8-9_L1_B04_(Raw) |
|           | Composite_2021-10-17-00_00_2021-10-17-23_59_Landsat_8-9_L1_B04_(Raw) |
|           | Composite_2020-10-08-00_00_2020-10-08-23_59_Sentinel-2_L2A_B04_(Raw) |
|           | Composite_2020-11-07-00_00_2020-11-07-23_59_Sentinel-2_L2A_B04_(Raw) |
|           | Composite_2020-12-02-00_00_2020-12-02-23_59_Sentinel-2_L2A_B04_(Raw) |
| SENTINELS | Composite_2021-08-19-00_00_2021-08-19-23_59_Sentinel-2_L2A_B04_(Raw) |
|           | Composite_2021-09-03-00_00_2021-09-03-23_59_Sentinel-2_L2A_B04_(Raw) |
|           | Composite_2021-11-27-00_00_2021-11-27-23_59_Sentinel-2_L2A_B04_(Raw) |
|           | Composite_2022-05-11-00_00_2022-05-11-23_59_Sentinel-2_L2A_B04_(Raw) |

### Anexo 2. Punto en la malla de ERA5 donde se descargaron los datos\*



### Anexo 3. Condiciones aplicadas en el módulo WAVE

| Condiciones          | Modo  |
|----------------------|---|
| Hydrodynamics        | off   |
| Grids/Bathymetry     | on  |
| Boundaries locations | Noreste, Norte, Noroeste  |
| Boundaries condition | TPAR  |
| Physical parameters  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Generation mode for physics: 3-rd generation</li> <li>- Non-linear triad interactions: off</li> <li>- Bottom friction: JONSWAP</li> <li>- Diffracton: on</li> <li>- Whitecapping: Komen et al.,</li> <li>- Refraction: on</li> </ul>               |
| Numerical parameters | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Geographical space: First order (SWAN 40.01)/Second order (SWAN 40.01)</li> <li>- Spectral space: Directional space 0.5 y Frequency space 0.5</li> <li>- Percentatge of wet grid point: 98%</li> <li>- Maximum number of iterations: 20</li> </ul> |
| Output curves        | off   |
| Output parameters    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Computational mode: Non-stationary</li> <li>- Output for computational grids: on</li> </ul>  |

### Anexo 4. Comparación de energía y diferencia de energía del oleaje modelada en ambos costados para los tres casos

