



**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**

Isabel Gallego Bermúdez

Trabajo de grado presentado para optar al título de Ingeniera Civil

Asesor

Carlos Alberto Palacio Tobón, Doctor (PhD)

Coasesor

Vladimir G. Toro Valencia, Doctor (PhD)

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Civil

Medellín, Antioquia, Colombia

2021

Cita	(Gallego, 2021)
Referencia	Gallego Bermúdez, I. (2021). <i>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</i> [Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Asesor: Carlos Alberto Palacio Tobón

Coasesor: Vladimir G. Toro Valencia

Coordinadora de prácticas Escuela Ambiental: Nora Elena Villegas Jiménez



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

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

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano/Director: Jesús Francisco Vargas Bonilla.

Jefe departamento: Diana Catalina Rodríguez Loiza.

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.

Agradecimientos

A toda mi familia, especialmente a mis padres y mis hermanos, por ser mi fuente de inspiración y apoyarme incondicionalmente en mis proyectos personales y académicos. Por inculcarme el amor al estudio, por celebrar conmigo la alegría de convertirme en ingeniera civil.

A Mariana, por creer en mí, por tantas noches en vela estudiando juntas, por motivarme y acompañarme de manera incansable en cada paso de mi carrera. Sus valiosos aportes fueron fundamentales para el desarrollo de este trabajo.

A mis asesores Carlos Palacio y Vladimir G. Toro, por su tiempo, sus enseñanzas, sus aportes y por darme la oportunidad de estudiar las maravillosas costas del Golfo de Urabá.

A José Manuel, por su paciencia, consejos y explicaciones que tanto me sirvieron.

A la Universidad de Antioquia por brindarme una formación integral y contribuir al cumplimiento de mis sueños académicos.

A los docentes de la Escuela Ambiental, que hicieron grandes aportes a mi formación profesional y motivaron mi interés hacia la investigación.

A cada una de las personas que de una u otra forma aportaron a la realización de este trabajo.

Contenido

1. Introducción.....	11
1.1. Algunos estudios hidrodinámicos y de cambio climático en el mundo	12
1.2. Estudios hidrodinámicos y de cambio climático en el Caribe colombiano.....	13
1.3. Influencia antrópica en las costas del Caribe colombiano.....	14
2. Objetivos.....	15
2.1. Objetivo general	15
2.2. Objetivos específicos.....	16
3. Marco teórico.....	16
3.1. Variables hidrodinámicas analizadas.....	16
3.2. Modelo utilizado: DELFT3D	16
3.2.1. Módulo Delft3D-FLOW.....	17
3.2.1. Módulo Delft3D-WAVE	19
4. Zona de estudio.....	19
4.1. Ubicación.....	20
4.1. Sistemas naturales relevantes y ecosistemas vulnerables.....	21
4.2. Descripción general de las características sociales y económicas de la zona	22
4.3. Intervenciones antrópicas representativas en la zona de estudio.....	22
5. Metodología.....	24
6. Descripción de datos utilizados	26
6.1. Batimetría	26
6.2. Parámetros integrales de oleaje	27
6.3. Datos Boya Akuará (CORPOURABÁ).....	28
6.4. Datos de nivel del mar.....	29
7. Análisis hidrodinámico de la zona de estudio	30
7.1. Análisis de nivel del mar	30
7.2. Análisis de oleaje.....	37
8. Calibración y validación del Delft3D.....	40
9. Selección de escenarios presentes y futuros	41
9.1. Selección de forzamientos de oleaje para escenarios presentes	42
9.2. Selección de forzamientos de nivel del mar para escenarios presentes y futuros	45
9.3. Resumen de escenarios propuestos.....	46
10. Resultados y análisis de escenarios propuestos.....	47

10.1. Resultados escenarios presentes	47
10.2. Resultados escenarios futuros.....	48
10.3. Comparación de escenarios presentes y futuros	49
10.4. Discusión de resultados	53
11. Conclusiones.....	54
12. Trabajo futuro	55
13. Bibliografía.....	56
14. Anexos	62
14.1. Anexo A. Nomenclatura de ecuaciones presentadas	62
Anexo B. Ecuaciones para la transformación de coordenadas	64
14.1. Anexo C. Ecuaciones de momento del módulo Delft3D-FLOW	65
14.2. Anexo D. Características de mareógrafos analizados	66
14.3. Anexo E. Localización de puntos de interés.....	67
14.1. Anexo E. Resultados de comparación de escenarios en la dirección ENE	68

Índice de figuras

Figura 1. Zona general de estudio (elaborada en Qgis). (a) Ubicación general del Golfo de Urabá en Colombia (b) Ubicación detallada del Golfo de Urabá con énfasis en la zona de estudio.....	20
Figura 2. Ubicación detallada de la zona de estudio seleccionada y área de modelación (elaborada en Qgis).....	21
Figura 3. Ecosistemas marinos, costeros y acuáticos de la zona de estudio según el Sistema de Información Ambiental de Colombia (elaborada en Qgis).....	21
Figura 4. Casco Urbano de Necoclí. Alcaldía de Necoclí (2021).	23
Figura 5. Municipio de Acandí. Peláez (2019).....	23
Figura 6. Metodología implementada para el desarrollo del presente trabajo.....	24
Figura 7. Batimetría de la zona de estudio (DIMAR). (a) Datos batimétricos disponibles. (b) Interpolación batimétrica realizada en Delft3D.....	26
Figura 8. Mapa de Hs (“hindcast”) en un instante de tiempo.....	27
Figura 9. Serie de Hs (“hindcast”) en un punto.....	27
Figura 10. Ubicación de la boya Akuará (CORPOURABÁ).	28
Figura 11. Series de Hs y Tp de boya Akuará (18/07/2015 - 01/06/2016). (a) Registro de Hs . (b) Registro de Tp	28
Figura 12. Ubicación de los mareógrafos de Cartagena, Sapzurro, Coveñas y Turbo.	29
Figura 13. Datos originales de los mareógrafos analizados.	29
Figura 14. Series de Nivel del Mar en los mareógrafos de Turbo, Cartagena, Sapzurro y Coveñas llevadas a un mismo nivel de referencia y en fechas coincidentes.....	31
Figura 15. Series de nivel del mar de los 4 mareógrafos analizados entre el 19 de diciembre de 2017 y el 5 de febrero de 2018.	32
Figura 16. Series de nivel del mar de los 4 mareógrafos analizados entre el 31 de diciembre de 2017 y el 1 de enero de 2018.	33
Figura 17. Ubicación del mareógrafo de Cartagena al interior de la bahía.	33
Figura 18. Punto anfidrómico del Caribe. Modificado de https://www.base-mag.com/explore/beyond-the-amphidrome (Thomson, 2020).....	34
Figura 19. Marea astronómica de Sapzurro reconstruida con armónicos y registro del nivel del mar del mareógrafo de Sapzurro.....	35
Figura 20. Marea meteorológica obtenida con el análisis de armónicos del mareógrafo de Sapzurro.....	35
Figura 21. Histograma de carreras de marea extraída de la serie de marea astronómica reconstruida para Sapzurro.	36
Figura 22. Mapas de Hs media. (a) Mapa de Hs media en dominio de “hindcast”. (b) Mapa de Hs media en el dominio del presente trabajo.....	37
Figura 23. Ubicación de puntos de interés sobre la batimetría de la zona de estudio.	39
Figura 24. Rosas de Hs en puntos de interés. (a) Rosa de Hs en punto de control número 8. (d) Rosa de Hs en punto de control número 9. (g) Rosa de Hs en punto de control número 10. (b) Rosa de Hs en punto de control número 5. (e) Rosa de Hs en el punto de control número 6. (h) Rosa de Hs en el punto de control número 7. (c) Rosa de Hs en el punto de control número 2. (f) Rosa de Hs en el punto de control número 3. (i) Rosa de Hs en el punto de control número 1, cuya localización coincide con la ubicación de la boya Akuará (CORPOURABÁ). (j) Rosa de Hs en el punto de control número 4.....	39

Figura 25. Resultados Delft3D vs hindcast. (a) Punto 1 (Akuará). (b) Punto 2. (c) Punto 3. (d) Punto 4. (e) Punto 5. (f) Punto 6. (g) Punto 7. (h) Punto 8. (i) Punto 9. (j) Punto 10.	41
Figura 26. Régimen extremal de Hs realizado con base en el método POT (Peak Over Threshold).....	44
Figura 27. Scatter Plot de Hs vs. Tp en el punto de forzamiento.	45
Figura 28. Régimen extremal de marea meteorológica (MM).	46
Figura 29. Resultados de Hs tras modelado numérico en Delft3D de escenarios presentes propuestos. (a) Resultados escenario A. (b) Resultados escenario E. (c) Resultados de escenario B. (d) Resultados escenario F.	47
Figura 30. Resultados de Hs tras modelado numérico en Delft3D de escenarios futuros propuestos. (a) Resultados de escenario C. (b) Resultados de escenario D. (c) Resultados de escenario G.	49
Figura 31. Razón entre Hs de escenarios evaluados y Hs de escenario presente en condiciones medias. (a) Razón entre Hs escenario B y Hs escenario A. (b) Razón Hs escenario D y Hs escenario A. (c) Razón Hs escenario F y Hs escenario E. (d) Razón Hs escenario G y Hs escenario E.	50

Lista de tablas

Tabla 1. Armónicos predominantes de la marea astronómica extraída del mareógrafo de Sapzurro.....	36
Tabla 2. Estadísticos básicos de Hs por dirección.	42
Tabla 3. Tabla resumen de escenarios propuestos.....	47
Tabla 4. Razón entre Hs de escenarios estacionarios (NE) evaluados y Hs de escenario estacionario presente (NE) en condiciones medias, para los 10 puntos de control seleccionados.....	52
Tabla 5. Diferencia entre dirección del oleaje en escenarios (NE) evaluados y dirección del oleaje en el escenario presente (NE) de condiciones medias, para los 10 puntos de control seleccionados.....	52
Tabla 6. Nomenclatura de ecuaciones presentadas	62
Tabla 7. Características de los mareógrafos analizados.	66
Tabla 8. Localización geográfica de puntos de interés.....	67
Tabla 9. Razón entre Hs de escenarios estacionarios (ENE) evaluados y Hs de escenario estacionario presente (ENE) en condiciones medias, para los 10 puntos de control seleccionados.....	68
Tabla 10. Diferencia entre dirección del oleaje en escenarios (ENE) evaluados y dirección del oleaje en el escenario presente (ENE) de condiciones medias, para los 10 puntos de control seleccionados.....	68

Resumen

Las zonas litorales son tal vez los lugares más sensibles a nivel mundial ante el cambio climático. El presente trabajo busca avanzar en el entendimiento del comportamiento de las algunas variables hidrodinámicas del Golfo de Urabá tales como nivel del mar, altura de ola significativa y dirección del oleaje, ante posibles escenarios de cambio climático. Se seleccionó el Golfo de Urabá, pues de acuerdo con la literatura revisada esta zona es de interés para el país por su valor ecosistémico, social, económico y por las fuertes presiones antrópicas a las que se encuentra sometida.

Para entender la hidrodinámica actual de la zona de estudio y construir posibles escenarios presentes y futuros se realizaron análisis estadísticos de 8 años de datos de oleaje provenientes de parámetros integrales de oleaje modelados con SWAN implementado a nivel regional (datos de “*hindcast*”). Adicionalmente, para analizar el comportamiento del nivel del mar en la zona de estudio se compararon los registros de 4 mareógrafos distribuidos en el Caribe colombiano (Cartagena, Coveñas, Sapzurro y Turbo). Para la definición de escenarios se procesó la información del mareógrafo de Sapzurro y se tuvo en cuenta una proyección de aumento de 3.6 mm/ año, esperada para el Caribe según la literatura. Para analizar las posibles variaciones en los patrones hidrodinámicos de la zona de estudio se utilizó el acople de los módulos WAVE y FLOW del modelo numérico Delft3D para modelar 4 escenarios representativos del presente y 3 escenarios futuros propuesto, los cuales posteriormente fueron analizados y comparados.

A través del análisis estadístico del “*hindcast*” se encontró que la dirección reinante del oleaje que llega al Golfo de Urabá es la dirección Noreste, con una probabilidad de ocurrencia del 52%. Por su parte, en todos los escenarios modelados se encuentran variaciones en el comportamiento del oleaje en términos de altura de ola significativa y dirección, siendo Acandí el lugar de la zona de estudio que experimenta las mayores alturas de ola significativa, mientras que la zona Sur de Necoclí se encuentra protegida de los oleajes más típicos (**NE** y **ENE**). También se encontró que la dirección **ENE** es la que puede generar mayores incrementos en la altura de ola significativa bajo los escenarios futuros planteados, afectando principalmente la zona Sur de Necoclí. En el análisis del nivel del mar se identificaron deformaciones singulares en el registro del mareógrafo de Turbo que no se dan en los demás instrumentos de medición analizados, por lo cual sería una línea interesante de trabajo futuro. Los aumentos de ***H_s*** y los cambios direccionales encontrados podrían propiciar aumento del potencial erosivo, riesgo de inundación costera y alteraciones morfodinámicas y ecosistémicas que se podrían estudiar con base en los resultados obtenidos en el presente trabajo.

Palabras clave: hidrodinámica costera; cambio climático; Golfo de Urabá; Caribe Colombiano; Delft3D.

Abstract

Coastal areas are perhaps the most sensitive places in the world in the face of climate change. The present work seeks to advance in the understanding of the behavior of some hydrodynamic variables of the Golfo de Urabá such as sea level, significant wave height and wave direction, in the face of possible climate change scenarios. The Golfo de Urabá was selected, because according to the literature reviewed, this area is of interest to the country due to its ecosystem, social and economic value and due to the strong anthropic pressures to which it is subjected.

To understand the current hydrodynamics of the study area and to construct possible present and future scenarios, statistical analyzes of 8 years of wave data were carried out from integral wave parameters modeled with SWAN implemented at the regional level (hindcast data). Additionally, to analyze the behavior of the sea level in the study area, the records of 4 tide gauges distributed in the Colombian Caribbean (Cartagena, Coveñas, Sapzurro and Turbo) were compared. For the definition of scenarios, the information from Sapzurro tide gauge was processed and a projection of increase of 3.6 mm / year was considered, expected for the Caribbean according to the literature. To analyze the possible variations in the hydrodynamic patterns of the study area, the coupling of the WAVE and FLOW modules of the Delft3D numerical model was used to model 4 representative scenarios of the present and 3 proposed future scenarios, which were subsequently analyzed and compared.

Through the statistical analysis of hindcast, it was found that the prevailing direction of the waves reaching the Golfo de Urabá is the Northeast direction, with a probability of occurrence of 52%. On the other hand, in all the modeled scenarios were found variations in the behavior of the waves in terms of significant wave height and direction. Acandí was the place in the study area that experiences the highest significant wave heights in the evaluated scenarios, while the South area de Necoclí is protected from the most typical waves (**NE** and **ENE**). It was also found that the **ENE** direction is the one that can generate the greatest increases in significant wave height under the future scenarios proposed, mainly affecting the southern area of Necoclí. In the sea level analysis, singular deformations were identified in the record of the Turbo tide gauge that do not occur in the other measurement instruments analyzed, which is why it would be an interesting line of future work. The increases in *H_s* and the directional changes found could lead to an increase in the erosive potential, risk of coastal flooding and morphodynamic and ecosystem alterations which could be studied based on the results obtained in this work.

Keywords: coastal hydrodynamics; climate change; Golfo de Urabá; Colombian Caribbean; Delft3D.

1. Introducción

En décadas recientes, las fluctuaciones en el clima han provocado alteraciones en ecosistemas naturales, tanto en territorios continentales como en zonas costeras. Los sistemas naturales se han visto altamente impactados y esto denota su vulnerabilidad ante la variabilidad del clima (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2014). En el caso particular del océano y sus ecosistemas, los investigadores concuerdan ampliamente que se han generado importantes impactos debido al cambio climático (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC WGII], 2014). Además, en el océano se dan las mayores tasas de absorción de carbono y liberación de oxígeno, lo cual es un aspecto fundamental para las dinámicas climáticas mundiales (Martín, Rivera, & Castizo, 2018).

En el océano se encuentran ecosistemas de magnitudes significativas, formas variadas en la superficie del fondo marino y una gama amplia de especies acuáticas (IPCC WGII, 2014). Colombia tiene el privilegio de contar con dos mares (como pocos países del mundo), con el Mar Caribe en el norte y el Océano Pacífico en el occidente. Casi la mitad del territorio colombiano (45%) corresponde a ecosistemas marinos. La cuenca del Caribe representa el 61.9% (2582 kilómetros) de la línea de costa del país, y cuenta con 29 municipios costeros y 8 departamentos que representan el 25% de los departamentos de Colombia (Comisión Colombiana del Océano [CCO], 2015). Es así como el Caribe no sólo es una de las regiones más vastas de Colombia, sino que allí se localizan ecosistemas de valor tales como arrecifes de coral, pastos marinos, litorales rocosos y manglares, sitios que son cuna de la mayoría de especies propias de mares tropicales (Díaz, 2014).

Estudios sobre América Latina y el Caribe han mostrado que el Mar Caribe se verá afectado por impactos físicos y biofísicos en ecosistemas como los arrecifes de coral (Reyer, *et al.*, 2015). En el caso particular de Colombia, la línea de costa del Caribe cuenta con diferentes tipos de geoformas y dinámicas sociales y económicas, que tendrán una respuesta regional diferente ante escenarios de cambio en el nivel del mar. Se han identificado en el Caribe colombiano, zonas críticas como los golfos de Urabá y Morrosquillo y la barra de Salamanca (Ciénaga de Santa Marta). En estos y otros lugares es necesario entender su comportamiento particular con el fin de proponer soluciones al corto, mediano y largo plazo, con argumentos científicos (CORANTIOQUIA, 2008).

Una de las variables que determina el comportamiento del océano y las zonas litorales es la hidrodinámica. Esta puede ser entendida con herramientas como la modelación numérica, pues con los modelos es posible proponer escenarios que permitan estudiar los cambios hidrodinámicos en una zona con intervenciones antrópicas, incorporando proyecciones de cambio climático. Como primera etapa para llevar a cabo el estudio, se seleccionó una zona específica del Golfo de Urabá, la cual tiene dinámicas particulares. Se espera utilizar herramientas de modelación numérica para reproducir y analizar la hidrodinámica actual del área de estudio. Posteriormente, se proyectarán posibles escenarios de cambio climático a partir de una base actual de referencia, previamente modelada, con fines de validación y calibración de la herramienta numérica. Los resultados de la condición presente y las proyecciones serán comparados con el fin de identificar los posibles cambios hidrodinámicos más relevantes y las posibles zonas afectadas.

1.1. Algunos estudios hidrodinámicos y de cambio climático en el mundo

El cambio climático y su influencia en la hidrodinámica costera se ha convertido en materia de interés en todo el mundo. Por ejemplo, en España se desarrolló una metodología novedosa que utiliza modelación numérica para estudiar la inundación costera a escala regional debida al cambio climático. Esta metodología se utilizó en un caso específico de Asturias (norte de España) y permitió obtener resultados valiosos y de buena resolución (Toimil, Losada, & Camus, 2016). En Sevilla se realizó un análisis hidrodinámico del estuario del río Piedras (suroeste de España) utilizando el modelo DELFT3D. En este lugar hay una amplia flecha litoral en donde se analizaron dos escenarios: con y sin dragado, logrando obtener buenas correlaciones para niveles y velocidades (Aguilar, 2016).

También en España, se llevó a cabo una revisión del estado del arte de la modelación numérica en aplicaciones de cambio climático, enfatizando en factores importantes para la Península Ibérica (Gutiérrez & Pons, 2006). En otro estudio, analizó si las proyecciones climáticas proporcionadas por la Agencia Estatal Meteorológica Española (AEMET) son apropiadas para estudios de cambio climático, encontrando buenos resultados para valores medios anuales de precipitación, más no para valores máximos anuales (Garijo, Mediero, & Garrote, 2018). En el sector Nororiental del Océano Atlántico, cerca a las costas de España, se utilizaron 3 modelos numéricos (IBMED12, 2D HAMSOM y WAM) para plantear escenarios de cambio climático y analizar los principales cambios en variables como temperatura y salinidad superficiales, nivel del mar y oleaje (Gomis, et al., 2016).

En Reino Unido, se analizó la respuesta morfodinámica de un estuario mesomareal sometido a tres escenarios de aumento del nivel mar (Yin, Karunarathna, & Reeve, 2019). Por su parte, en Estados Unidos, se realizó una investigación para compilar información acerca de las consecuencias del aumento del nivel del mar en zonas costeras escenarios futuros de cambio climático. Los resultados mostraron como los cambios históricos del nivel del mar afectan la morfología de las playas y (Williams, 2013). En dos bahías tropicales poco profundas del Caribe se estudió el efecto del aumento del nivel del mar (ANM) en un sistema coralino. Se estudiaron tres escenarios, y se analizó el potencial de los ecosistemas para mitigar los efectos del ANM (Keyzer, et al., 2020).

En Suramérica, también se han realizado estudios hidrodinámicos en zonas costeras por medio de la modelación numérica. Un trabajo realizado en Guayaquil da cuenta del uso del DELFT3D para modelar diferentes escenarios de inundación en la costa ecuatoriana, en dichos escenarios se tuvieron en cuenta aspectos como marea máxima, nivel del mar, cambio climático, fenómeno El Niño y “run-up” de una ola extrema. Los resultados permitieron identificar la necesidad de construir diques y canales de protección en toda la extensión de un puerto espacial que se proyecta construir en el lugar (Iñiguez, 2019). En 2018, se modeló con DELFT3D el Golfo de Guayaquil bajo dos escenarios: un año en condiciones normales (2014) y un año con evento El Niño (2015-16), se analizó un mes húmedo (abril) y un mes seco (junio) para cada año. Se encontró que, tanto en abril como en junio del año Niño, las mareas fueron mayores comparadas con el año de condiciones normales, la misma tendencia se encontró para las velocidades de corriente (Espinoza, 2018). Por otro lado, en el estuario del río Guayas, en Ecuador, se utilizó el modelo numérico DELFT3D para realizar un análisis de la evolución morfológica de la zona bajo 5 escenarios que consideraban aspectos como sedimentación, intervenciones antrópicas y deforestación de manglares (Barrera, 2016).

También en Ecuador, en la provincia de Chimborazo, se llevó a cabo un estudio de proyección de cambio climático para el año 2050, comparando los resultados futuros con el escenario actual (Bustamante, 2017).

A continuación se presentan antecedentes específicos de estudios realizados en el Caribe colombiano, los cuales son de especial interés para el presente trabajo.

1.2. Estudios hidrodinámicos y de cambio climático en el Caribe colombiano

En el Caribe colombiano hay diversos precedentes de estudios hidrodinámicos y de cambio climático, tales como el estudio del campo de corrientes en el Golfo de Urabá para escalas temporales que van desde las intermareales hasta las estacionales, por medio de modelación numérica (Escobar & Velásquez, 2015). En dicho estudio se utilizaron forzadores provenientes de modelos globales y de datos tomados a través de una estación de medición móvil, encontrando complejas dinámicas en las corrientes. Otra investigación fue realizada en la Guajira a través del modelo DELFT3D. Los resultados muestran la existencia de fuerzas hidrodinámicas extremas en la zona de estudio (Rueda, Osorio, & Guzmán, 2019).

Adicionalmente, por medio de la modelación numérica con ROMS (Regional Ocean Modeling System) se estudió la influencia de la onda de marea en las corrientes del Golfo de Urabá (Higuita & Quintana, 2020). En la misma zona se llevó a cabo una investigación que presentó una metodología de calibración del modelo matemático ELCOM y analizó los patrones de circulación oceánica en el Golfo de Urabá, encontrando que la dirección del viento es un factor determinante en la dinámica de la pluma del río Atrato (Montoya & Toro, 2006). De otro lado, se analizó el efecto de diferentes procesos costeros en el Golfo de Urabá, utilizando el modelo DELFT3D y considerando aspectos como oleaje, arrastre del viento, influencia fluvial a través de la descarga del río Atrato y la estratificación termo-salina (Escobar, 2011).

Recientemente se realizó una investigación enfocada en el estudio y modelación de la dinámica de sedimentos en el Golfo de Urabá, tanto en temporada de lluvias como en la estación seca (Escobar & Velásquez, 2018). En este estudio, se evidenciaron complejos patrones de flujo tridimensional en la zona y la falta de datos *in situ*. Sin embargo, los resultados del modelo fueron validados con mediciones en campo e imágenes satelitales. Adicionalmente se realizó un estudio que se centró en analizar la modulación que producen la variación estacional y espacial de los campos de viento sobre corrientes oceánicas a escala intra e interanual en el Golfo de Urabá. Para dicho propósito se utilizó el modelo de circulación oceánica ROMS-CROCO y los resultados del estudio fueron un aporte al conocimiento de la hidrodinámica del Golfo de Urabá (Toro, Mosquera, Barrientos, & Bedoya, 2019).

Por su parte, en el 2018 la Universidad de Antioquia presentó los resultados del proyecto “*Investigación para reversión del proceso de erosión en las costas del mar de Antioquia*”, financiado por la Gobernación de Antioquia, donde a través de modelos numéricos y medición de variables con instrumentos oceanográficos se analizaron seis sitios del litoral antioqueño con evidencias de erosión avanzada: volcán de lodo y río Hobo (municipio de Arboletes), Uveros y Damaquiel (municipio de San Juan de Urabá), Zapata (municipio de Necoclí) y punta Las Vacas (municipio de Turbo) (Universidad de Antioquia y Gobernación de Antioquia, 2018).

El modelo WAVEWATCHIII (WWIII) también ha sido utilizado en estudios del Caribe colombiano. Padilla (2018) analizó 10 años de oleaje en el Golfo de Urabá, haciendo uso de mallas anidadas y Orejuela (2020) lo empleó para analizar la modulación del oleaje causada por obras de protección en la costa de Arboletes, utilizando mallas no estructuradas. Otros estudios que usaron el WWIII fueron realizados por Osorio, Mesa, Bernal, & Montoya (2009), que reprodujeron 40 años de altura de ola significativa y período de pico en el Caribe colombiano, mejorando los resultados a partir de datos de diferentes fuentes; y por Sánchez & Sipi6n (2020) con el fin de caracterizar los parámetros integrales del oleaje (altura de ola significativa, período de pico y direcci6n). En este caso también se utilizaron datos modelados con ROMS y provenientes del sistema de monitoreo Copernicus y el reanálisis Era-Interim.

En Bocagrande, Cartagena se analizaron los impactos del aumento del nivel del mar de acuerdo a un escenario moderado de cambio climático (RCP4.5), utilizando el modelo numérico SWASH, encontrando que en el año 2100 el 97.2% del área analizada se podría ver afectada por inundaciones (Orejarena, *et al.*, 2019). El nivel medio del mar (NMM) en el Caribe colombiano entre 1993 y 2016 fue objeto de una investigación, en la que se utilizó informaci6n de la base de datos AVISO. Entre las zonas analizadas se identificó la mayor tasa de aumento del NMM en el Golfo de Urabá (19.4mm/año) (Londoño & Murillo, 2017). Los ecosistemas presentes en el Caribe colombiano también han sido estudiados, tal es el caso de una investigación que implementó modelaci6n numérica para analizar la disipaci6n de oleaje en los arrecifes de coral y su respuesta ante escenarios de aumento de nivel del mar y eventos extremos (Osorio, Osorio, & Péláez, 2017). Asimismo, se realizó un estudio para el análisis de corrientes, oleaje y sedimentos que buscaba determinar cómo se puede ver afectada la distribuci6n de micro gasterópodos bent6nicos en los bajos de Punta Caribaná en Necoclí (Morelo & Martínez, 2018).

1.3. Influencia antrópica en las costas del Caribe colombiano

Las costas del Caribe colombiano no solo se ven influenciadas por causas naturales sino también por la acci6n antrópica. Las amenazas y riesgos varían mucho en las diferentes costas de Colombia, sin embargo, se ha encontrado que el Caribe colombiano es más vulnerable ante la influencia antrópica que el Pacífico (Lacambra, Lozano, Alonso, & Fontalvo, 2003). Avella, *et al.* (2009) también afirman que las características del Caribe hacen que sea especialmente vulnerable a las acciones antrópicas tales como contaminaci6n marina, intervenciones civiles que no tienen en cuenta de forma apropiada las dinámicas litorales, entre otras acciones humanas que no solo causan impactos ambientales, sino que perjudican la calidad de vida de las comunidades costeras.

Las altas tasas de erosi6n costera son uno de los problemas a los que se enfrenta el Caribe colombiano. Un ejemplo de ello son los problemas erosivos en el litoral de Arboletes, que han sido propiciados por amenazas como el oleaje y las malas propiedades geotécnicas de las rocas, así como por la inadecuada gesti6n de recursos hídricos, extracci6n de arena de la costa y procedimientos ingenieriles inapropiados (Correa & Paniagua, 2015). Estos inconvenientes en las costas del Caribe, y otros similares en las del Pacífico, propiciaron la propuesta del Plan Maestro de Erosi6n Costera en Colombia, en el cual se resalta la importancia de implementar planes de mitigaci6n y reducci6n de la erosi6n, teniendo en cuenta la interacci6n inherente entre los seres humanos y la naturaleza (Arcadis Nederland BV, *et al.*, 2017).

En el Caribe colombiano se han utilizado diferentes metodologías para estudiar los impactos antrópicos en el litoral. Por ejemplo, en San Andrés se llevó a cabo una investigación sobre amenazas en ecosistemas de playa, esta se basó en la percepción del riesgo de una población encuestada. Los resultados apuntan a que el aspecto turístico aumenta los impactos antrópicos en la costa y afecta los servicios ecosistémicos marinos (Guerra & Mancera, 2015). Otro estudio aplicó un índice de huella humana para analizar los cambios espacio-temporales del impacto antrópico en Colombia, identificando el Caribe como una de las regiones con mayores presiones (Correa, et al., 2020). Por su parte, otra investigación presentó algunas transformaciones geomorfológicas en varias costas del Caribe colombiano a través del análisis de fotografías aéreas. Allí se destaca cómo la construcción empírica de obras de protección costera causa modificaciones en la morfología y acrecienta los procesos erosivos (Rangel, 2009).

La influencia antrópica en los ecosistemas del Caribe colombiano también ha sido estudiada, en particular los bosques de manglar han sido el centro de diferentes pesquisas. En Puerto Colombia, Barranquilla, se realizó una investigación para determinar el impacto de diferentes actividades antrópicas sobre el bosque de manglar. Se tuvieron en cuenta intervenciones como la construcción de infraestructuras viales, costeras y turísticas, y la tala excesiva. Estas actividades generaron perturbación del ciclo hidrológico y aumento de procesos erosivos en la zona, afectando directamente los manglares (Sánchez, Bolívar, Villate, & Escobar, 2019). Este ecosistema también fue analizado en Cartagena, encontrando que los asentamientos antrópicos en la zona estudiada no solo afectaron los manglares, sino que también se generaron otros problemas entre los que se destacan las alteraciones paisajísticas, la contaminación del suelo y del recurso hídrico, la modificación de los usos del suelo y la afectación de la biodiversidad (Vélez de López, 2011).

El Golfo de Urabá tiene características que lo hacen una zona especial para el país, pues no solo se trata de un estuario con un alto valor ecológico, sino que es el golfo con mayor área sobre el Caribe colombiano (Jaramillo, Panorama de la erosión costera en el Golfo de Urabá. Evidencia de la necesidad de un programa de monitoreo costero regional, 2016), lo cual ha motivado la investigación de impactos antrópicos en la zona. Por ejemplo, la erosión litoral en Urabá fue el foco de estudio de otra investigación de Correa & Vernet (2004), en la cual se determinó que las intervenciones antrópicas, incluso obras ingenieriles inadecuadas, aceleran los procesos erosivos naturales. Esto al parecer estimuló la pérdida de territorio litoral y demostró la importancia de utilizar acciones de control y mitigación de los procesos erosivos. También en el Golfo de Urabá, específicamente en el sector río Hobo – Puerto Rey, se estudiaron aspectos como el oleaje, la hidrodinámica y el transporte de sedimentos bajo diferentes escenarios, entre los cuales se incluyó un caso de análisis asociado a la propuesta de una obra costera (Ruiz, 2020).

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Analizar las variaciones del oleaje y el nivel del mar en la zona norte del Golfo de Urabá en condiciones actuales y ante posibles escenarios de cambio climático mediante modelación numérica.

2.2. Objetivos específicos

1. Caracterizar la hidrodinámica actual de la zona norte del Golfo de Urabá utilizando datos medidos in situ, la aplicación de modelos numéricos y datos de hindcast.
2. Caracterizar la posible hidrodinámica de la zona norte del Golfo de Urabá ante uno o varios escenarios de cambio climático por medio de modelación numérica.
3. Comparar los patrones hidrodinámicos actuales y futuros de la zona de estudio, y analizar las consecuencias potenciales.

3. Marco teórico

3.1. Variables hidrodinámicas analizadas

La hidrodinámica es la rama de la mecánica de fluidos que analiza el movimiento del agua y las interacciones de esta con sus contornos (McGraw-Hill, 2003). Las variables hidrodinámicas que se estudiarán en el presente trabajo son el nivel del mar y el oleaje. A continuación, se definirán estos conceptos y otros derivados de ellos, tales como marea astronómica y meteorológica, y nivel medio del mar.

El nivel del mar en cualquier instante y en una ubicación particular está afectado por la marea astronómica y meteorológica y el nivel medio del mar. La marea astronómica es aquella que depende principalmente de la atracción entre la luna, la tierra y el sol. En esencia, las mareas ascensos y descensos cíclicos del nivel por la interacción de los astros mencionados (Douglass, Nathan, & Malyszek, 2004). El nivel medio del mar (MSL por su sigla en inglés) se refiere al promedio de la superficie del mar en todas las fases de la marea. Por otro lado, la marea meteorológica corresponde a un incremento o descenso del nivel a causa de la interacción de la superficie de agua con el viento y a variaciones de la presión atmosférica sobre el océano (US Army Corps of Engineers [USACE], 2003).

El oleaje no es un proceso homogéneo ni estacionario, sin embargo, la inercia del fenómeno permite que el oleaje se mantenga aproximadamente estacionario durante un período de tiempo llamado estado de mar (Silva, 2005). Un estado de mar se puede sintetizar a través de los parámetros integrales de oleaje: altura significativa de ola (H_s), período asociado al pico espectral (T_p) y dirección promedio (Dir). H_s se refiere al promedio del tercio superior de un estado de mar, T_p es el período de onda asociado al máximo valor del espectro de energía del oleaje. Por su parte, Dir corresponde a la dirección promedio hacia donde viaja el oleaje (USACE, 2003). Una representación de la distribución de la energía del oleaje en función de la frecuencia de las olas se puede hacer por medio espectros teóricos como el JONSWAP (*Joint North Sea Wave Project*). Los parámetros de este espectro fueron desarrollados a partir de experimentos de campo y mediciones de oleaje (USACE, 2003).

3.2. Modelo utilizado: DELFT3D

Los modelos numéricos del océano permiten simular los fenómenos más relevantes cerca del litoral y fuera de él. La modelación numérica ha tenido grandes avances en los últimos años, hasta el punto de tener esquemas que permiten obtener soluciones adecuadas y con interfaces refinadas y amigables con el usuario, que permiten la visualización de resultados (Marine Energy in Far Peripheral and Island Communities [MERiFIC], 2014). En el presente trabajo se utiliza el modelo numérico Delft3D, desarrollado por la Universidad Tecnológica de Delft con el propósito de estudiar la hidrodinámica de zonas costeras,

estuarios, ríos y lagos, teniendo en cuenta forzadores como el viento, las corrientes, el oleaje y nivel del mar (Aguilar, 2016).

El Delft3D cuenta con una serie de módulos asociados a la hidrodinámica, morfología, la propagación de oleaje, calidad del agua, modelación ecológica y transporte de sedimentos (Deltares, 2021). En el presente trabajo solo se utilizan los módulos asociados a hidrodinámica y oleaje: Delft3D-FLOW y Delft3D-WAVE, respectivamente. Dichos módulos se acoplan con el fin de evaluar la hidrodinámica y el oleaje de la zona de estudio de manera conjunta. En particular, los resultados del módulo Delft3D-FLOW pueden ser usados como parámetros de entrada para los demás módulos de trabajo del Delft3D (Deltares, 2020). Los módulos FLOW y WAVE pueden ser usados en múltiples aplicaciones en zonas costeras, en este caso se usarán para analizar intervenciones antrópicas en una zona litoral y escenarios de cambio climático en una zona del Caribe colombiano.

En el Anexo A, se presenta la nomenclatura detallada de los términos que componen las ecuaciones presentadas asociadas al módulo Delft3D-FLOW y Delft3D-WAVE.

3.2.1. Módulo Delft3D-FLOW

El Delft3D-FLOW se basa en las ecuaciones de Navier-Stokes bajo los supuestos de Boussinesq y aguas poco profundas (Gyssels, et al., 2013). El modelo incluye formulaciones matemáticas que tienen en cuenta efectos barotrópicos, efecto Coriolis, agua con densidades variables, fuerza de la marea en fronteras abiertas, entre otros. Cuando se tienen problemas en los cuales hay una variabilidad vertical importante se recomienda el uso del módulo en tres dimensiones (3D), mientras que para un flujo verticalmente homogéneo es apropiado usar el módulo en dos dimensiones (2DH) (Deltares, 2020). A continuación se presentan las ecuaciones más representativas que se resuelven en el módulo hidrodinámico. En la ecuación 1 se presenta la ecuación de continuidad promediada en profundidad. Esta ecuación se derivó a partir de la ecuación de continuidad para fluidos incompresibles sobre la profundidad total, considerando condiciones cinemáticas de contorno en la superficie y en el fondo (Deltares, 2020).

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial((d + \zeta)U\sqrt{G_{\eta\eta}})}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial((d + \zeta)V\sqrt{G_{\xi\xi}})}{\partial \eta} = (d + \zeta)Q \quad (1)$$

Donde, ζ es nivel del agua por encima de algún plano horizontal de referencia (*datum*), t es el tiempo, $\sqrt{G_{\xi\xi}}$ y $\sqrt{G_{\eta\eta}}$ son los coeficientes utilizados para transformar coordenadas curvilíneas a rectangulares, d es la profundidad por debajo del *datum*, η y ξ son coordenadas horizontales curvilíneas, U y V son velocidades promediadas en profundidad y Q es la fuente o sumidero global por unidad de área.

La dirección horizontal del modelo Delft 3D permite trabajar con dos sistemas de coordenadas: cartesianas y esféricas (Deltares, 2020). En el Anexo B, se presentan los detalles las ecuaciones de los sistemas de coordenadas mencionados. Con el fin de calcular el promedio en profundidad de las componentes U y V se utilizan las ecuaciones 2 y 3.

$$U = \frac{1}{d + \zeta} \int_d^\zeta u dz = \int_{-1}^0 u d\sigma \quad (2)$$

$$V = \frac{1}{d + \zeta} \int_d^\zeta v dz = \int_{-1}^0 v d\sigma \quad (3)$$

Donde, u es la velocidad de flujo en la dirección x o ξ , v es la velocidad de flujo en la dirección y o η , y σ es la coordenada vertical escalada $\sigma = \frac{z-\zeta}{d+\zeta}$; (superficie, $\sigma = 0$ nivel del fondo, $\sigma = -1$).

Para calcular las contribuciones por unidad de área asociadas a procesos de precipitación y evaporación es posible utilizar la ecuación 4.

$$Q = \int_{-1}^0 (q_{in} - q_{out}) d\sigma + P - E \quad (4)$$

Donde, q_{in} es la fuente local por unidad de volumen, q_{out} es el sumidero local por unidad de volumen, P es la precipitación y E es la evaporación.

En el Anexo C, se pueden consultar las ecuaciones de momento en las direcciones ξ y η y de la componente w . Estas ecuaciones tienen en cuenta los aportes que se generan por procesos de precipitación o evaporación. Bajo el supuesto de aguas poco profundas, la ecuación de momento vertical se puede reducir a una ecuación de presión hidrostática, tal como se muestra en la ecuación 5. En esta ecuación no se tienen en cuenta las aceleraciones verticales debidas a efectos de flotabilidad y a variaciones bruscas en la topografía del fondo (Deltares, 2020).

$$\frac{\partial P}{\partial \sigma} = -g\rho H \quad (5)$$

Donde, g es la aceleración debida a la gravedad, ρ es la densidad del agua y H es la profundidad total del agua ($H = d + \zeta$; d positivo hacia abajo).

Para el caso de agua con densidad constante en toda la capa de agua, y teniendo en cuenta la presión atmosférica, los gradientes de presión se calculan con las ecuaciones 6 y 7.

$$\frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\xi\xi}}} P_\xi = \frac{g}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} + \frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial P_{atm}}{\partial \xi} \quad (6)$$

$$\frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\eta\eta}}} P_\eta = \frac{g}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} + \frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial P_{atm}}{\partial \eta} \quad (7)$$

Donde, ρ_0 es la densidad de referencia del agua, P_ξ es el gradiente hidroestático de presión en la dirección η , P_{atm} es la presión atmosférica y P_η es el gradiente hidroestático de presión en la dirección ξ .

3.2.1. Módulo Delft3D-WAVE

El módulo Delft3D-WAVE tiene incorporado el modelo SWAN de tercera generación, el cual tiene múltiples aplicaciones en manejo y desarrollo costero y también puede ser usado como un modelo *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 en cuenta aspectos como la generación de olas por el viento, la difracción, disipación por rotura inducida por la profundidad, el *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 flujo y oleaje de forma conjunta (Deltares, 2021).

El modelo SWAN describe el oleaje por medio de espectros bidimensionales, por medio de la variable densidad de acción $N(\sigma, \theta)$. Esta variable se conserva en presencia de corrientes, mientras que el espectro de densidad de energía $E(\sigma, \theta)$ no lo hace. La variable independiente es la frecuencia relativa σ , mientras que θ representa la dirección promedio de cada componente espectral. La densidad de acción es la densidad de energía dividida por la frecuencia relativa (ecuación 16), la cual puede variar espacial y temporalmente. Con el fin de describir la evolución del espectro de oleaje en términos del balance de acción espectral en coordenadas cartesianas, se propone la ecuación 17.

$$N(\sigma, \theta) = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma} \quad (8)$$

Donde, N es el espectro de densidad de acción $\mathbf{N}(\sigma, \theta) = \mathbf{E}(\sigma, \theta) / \sigma$, E es el espectro de densidad de energía $E(\sigma, \theta)$, σ es la frecuencia relativa y θ es la dirección de la ola.

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} c_x N + \frac{\partial}{\partial y} c_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma} c_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} c_\theta N = \frac{S}{\sigma} \quad (9)$$

Donde, S representa los efectos de generación, disipación e interacciones onda-onda no lineales $S(\sigma, \theta)$. Por su parte, c_x , c_y , c_σ y c_θ son las velocidades de propagación en x, y, σ y θ , respectivamente.

4. Zona de estudio

Sobre las costas del Caribe colombiano cada una de las playas tiene características particulares que pueden verse afectadas de diferentes formas ante el cambio climático o intervenciones antrópicas. En particular, el Golfo de Urabá es una zona de especial interés para el país, no solo a nivel ecosistémico sino también económico y social, por lo cual se escogió como zona de estudio. A continuación, se presenta el área de estudio con mayor

detalle, teniendo en cuenta aspectos como su ubicación, características sociales, económicas y ecosistémicas.

4.1. Ubicación

En la Figura 1 (a) se presenta la ubicación general de la zona de estudio, la cual se encuentra localizada en el noroccidente de Colombia en límites con Panamá. Por su parte, en la Figura 1 (b) se aprecia el golfo de Urabá, ubicado al sur del Mar Caribe y los municipios costeros que lo rodean: Acandí y Ungía, pertenecientes al departamento del Chocó y Necoclí, Turbo, Apartadó y Carepa, del departamento de Antioquia. El presente estudio no se enfoca en analizar el Golfo de Urabá en su totalidad, sino que se estudiará una zona entre el centro y el norte del golfo tal como se resalta en el recuadro negro.

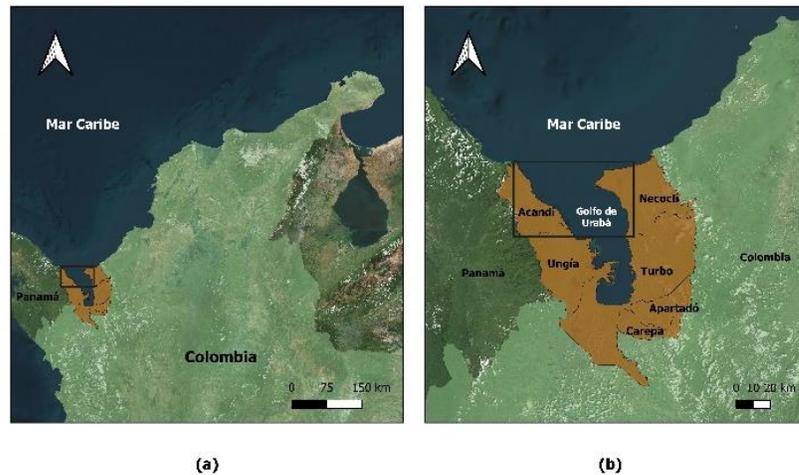


Figura 1. Zona general de estudio (elaborada en Qgis). (a) Ubicación general del Golfo de Urabá en Colombia (b) Ubicación detallada del Golfo de Urabá con énfasis en la zona de estudio.

En el recuadro negro de la Figura 2 se muestra la zona de estudio detallada, en la cual se desea determinar los patrones hidrodinámicos. Cabe resaltar que el área de modelación se extiende al norte del área de principal interés de estudio, tal como se muestra en la misma figura, puesto que las ejecuciones preliminares del modelo presentaron posibles problemas numéricos cerca de la frontera de forzamiento. De este modo se podrán descartar estos resultados y analizar de manera adecuada los procesos físicos en el área de interés. Los sitios de principal interés del presente estudio son las playas de los cascos urbanos de los municipios de Acandí y Necoclí. Adicionalmente, Playa Bobalito, ubicada al nororiente del golfo debido a los procesos biológicos y de desove de algunas de las especies de tortugas que se presentan allí.

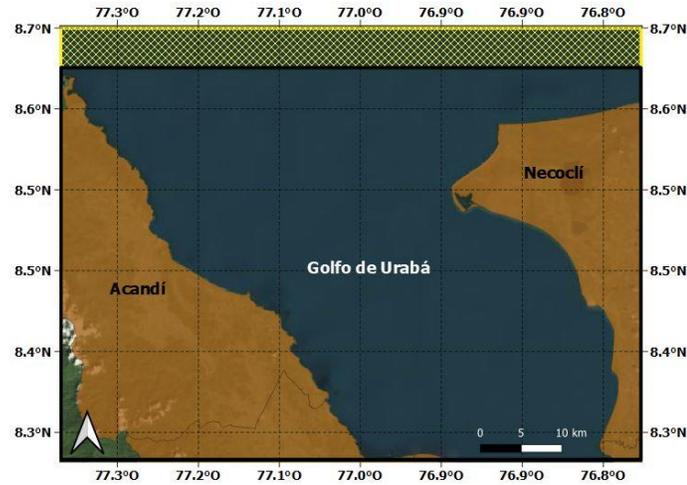


Figura 2. Ubicación detallada de la zona de estudio seleccionada y área de modelación (elaborada en Qgis).

4.1. Sistemas naturales relevantes y ecosistemas vulnerables

El Golfo de Urabá se ubica en la zona de vida de bosque húmedo tropical (INVEMAR, 2002) y es un extenso estuario en el cual se han realizado múltiples estudios asociados a su diversidad ecosistémica (Jaramillo, 2016). En la Figura 3 se muestran los ecosistemas marinos, acuáticos y costeros de la zona de estudio del presente trabajo, de acuerdo con la clasificación del Sistema de Información Ambiental de Colombia (SIAC). El cambio climático y las presiones antrópicas sobre las zonas litorales podrían afectar significativamente estos ecosistemas, incluso algunas zonas podrían dejar de ser aptas para la vida marina (Agencia Europea de Medio Ambiente, 2015).

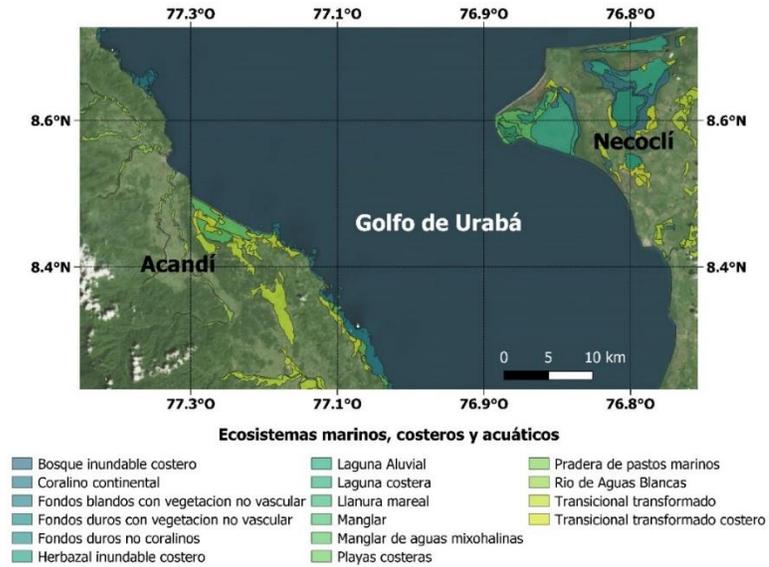


Figura 3. Ecosistemas marinos, costeros y acuáticos de la zona de estudio según el Sistema de Información Ambiental de Colombia (elaborada en Qgis).

Por otra parte, las tortugas marinas son una de las especies más representativas de la zona de Necoclí. Las Tortugas Carey (*Eretmochelys Imbricata*) y Caná (*Dermochelys Coriácea*) son especies en estado crítico de conservación y realizan su proceso de desove en Playa Bobalito, en una playa con bajas presiones antrópicas (Támara, Obregón, Pulgarín, Sánchez, & Alabares, 2018). La Tortuga Caná es la especie más común en el Golfo de Urabá, concentrada principalmente en playas del noroccidente del golfo (Ceballos, 2004). De hecho, las playas Playón y la Playona en Acandí tienen la mayor densidad poblacional de Tortuga Caná del Caribe colombiano (Gobernación del Chocó, 2016).

4.2. Descripción general de las características sociales y económicas de la zona

Desde la época prehispánica el Golfo de Urabá ha sido considerado un lugar geoestratégico por sus condiciones de navegabilidad y disponibilidad de recursos. Históricamente el municipio de Necoclí ha estado marcado por dinámicas migratorias complejas asociadas a su ubicación y a las consecuencias del conflicto armado en la zona, esto ha generado una distribución poblacional pluriétnica y pluricultural (Alcaldía Municipal de Necoclí, 2016). Para el año 2018 el Departamento Administrativo Nacional de Estadística de Colombia (DANE) censó 38.420 personas en Necoclí, Antioquia (DANE, 2018), las principales actividades económicas de este municipio son la agricultura, la ganadería y la pesca. Adicionalmente, Necoclí es un atractivo turístico por su valor histórico, arqueológico y ecosistémico, allí se destacan lugares como la Ensenada de Rionegro y las ciénagas La Marimonda y El Salado (Alcaldía Municipal de Necoclí, 2016). También se destacan en Necoclí los volcanes de lodo de Nueva Esperanza, Virgen del Cobre, Mellito Alto, Gigantón, Pueblo Nuevo, El Carlo, Las Changas y Santa Rosa de los Palmares (Vivas, 2019).

El departamento de Chocó cuenta con múltiples riquezas naturales y turísticas, sin embargo, ninguno de sus municipios tiene cubiertos todos los servicios básicos tales como acueducto, alcantarillado, gas, hospitales, etc. (Muñoz, 2017). En el caso particular de Acandí el DANE censó 12.095 personas en 2018 (DANE, 2018). En este municipio de la subregión de Darién las actividades económicas predominantes son el turismo, la agricultura, la ganadería, la pesca artesanal y la explotación forestal (Cámara de Comercio del Chocó, 2017).

El asentamiento poblacional de Acandí ha sido principalmente motivado por la extracción de recursos de la zona, tales como caucho y banano. La historia de Acandí está ampliamente ligada a la del Urabá antioqueño, incluso respecto a la presencia de grupos armados que ha afectado a ambas regiones, generando desplazamientos forzados y aumentando los índices de pobreza. La principal ruta de abastecimiento de Acandí se da a través de transporte marítimo desde Turbo, pues la interconexión vial de la zona con el resto del país es nula (Cepeda, 2010).

4.3. Intervenciones antrópicas representativas en la zona de estudio

Tanto en Acandí como en Necoclí se identifican algunos asentamientos humanos muy cerca de la línea de costa. En el casco urbano de Necoclí se presentan algunas de las intervenciones antrópicas de la línea de costa más representativas de la región (Figura 4). Este tipo de desarrollo urbano desordenado es muy común en las costas del Caribe colombiano y está forzado por establecimiento de turismo, navegación y pesca, y

asentamientos humanos. Estos desarrollos también podrían verse seriamente afectados ante escenarios de cambio climático (IPCC, 2014).



Figura 4. Casco Urbano de Necoclí. Alcaldía de Necoclí (2021).

Las comunidades que se encuentran en zonas costeras no solo se benefician de las bondades de los ecosistemas, sino que se enfrentan a la exposición constante de eventos naturales que los pueden afectar. Esto ha motivado a que en algunas costas del Caribe colombiano se lleven a cabo diversas obras protección. Sin embargo, no siempre se cuenta con los diseños adecuados, con mirada ecosistémica y de largo plazo, que estas obras requieren.

En el caso particular de Necoclí se ha identificado la construcción empírica de múltiples diques y espigones. Esta situación es contraproducente para la estabilidad geomorfodinámica de la zona, y ha generado problemas erosivos. Para estudiar el efecto hidrodinámico de obras de pequeña escala, como las que se evidencian a lo largo de la línea de costa de Necoclí, es necesaria una batimetría de detalle y una determinación a escala fina de las obras costeras. De esta manera será posible involucrar el efecto de las obras por medio de cálculos numéricos. Debido a lo anterior, este trabajo se concentrará en intervenciones antrópicas de mayor escala.

Para el caso de Acandí, también se identificaron asentamientos urbanos sobre la línea de costa. Es de notar que su población es alrededor de la tercera parte de los habitantes de Necoclí. La playa de este lugar se encuentra igualmente expuesta a diferentes fenómenos naturales dada su cercanía al mar, tal como se muestra en la Figura 5.



Figura 5. Municipio de Acandí. Peláez (2019).

Tanto las intervenciones antrópicas de Necoclí como las de Acandí afectan, de manera importante, el patrón hidrodinámico natural de la zona, lo que llevó a considerarlos como los lugares de interés del presente trabajo. Teniendo en cuenta que estas son comunidades que requieren el conocimiento del efecto de futuras intervenciones en la geomorfología de la zona para su adecuado desarrollo y subsistencia. Además, los estudios hidrodinámicos en esta zona pueden servir de base para otro tipo de investigaciones ingenieriles, ecológicas, sociales y de gestión del riesgo.

5. Metodología

A continuación, en la Figura 6 se presenta la metodología empleada para dar cumplimiento a los objetivos propuestos en el presente trabajo. Posteriormente, se describe cada una de las etapas mostradas en el esquema metodológico.

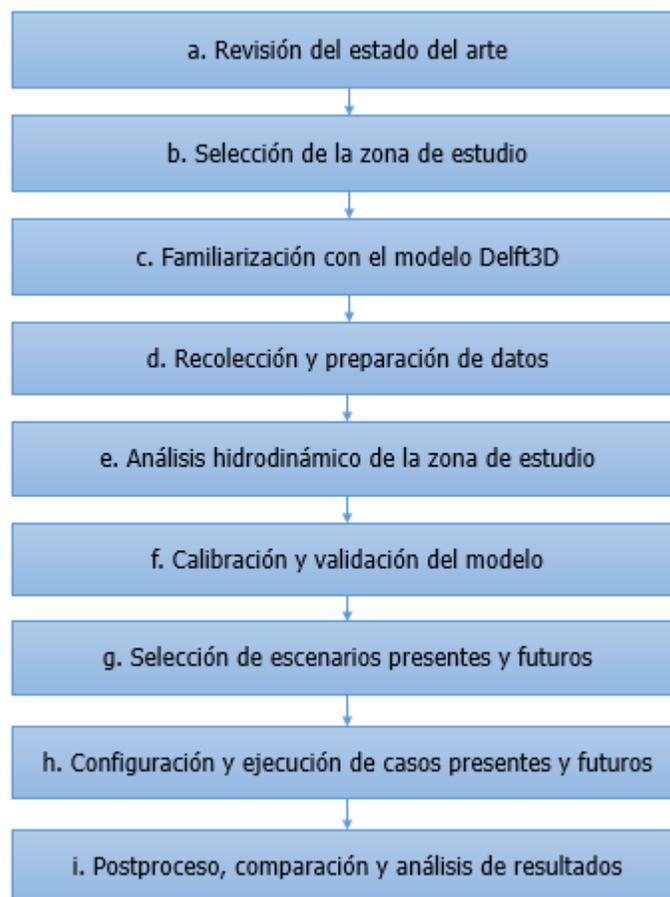


Figura 6. Metodología implementada para el desarrollo del presente trabajo.

- a) Revisión del estado del arte:** En esta etapa se realizó una revisión rigurosa del estado del arte en temas asociados a cambio climático, análisis hidrodinámicos con modelación numérica en zonas costeras, estudios hidrodinámicos y de intervenciones antrópicas realizadas en el mundo y en el Caribe colombiano. Esta revisión fue de utilidad para identificar logros y dificultades presentados en investigaciones previamente desarrolladas, especialmente cuando se involucran modelos numéricos.

-
- b) **Selección zona de estudio:** Después de revisar el estado del arte se procedió a seleccionar el Golfo de Urabá como zona de estudio. Se consideraron aspectos como disponibilidad de información, ubicación, identificación de ecosistemas y poblaciones vulnerables ante el cambio climático en el lugar.
- c) **Familiarización con el modelo Delft3D:** Esta etapa fue necesaria para entender el entorno de trabajo del modelo, los módulos que lo componen, los parámetros requeridos para la configuración numérica de casos, construcción de mallas, condiciones iniciales y preparación de archivos de entrada. Adicionalmente, en esta fase se realizó un acercamiento a los conceptos hidrodinámicos fundamentales para dar cumplimiento a los objetivos propuestos.
- d) **Recolección y preparación de datos:** De acuerdo con los requerimientos del modelo a utilizar y para dar cumplimiento a los objetivos propuestos se requiere contar con datos de batimetría, oleaje y nivel del mar. Por lo tanto, en esta fase se consultaron diferentes fuentes tales como boyas, mareógrafos y datos históricos previamente modelados (*hindcast*), de las cuales se extrajo la información necesaria. Una vez obtenida la información, se preprocesaron los datos para, posteriormente, poderlos utilizar.
- e) **Análisis hidrodinámico de la zona de estudio:** En esta etapa se realizaron análisis estadísticos y conceptuales con base al comportamiento actual de variables hidrodinámicas relevantes tales como nivel del mar, altura significativa de ola y dirección del oleaje. Para tal fin se utilizaron datos de “*hindcast*” de oleaje y mediciones de nivel del mar en diferentes puntos del Caribe colombiano.
- f) **Calibración y validación del modelo:** Una vez preparados los datos de entrada, se realizaron actividades con el fin de ajustar la configuración numérica del modelo Delft3D aplicado al caso de estudio propuesto. En esta etapa se realizaron múltiples pruebas que permitieron identificar la sensibilidad del modelo ante la modificación de parámetros numéricos y físicos. Lo que se busca con la calibración y validación es encontrar un ajuste óptimo de los parámetros del modelo para realizar el posterior análisis hidrodinámico de la zona de estudio y ejecución de casos propuestos. En el capítulo 8 se ahondará en las complejidades y resultados obtenidos en esta etapa.
- g) **Selección de escenarios presentes y futuros:** En esta etapa se realizaron análisis estadísticos y se procesaron los datos disponibles para definir escenarios representativos de condiciones hidrodinámicas presentes y futuros. Se tuvieron en cuenta evidencias científicas relacionadas con proyecciones de variables como el nivel del mar. Como resultado de esta etapa se definieron las condiciones de entrada de los escenarios de interés para este estudio.
- h) **Configuración y ejecución de casos presentes:** En esta etapa se realizó el montaje numérico requerido para cada uno de los escenarios seleccionados en la etapa anterior. Adicionalmente, se realizaron las simulaciones numéricas correspondientes que

permitieron obtener los resultados necesarios para dar cumplimiento a los objetivos del presente estudio.

- i) **Postproceso, comparación y análisis de resultados:** Finalmente, en esta etapa se procesaron los resultados obtenidos y se compararon los patrones hidrodinámicos actuales con los posibles patrones hidrodinámicos futuros de la zona de estudio. Adicionalmente, se analizaron las consecuencias potenciales de dichos cambios.

6. Descripción de datos utilizados

A continuación, se describen los datos de partida que se utilizaron para realizar el análisis hidrodinámico de la zona de estudio, la definición de escenarios a modelar y la configuración de entradas para el modelo Delft3D.

6.1. Batimetría

La batimetría utilizada fue obtenida de las cartas náuticas facilitadas por la Dirección General Marítima, Autoridad General Marítima Colombiana (DIMAR) y complementada con datos del modelo de relieve global ETOPO. Dicha batimetría se muestra en la Figura 7 (a) y representa la morfología general de la zona de estudio. Por su parte, la Figura 7 (b) muestra la batimetría tras la interpolación requerida para la configuración de casos de estudio en el Delft3D. Es importante aclarar que la interpolación realizada implica una incertidumbre asociada a la carencia de datos batimétricos de mayor detalle y resolución. La falta de datos en la zona noreste, evidenciada en la Figura 7 (a), puede resultar especialmente perjudicial para los cálculos numéricos requeridos en el presente estudio, ya que coincide con la frontera de forzamiento, lo cual podría generar alteraciones en la propagación del oleaje. Por otro lado, aunque la morfología de las zonas costeras se encuentre en constante evolución, se supuso que la batimetría permaneció inalterada en los diferentes escenarios propuestos. Para estudios de mayor detalle sería conveniente contar con actualizaciones de la batimetría y mejores resoluciones espaciales.

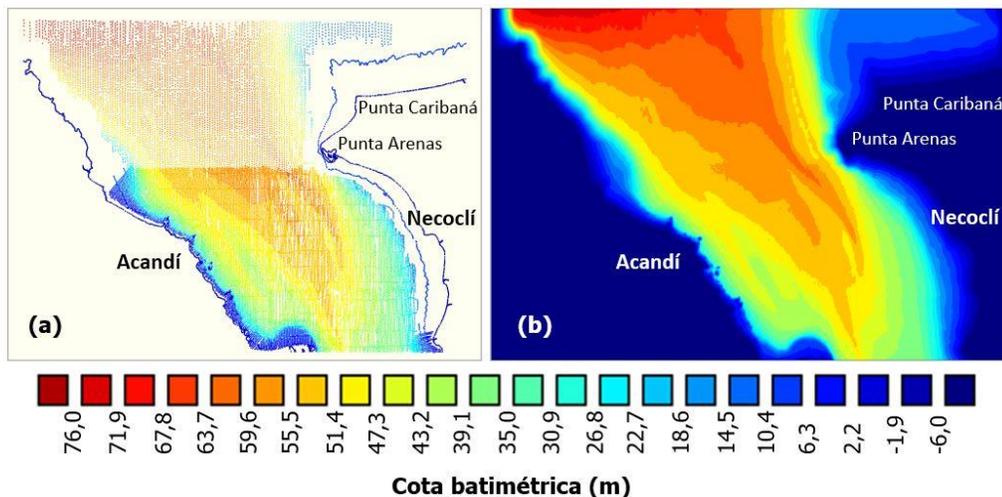


Figura 7. Batimetría de la zona de estudio (DIMAR). (a) Datos batimétricos disponibles. (b) Interpolación batimétrica realizada en Delft3D.

6.2. Parámetros integrales de oleaje

El proyecto “Investigación para reversión del proceso de erosión en las costas del mar de Antioquia”, realizado por la Gobernación de Antioquia y la Universidad de Antioquia implementó el modelo SWAN a nivel regional, obteniendo una serie de 8 años de datos de oleaje en una zona del Caribe, incluyendo el Golfo de Urabá. Se cuenta con datos entre el 1 de enero de 2010 hasta el 31 de diciembre de 2017 con resolución horaria, en la Figura 8 se muestran los datos de H_s del “hindcast” en un instante de tiempo, ilustrando el dominio de la base de datos utilizada para el análisis hidrodinámico de la zona de estudio y como fuente de datos de forzamiento de oleaje. Por otro lado, en la Figura 9 se muestra la serie de H_s del “hindcast” en un punto, resaltando en el recuadro rojo un tramo de tiempo en el que no se cuenta con datos modelados, este inconveniente se presenta en todos los puntos del “hindcast”. Este vacío de datos, entre junio y mayo de 2016, se debe a que al momento de construir el “hindcast” no se contaba con datos de campos de viento para esas fechas. Para los análisis estadísticos posteriores, se procesó la información para no tener en cuenta los datos faltantes, evitando así anomalías en los resultados.

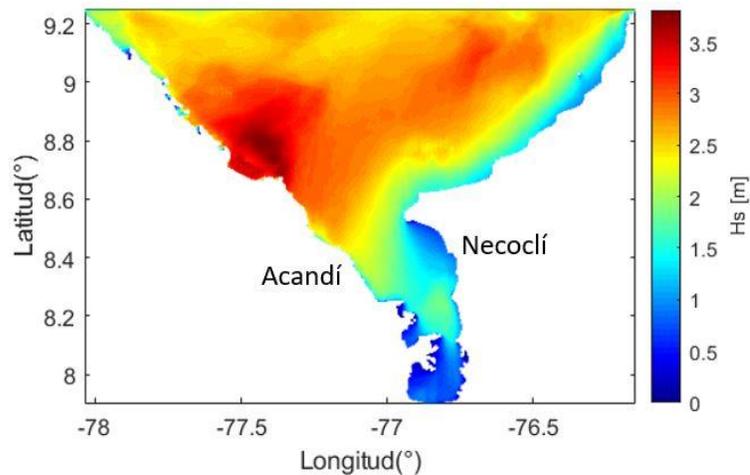


Figura 8. Mapa de H_s (“hindcast”) en un instante de tiempo.

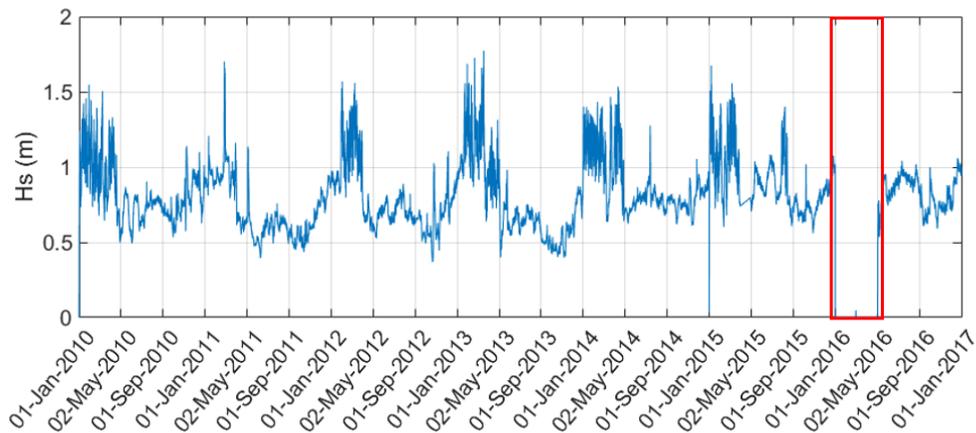


Figura 9. Serie de H_s (“hindcast”) en un punto.

6.3. Datos Boya Akuará (CORPOURABÁ)

Al interior del dominio del presente estudio solo se cuenta con un instrumento de medición de H_s y T_p , se trata de la boya Akuará instalada por CORPOURABÁ. En la Figura 10 se muestra la ubicación de la boya ($-76.83832^\circ, 8.45991^\circ$), se observa que el instrumento se localiza en una zona abrigada por la morfología del este de la zona de estudio (Necoclí). Se cuenta con el registro de H_s y T_p entre el 18 de julio de 2015 y el 1 de junio de 2016, con resolución temporal de 30 minutos. Lo que se pretendía era utilizar estos datos tomados *in situ* para el proceso de calibración y validación del modelo. Sin embargo, en el capítulo 8 se explicarán los inconvenientes presentados en dicho proceso y la metodología empleada para verificar la coherencia de los resultados obtenidos.



Figura 10. Ubicación de la boya Akuará (CORPOURABÁ).

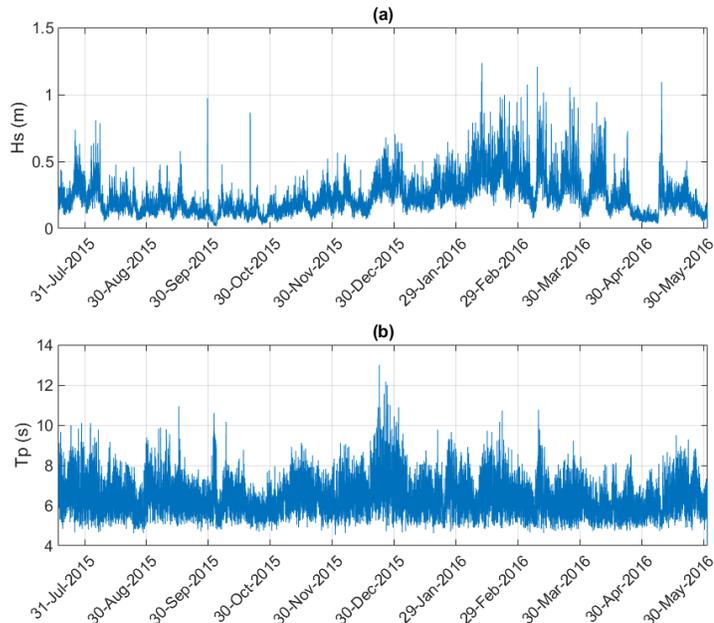


Figura 11. Series de H_s y T_p de boya Akuará (18/07/2015 - 01/06/2016). (a) Registro de H_s . (b) Registro de T_p .

6.4. Datos de nivel del mar

Se tienen datos de nivel del mar registrados por 4 mareógrafos: Cartagena (*Hawaii Sea level Center*) y Sapzurro, Coveñas y Turbo (DIMAR), localizados en diferentes puntos del Caribe colombiano, tal como se muestra en la Figura 12. El registro de cada uno de los mareógrafos se tiene en diferentes resoluciones temporales y en diferentes lapsos de tiempo, en el anexo D se presentan estos detalles y las coordenadas de cada mareógrafo. En la Figura 13 se presentan las series de nivel del mar registradas por cada uno de los mareógrafos, se observa que todos tienen un nivel de referencia diferente y en ninguno de los casos la entidad encargada reporta dicho nivel. Esto es una falencia importante, pues es un dato fundamental a la hora de post-procesar la información del instrumento de medición. En el presente estudio se llevaron todos los mareógrafos al mismo nivel de referencia restándoles la media, una aproximación válida en este caso (ver Figura 14).



Figura 12. Ubicación de los mareógrafos de Cartagena, Sapzurro, Coveñas y Turbo.

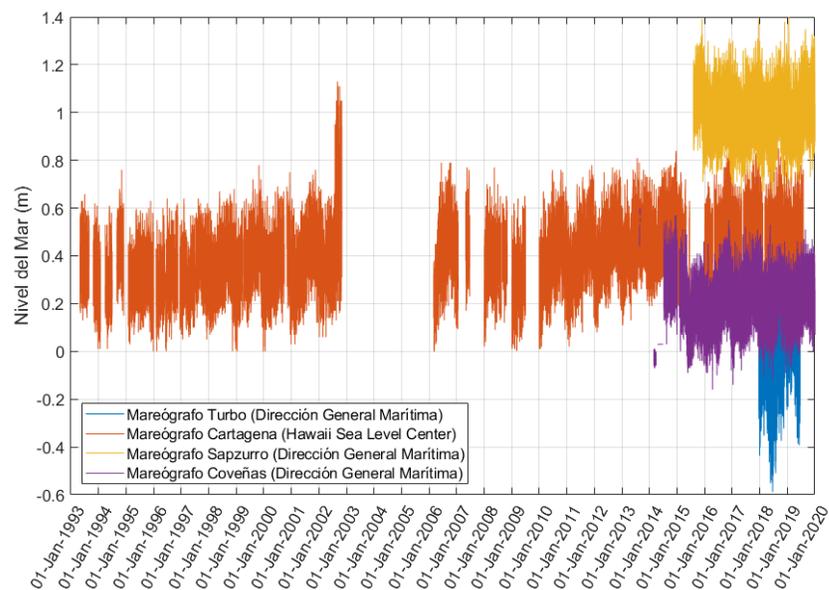


Figura 13. Datos originales de los mareógrafos analizados.

7. Análisis hidrodinámico de la zona de estudio

Atendiendo al objetivo específico número 1 de este trabajo, en el presente capítulo se hará un análisis conceptual y estadístico de las dos variables hidrodinámicas para las cuales se cuenta con información. Las variables son nivel del mar y altura de ola significativa (H_s). Este análisis se llevó a cabo para entender el comportamiento que han tenido históricamente estas variables en la zona de estudio.

7.1. Análisis de nivel del mar

Para el análisis del nivel del mar se utilizaron los datos de los mareógrafos de Turbo, Cartagena, Sapzurro y Coveñas, cuyas localizaciones se presentaron en la Figura 12. Si bien el mareógrafo más cercano a la zona de estudio es el de Sapzurro, analizar los registros de los cuatro mareógrafos en conjunto puede resultar útil para realizar algunos análisis relativos del nivel del mar, debido a la variabilidad espacial a gran escala.

En la Figura 14 se presentan las series de los cuatro mareógrafos llevadas a un mismo nivel de referencia (cero). En esta figura se presenta únicamente el intervalo de tiempo durante el cual se tienen datos en los cuatro mareógrafos, comprendido entre el 18 de diciembre del 2017 y el 20 de junio del 2019. Se observa que las series registradas por los diferentes mareógrafos no oscilan alrededor del cero como nivel medio, sino que presentan modulaciones donde el nivel del mar tiene ascensos o descensos continuos durante varios meses.

Se evidencia que el nivel del mar en Turbo es el que presenta las modulaciones más acentuadas. Sin embargo, el comportamiento de las series de nivel del mar registradas por los mareógrafos de Cartagena, Sapzurro y Coveñas guardan mayor similitud entre sí. Esto puede deberse a que el mareógrafo de Turbo, a diferencia de los demás, se encuentra en el interior del Golfo de Urabá. Esta zona está abrigada de las dinámicas marinas exteriores y, tiene una batimetría y contornos terrestres bastante complejos, estas características pueden ocasionar una deformación de la onda de marea que ingresa por la parte norte del Golfo. Sin embargo, no se tiene información suficiente para atribuir esta deformación de la marea únicamente a su interacción con la batimetría, ya que el nivel del mar podría verse afectado también por fenómenos climáticos o eventos sinópticos que no serán evaluados dentro del alcance de este estudio.

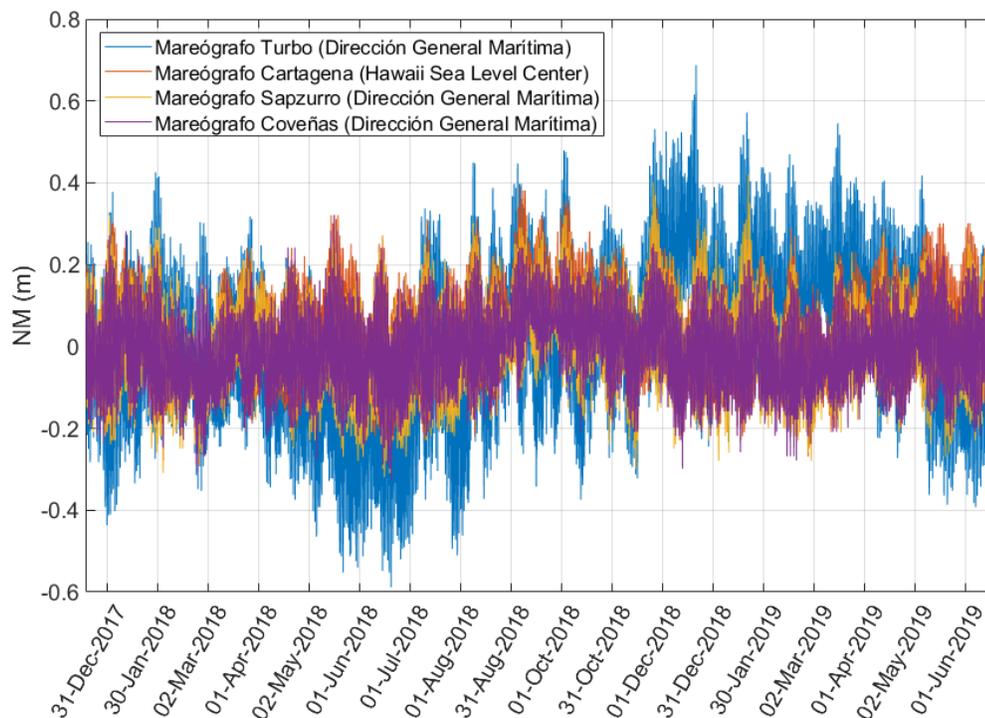


Figura 14. Series de Nivel del Mar en los mareógrafos de Turbo, Cartagena, Sapzurro y Coveñas llevadas a un mismo nivel de referencia y en fechas coincidentes.

En la Figura 15 se presenta la serie de nivel del mar de los 4 mareógrafos entre el 19 de diciembre de 2017 y el 5 de febrero de 2018. En esta figura se puede observar que hay períodos de tiempo en los cuales el nivel del mar presenta variaciones de mayor amplitud (períodos de mareas vivas), seguidos de períodos en los cuales el nivel presenta amplitudes más pequeñas (períodos de mareas muertas). Los picos más altos de la serie corresponden a eventos de pleamar, es decir, al máximo nivel del mar alcanzado dentro de un ciclo de marea. Los picos más bajos de la serie corresponden a eventos de bajamar, es decir, al nivel mínimo alcanzado durante un ciclo.

Dado que la marea es una variable periódica, se puede hablar de un ciclo de marea como el tiempo transcurrido entre dos eventos de pleamar consecutivos o, entre dos eventos de bajamar consecutivos. De esta manera, la serie de nivel del mar está compuesta por ciclos de marea consecutivos, donde algunos tienen mayores amplitudes que otros. La diferencia entre el nivel de una bajamar y la pleamar siguiente se conoce como carrera de marea. Sin embargo, aunque usualmente la marea astronómica es la componente del nivel del mar que explica en mayor medida su comportamiento, no se puede ignorar que en las series presentadas en la Figura 15 aún está presente el efecto de la marea meteorológica, la cual puede alterar el nivel, disminuyendo o aumentando las amplitudes de las pleamares o bajamares respecto a las amplitudes que estas tendrían si únicamente se observara una serie de marea meteorológica.

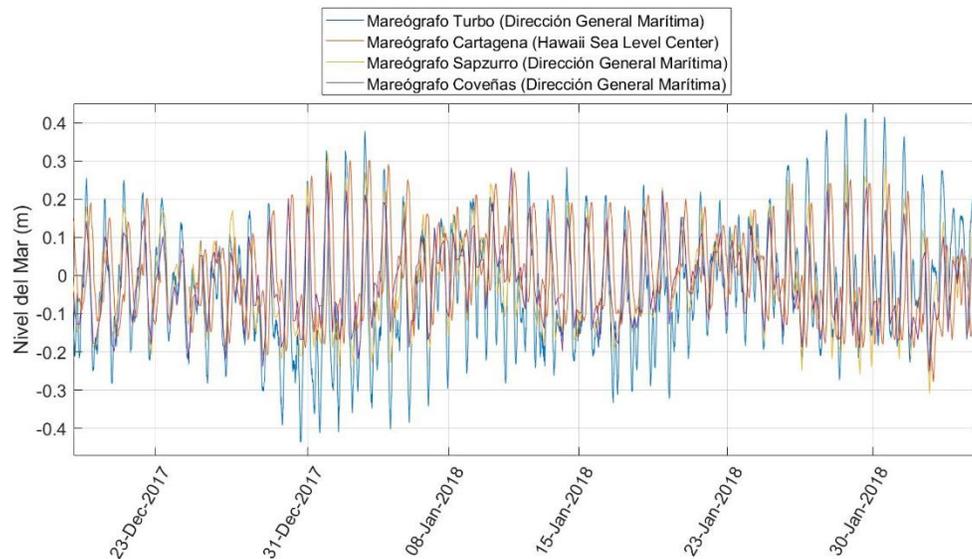


Figura 15. Series de nivel del mar de los 4 mareógrafos analizados entre el 19 de diciembre de 2017 y el 5 de febrero de 2018.

En la Figura 16 se presenta la serie de nivel del mar de los cuatro mareógrafos, en este caso para 4 días comprendidos entre el 31 de diciembre del 2017 y el 4 de enero del 2018. En esta figura se puede observar, que cada 12 horas ocurre un pico de pleamar. Sin embargo, entre dos pleamares consecutivas hay siempre una pleamar de mayor amplitud seguida de una pleamar mucho más pequeña. Lo anterior indica que en la zona de estudio se tiene una marea mixta, con predominancia semi-diurna y un período de medio día.

Otro aspecto que llama la atención en la Figura 16 es el desfase temporal o retraso que hay en los picos de pleamar del mareógrafo de Cartagena (ver ubicación en la Figura 17) respecto a las pleamares registradas en los mareógrafos de Turbo, Sapzurro y Coveñas. Esto se podría explicar por el recorrido de la onda de marea alrededor del punto anfídromico (punto con amplitud de marea cero) más cercano, ubicado en la zona Noreste del Mar Caribe (ver Figura 18).

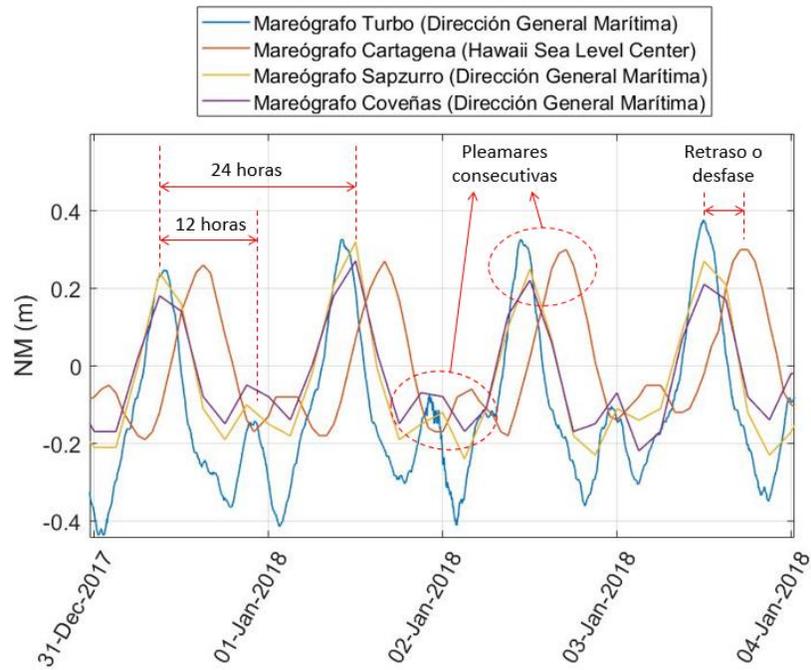


Figura 16. Series de nivel del mar de los 4 mareógrafos analizados entre el 31 de diciembre de 2017 y el 1 de enero de 2018.



Figura 17. Ubicación del mareógrafo de Cartagena al interior de la bahía.



Figura 18. Punto anfidrómico del Caribe. Modificado de <https://www.base-mag.com/explore/beyond-the-amphidrome> (Thomson, 2020)

El nivel del mar está compuesto principalmente por la suma del nivel medio, la marea astronómica y la marea meteorológica. La marea astronómica, obedece principalmente a la interacción entre la tierra, el sol y la luna. Esta es la responsable de las oscilaciones periódicas o cíclicas del nivel del mar alrededor del nivel medio. Mientras que la marea meteorológica constituye un ascenso o descenso de nivel debido a: 1) la ocurrencia de eventos meteorológicos que generan centros de baja presión o de alta presión en la superficie del océano y, 2) el efecto prolongado del viento sobre la superficie. Debido a lo anterior, para entender el nivel del mar, es necesario entender el comportamiento de la marea astronómica y de la marea meteorológica de manera independiente.

Con el fin de conocer cuáles son los componentes armónicos dominantes de la marea en la zona de estudio y separar las series de marea astronómica y meteorológica, se realizó un análisis de armónicos a la serie de nivel del mar registrada por el mareógrafo de Sapzurro. Se ha seleccionado este mareógrafo debido a su ubicación, ya que prácticamente coincide con la localización de la frontera norte del dominio con el que se analizará posteriormente la zona de estudio mediante modelado numérico con Delft3D.

Para poder realizar el análisis de armónicos, fue necesario eliminar previamente de la serie de nivel del mar aquellas oscilaciones de períodos muy largos que no son propias de la oscilación de la marea alrededor de un mismo nivel de referencia. Para ello se restó a la serie original del mareógrafo una media móvil, calculada cada 5 datos, obteniendo el registro del mareógrafo que se presenta en la Figura 19 con puntos de color gris. A este registro se le aplicó un análisis de armónicos con ayuda de la herramienta T-tide y, posteriormente, con los 69 armónicos obtenidos, se reconstruyó la serie de marea astronómica que se presenta en la Figura 19, con una línea continua de color verde.

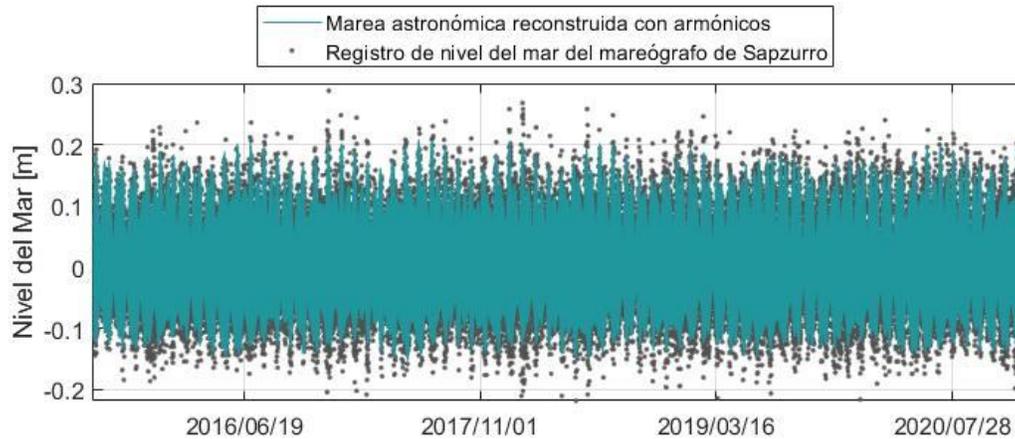


Figura 19. Marea astronómica de Sazpurro reconstruida con armónicos y registro del nivel del mar del mareógrafo de Sazpurro.

Para obtener una serie aproximada de la marea meteorológica en Sazpurro, a la serie del mareógrafo presentada en la Figura 19 se le restó la serie de marea astronómica reconstruida con armónicos, con lo que se obtuvo la serie de marea meteorológica que se muestra en la Figura 20. A diferencia de la marea astronómica, la marea meteorológica es una variable estocástica o aleatoria, en la cual no se espera periodicidad ni simetría alrededor del nivel de referencia. Si bien en la serie de marea meteorológica obtenida se encuentra cierta simetría respecto al cero, lo cual puede deberse a que aún haya en esta serie algunos componentes armónicos residuales de pequeña amplitud, se decidió seguir adelante en los análisis con la serie presentada en la Figura 20, pues la serie original de nivel del mar de los mareógrafos en esta zona es bastante compleja y, por ende, los resultados de los análisis de armónicos en esta zona pueden verse ligeramente afectados dependiendo del pre-proceso que se le haya hecho a la serie original.

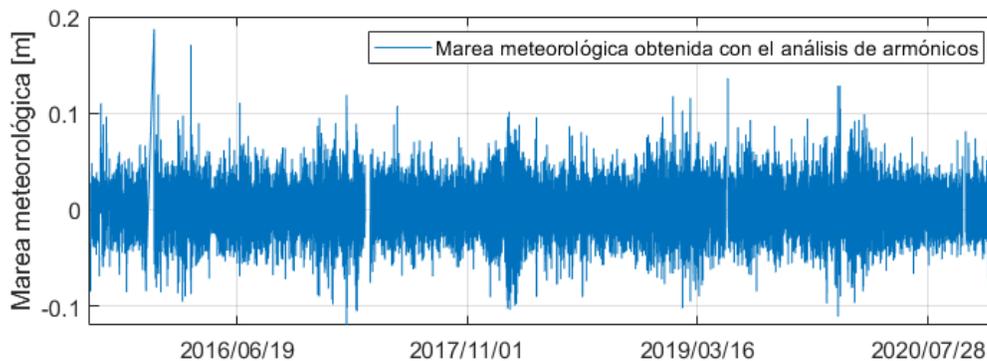


Figura 20. Marea meteorológica obtenida con el análisis de armónicos del mareógrafo de Sazpurro.

En la Tabla 1 se presentan los 6 armónicos de mayor amplitud encontrados para la serie de nivel del mar del mareógrafo de Sazpurro, ordenados de mayor a menor según su amplitud. Estos 6 armónicos se han seleccionado entre los 69 armónicos encontrados, ya que tienen amplitudes mayores a 1cm. Se puede observar que 3 de estos armónicos tienen subíndice 2 y los otros 3 tienen subíndice 1. Los armónicos con subíndice 2 son componentes semidiurnos y los de subíndice 1 son componentes diurnos. En este caso, el armónico

principal es el M_2 , el cual es un armónico semidiurno que tiene en cuenta el efecto de la luna en la rotación de la tierra y se conoce como componente lunar mayor.

Tabla 1. Armónicos predominantes de la marea astronómica extraída del mareógrafo de Sapzurro.

Armónico	Período (s)	Amplitud (m)	Fase
M_2	12.42	0.070	5.12
K_1	23.93	0.051	165.81
O_1	25.82	0.028	174.65
N_2	12.66	0.026	333.90
P_1	24.07	0.015	170.93
S_2	12.00	0.015	236.15

Con la serie de marea astronómica se hizo el histograma de las carreras de marea obtenidas (Figura 21), en el cual se observa que la altura promedio en Sapzurro está alrededor de los 12 cm, mientras que, la altura máxima es de aproximadamente 34 cm. Con estos valores de carrera de marea, se puede afirmar que en la zona de estudio se tiene un régimen de marea astronómica micromareal. Como se verá en el capítulo 9, toda esta información extraída del nivel del mar en Sapzurro fue el punto de partida para la definición de los escenarios presentes y futuros a modelar con el Delft3D para el alcance de los demás objetivos específicos de este estudio.

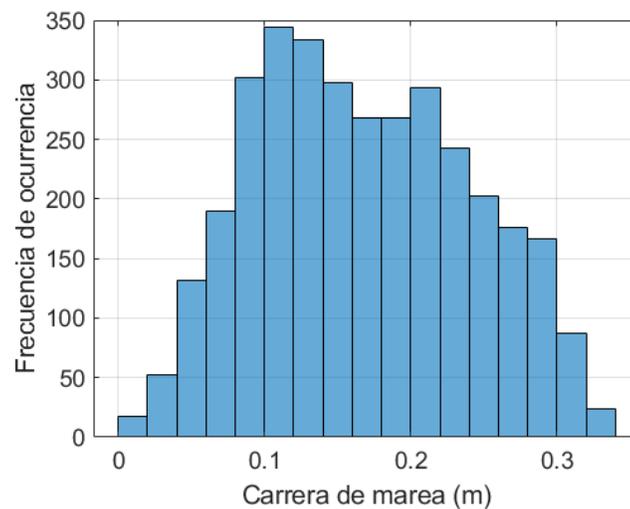


Figura 21. Histograma de carreras de marea extraída de la serie de marea astronómica reconstruida para Sapzurro.

7.2. Análisis de oleaje

En la Figura 22 (a) se presenta el mapa de altura de ola significativa media, obtenida a partir de los datos de “hindcast” disponibles entre el 1 de enero de 2010 hasta el 31 de diciembre de 2017 con resolución horaria, los cuales fueron descritos en la sección 6.2 del capítulo 6. En la Figura 22 (b) se presenta el mapa de H_s media obtenido desde el “hindcast”, únicamente para la zona de estudio; es decir, para el mismo dominio en el que posteriormente se llevaron a cabo las simulaciones con el Delft3D.

En la Figura 22(a) se observa que la altura de ola exterior (la que se observa en mar abierto), se reduce significativamente a medida que entra al Golfo de Urabá, especialmente en las proximidades de la frontera Este. En la Figura 22 (b) se observa que el saliente de tierra de Necoclí, genera una zona de abrigo importante para la zona interior-Este del Golfo, debido a el oleaje que ingresa por la zona Norte del Golfo sufre de refracción y difracción, permitiendo que al Sur la altura de ola significativa se mucho menor a la que se tiene en la zona Oeste y Norte del dominio. Con esto, se evidencia que el margen Oeste del Golfo de Urabá, en el cual se encuentra emplazado Acandí, se encuentra expuesto a oleajes mucho más energéticos que Necoclí. Además, se observa que en la esquina Noroeste de la zona de estudio (Figura 22 (b)) se da una concentración de altura de ola, lo cual, como se verá más adelante, está relacionado con la dirección típica del oleaje que viene desde el Noreste del Caribe hacia al Golfo, pudiendo llegar directamente a la zona Norte de Acandí sin posibilidad de disipar mucha energía.

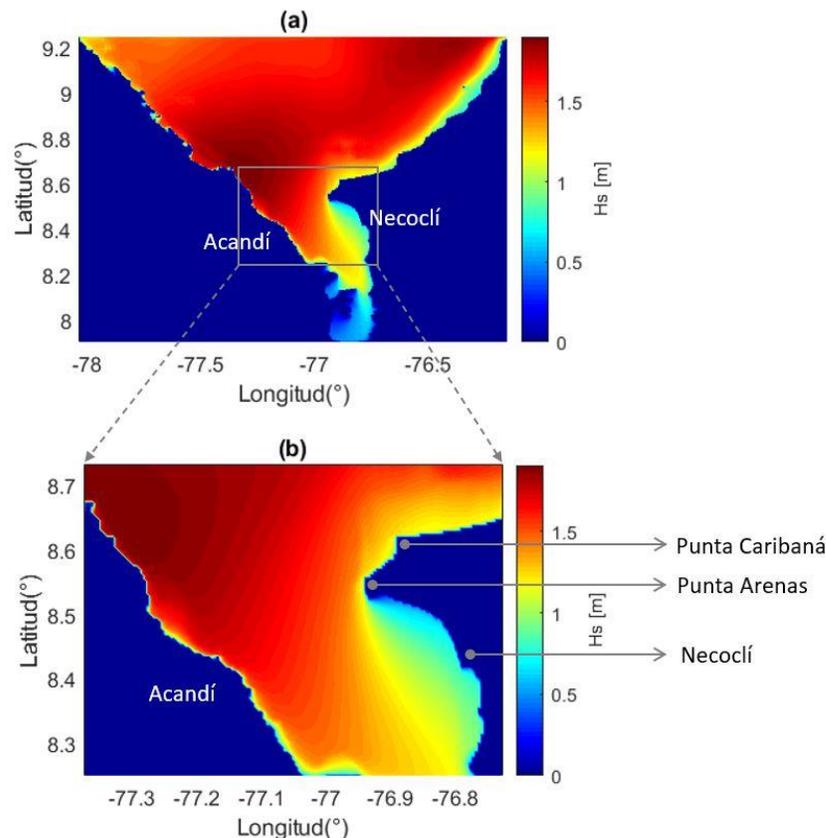


Figura 22. Mapas de H_s media. (a) Mapa de H_s media en dominio de “hindcast”. (b) Mapa de H_s media en el dominio del presente trabajo.

Para complementar el análisis anterior, se seleccionaron 10 puntos de control a lo largo de toda la zona de estudio (ver Figura 23). En estos puntos se extrajeron las series históricas de H_s y dirección que se tenían en la base de datos de “*hindcast*” para todos los años con información disponible. Con estos datos se construyeron las rosas direccionales de altura de ola significativa que se presentan en la Figura 24. Con estas rosas se pretende mostrar las direcciones desde las cuales llega el oleaje a cada uno de los puntos de control. Las coordenadas exactas de estos 10 puntos se presentan en el anexo E. Para el análisis de estas rosas, se abreviarán las direcciones Norte, Este, Sur y Oeste con las letras **N**, **E**, **S** y **W**, respectivamente.

En la Figura 23 (a), (d) y (g) se observa que en los puntos 8, 9 y 10, ubicados frente a la costa más urbanizada de Acandí, las olas tienen el **ENE** como dirección predominante, lo cual es consistente con el análisis previo de la Figura 22. En la Figura 23 (b), (e) y (h), correspondientes a los puntos de control 5, 6 y 7, respectivamente, ubicados en la zona central del dominio, se observa que las direcciones predominantes son el **E** y el **ESE**. En este caso, la componente Sur de la dirección en los puntos 6 y 7 llama la atención, pues, como se verá en el capítulo 9, el oleaje suele entrar a la zona de estudio por la frontera norte con una dirección **NE** o **ENE**. Sin embargo, dado que no se conocen con precisión las condiciones de forzamiento o configuraciones numéricas con las que se ejecutaron las simulaciones de SWAN a partir de las cuales se construyó la base de datos de “*hindcast*” con la que se cuenta, no es posible determinar si estas direcciones realmente pueden ocurrir en el dominio cuando únicamente se tienen en cuenta forzamientos de oleaje en la frontera norte, o cuando se ignora la influencia del sistema circulatorio de corrientes en la zona, incluyendo al río Atrato que está ubicado en la zona sur del Golfo y que es altamente caudaloso.

Esta misma componente direccional predominante **ESE** se observa en la Figura 23 (c) y (f), correspondientes a los puntos de control 2 y 3. Sin embargo, en este caso se considera que esta dirección es más consistente con la dirección del oleaje incidente que entra a la zona de estudio, pues el oleaje **NE** y **ENE** que llega por el Norte puede propagarse hasta los puntos 2 y 3 siguiendo los contornos de la batimetría y cambiar ligeramente su dirección en la interacción con esta hasta llegar a direcciones **E** y **ESE**. Por otro lado, en la Figura 23 (i) y (j), correspondientes a los puntos 1 y 4, se observa que las direcciones predominantes son el **S** y el **SSE**, lo cual puede deberse a que, en estos puntos, los frentes del oleaje que entra por el norte ya han dado un giro casi completo alrededor del saliente de Punta Arenas. Este saliente funciona como un punto de difracción en este dominio, ocasionando que los frentes de olas, buscando ponerse paralelos a la costa Sur de Necoclí, asuman esta dirección después de difractarse. Es importante resaltar que la orientación del oleaje en los puntos analizados podría verse afectada por el periodo de tiempo analizado, ya que el oleaje puede tener variaciones en su comportamiento direccional a lo largo del tiempo.

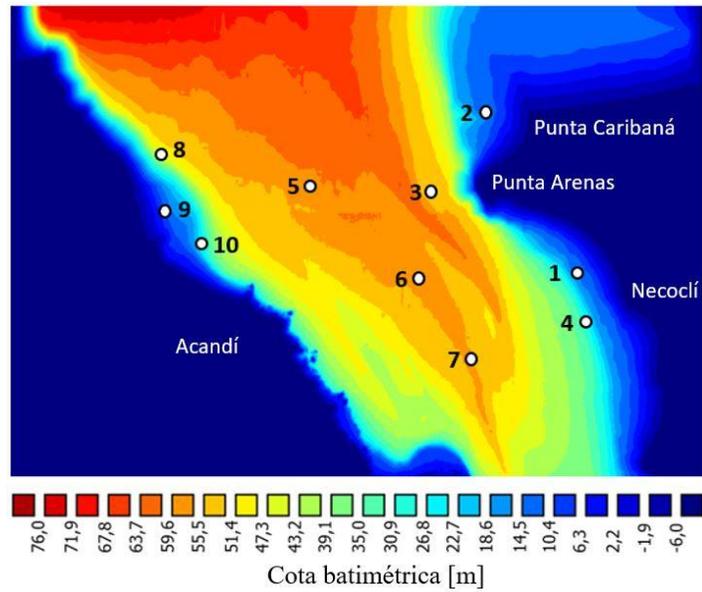


Figura 23. Ubicación de puntos de interés sobre la batimetría de la zona de estudio.

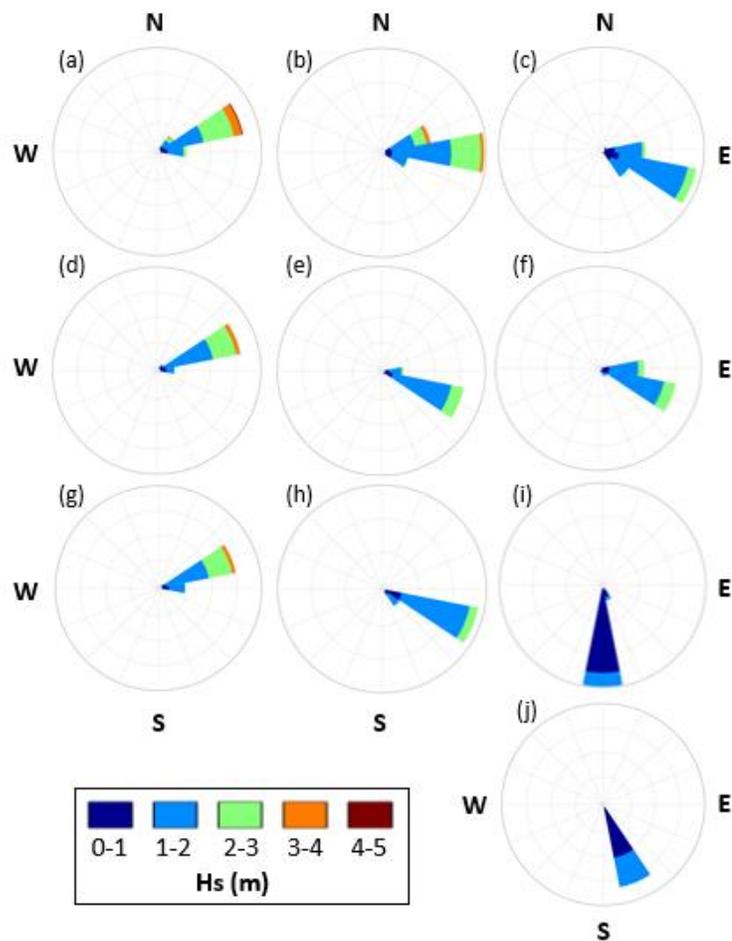


Figura 24. Rosas de H_s en puntos de interés. (a) Rosa de H_s en punto de control número 8. (d) Rosa de H_s en punto de control número 9. (g) Rosa de H_s en punto de control número 10. (b) Rosa de H_s en punto de control número 5.

(e) Rosa de H_s en el punto de control número 6. (h) Rosa de H_s en el punto de control número 7. (c) Rosa de H_s en el punto de control número 2. (f) Rosa de H_s en el punto de control número 3. (i) Rosa de H_s en el punto de control número 1, cuya localización coincide con la ubicación de la boya Akuará (CORPOURABÁ). (j) Rosa de H_s en el punto de control número 4.

8. Calibración y validación del Delft3D

Siguiendo la metodología típica de un proceso de implementación de un modelo numérico, se inició con un análisis de sensibilidad con diferentes configuraciones numéricas del modelo, variando el tamaño de la malla, agregando refinamientos y variando el número de forzamientos, hasta obtener la configuración adecuada para el dominio y la malla.

Para verificar la coherencia de los resultados de oleaje obtenidos con el Delft3D respecto al forzamiento utilizado como condición de frontera en la modelación, se utilizaron datos de “hindcast” obtenidos con el modelo SWAN (que es el mismo esquema de solución de oleaje que utiliza el Delft3D-WAVE). La intención era lograr que los resultados obtenidos con las simulaciones del Delft3D conservaran el comportamiento o tendencia de los datos de “hindcast”, en diferentes puntos del dominio. Es importante resaltar que los datos de “hindcast” con los cuales se comparan los resultados del Delft3D también provienen de modelación numérica y, por lo tanto, tienen una incertidumbre asociada. Además, al ser la misma base de datos utilizada para forzamiento en la frontera y para verificación en el interior del dominio, no se puede hablar de una calibración propiamente dicha, si no de un ajuste de parámetros para conseguir coherencia en el comportamiento o tendencia del patrón de flujo en el dominio de estudio.

En la Figura 25 se muestran las series obtenidas con el Delft3D utilizando dos puntos de forzamiento (línea azul) y un forzamiento uniforme a lo largo de la frontera norte (línea roja), comparado con las series de hindcast (línea negra) para los 10 puntos presentados en la Figura 23. El punto 1, mostrado en la Figura 25 (a) corresponde a un punto ubicado en la posición de la boya Akuará y presenta un comportamiento similar al del punto 4 (Figura 25 (d)), también ubicado en la zona más abrigada del dominio (razón por la cual se considera que sus resultados son diferentes a los de los otros puntos). Por su parte, en los puntos 6 (Figura 25 (f)) y 7 (Figura 25 (g)), ubicados en la zona centro-sur del dominio, se observa que los resultados de las ejecuciones con Delft3D tienen magnitudes menores a los datos de “hindcast”. Finalmente, en los puntos 2,3,5,8,9 y 10 (Figura 25 (b), (c), (e), (h), (j) e (i), respectivamente). Los resultados sugieren que la ejecución con un solo forzamiento presenta un mejor ajuste en comportamiento y magnitud respecto a los datos de “hindcast”, que la ejecución con dos forzamientos. Por todo lo anterior, se utilizará un forzamiento uniforme en los escenarios a evaluar.

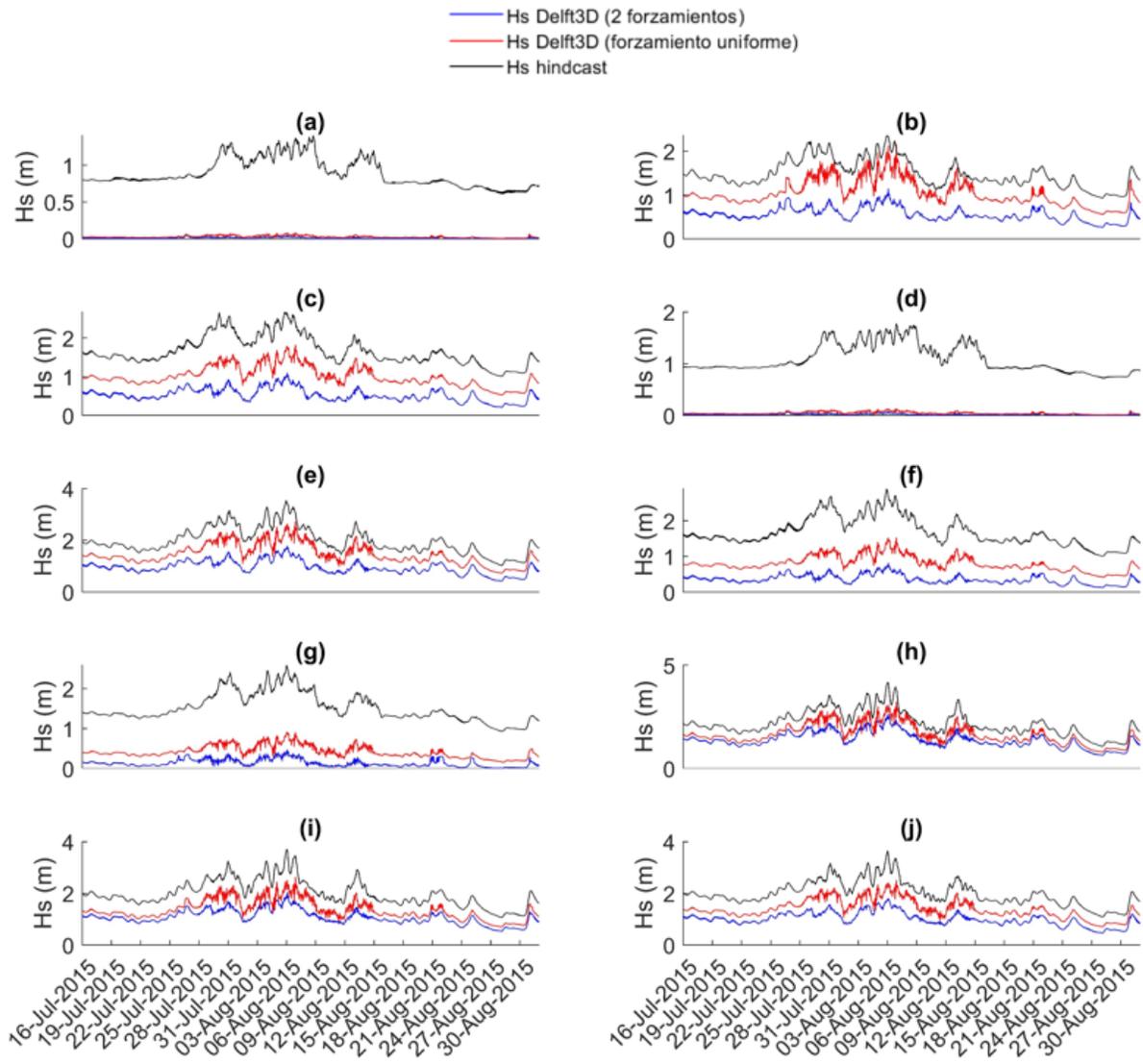


Figura 25. Resultados Delft3D vs hindcast. (a) Punto 1 (Akuará). (b) Punto 2. (c) Punto 3. (d) Punto 4. (e) Punto 5. (f) Punto 6. (g) Punto 7. (h) Punto 8. (i) Punto 9. (j) Punto 10.

9. Selección de escenarios presentes y futuros

En el presente estudio, un escenario a simular en el Delft3D está definido por las siguientes variables de forzamiento en la frontera norte del dominio: altura de ola significativa (H_s), período de pico (T_p), dirección del oleaje (Dir), marea astronómica (MA), marea meteorológica (MM) y posible aumento del nivel medio del mar (SLR). Donde la suma de MA, MM y SWL se convierten en el nivel del mar inicial (WL) que se le ingresa al modelo.

Para dar cumplimiento al objetivo específico número 2, es necesario definir los escenarios presentes y futuros de interés que se simularían con el Delft 3D para realizar los análisis posteriores. Para tal fin se realizó un análisis estadístico de los datos de “hindcast” que permitiera determinar los comportamientos típicos de estas variables en el presente y, las magnitudes que se espera que puedan tomar en un horizonte futuro de 100 años. En las siguientes secciones se explica la metodología que se aplicó para la definición de los

diferentes escenarios, se presenta el proceso de selección de los forzamientos y se resumen los escenarios elegidos.

9.1. Selección de forzamientos de oleaje para escenarios presentes

En primer lugar, teniendo en cuenta los hallazgos de la calibración, se definió que el Deflt3D sería forzado con una condición uniforme en la frontera norte del dominio. Para definir los parámetros del oleaje que conformarían los escenarios a analizar, se determinaron las direcciones más probables con las que llegan las olas a la frontera norte. Para ello se construyó una tabla de estadísticos básicos de H_s discriminados en 16 grupos de direcciones (ver Tabla 2). En esta tabla se presentan, para cada dirección, su respectiva probabilidad de ocurrencia y los cuantiles de H_s del 50%, 90%, 99%, así como el valor de H_{s12} . Cabe aclarar que H_{s12} corresponde a la H_s que únicamente es superada durante 12 horas al año y es equivalente al cuantil del **99.86%**. En la Tabla 2 se observa que la dirección **NE** es la más típica, con una probabilidad de ocurrencia del **52.24%**, seguida de la dirección **ENE** con una probabilidad del **36.61%**. Estas dos direcciones representan el **88.85%** de la probabilidad de ocurrencia direccional de H_s en la frontera norte del dominio, razón por la cual se seleccionarán como las dos direcciones del oleaje a utilizar como forzamiento en los escenarios que se analizarán en este estudio.

Tabla 2. Estadísticos básicos de H_s por dirección.

direcciones(°)	prob.direccion	$H_{s_{50\%}}$	$H_{s_{90\%}}$	$H_{s_{99\%}}$	$H_{s_{12}}$
N	0.00	0.94	1.02	1.04	1.04
NNE	0.04	1.17	2.61	3.59	3.92
NE	0.52	1.85	3.31	4.39	4.86
ENE	0.36	1.78	2.80	3.56	4.22
E	0.05	1.06	1.83	2.90	3.18
ESE	0.00	0.72	1.91	2.01	2.01
SE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SSE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
S	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SSW	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SW	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
WSW	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
W	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
WNW	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
NW	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
NNW	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Para cada una de las direcciones seleccionados se decidió construir como máximo 4 tipos de escenarios diferentes con los que se llevarán a cabo los análisis posteriores:

- Un escenario presente en condiciones medias.
- Un escenario presente en condiciones extremas.
- Un escenario futuro en condiciones extremas, considerando un valor de H_s para un período de retorno de 100 años.

- Un escenario futuro en condiciones extremas, considerando un valor de H_s para un período de retorno de 100 años y un aumento de nivel del mar por cambio climático.

Con base en la Tabla 2, se eligió el cuantil de H_s del 50% de cada una de las dos direcciones más probables, como el valor de H_s representativo de las condiciones medias de esta variable, ya que existe un **50%** de probabilidad tanto de excederlo como de no excederlo. Así mismo, se seleccionó el valor de H_{s12} como el valor representativo de condiciones extremas típicas de H_s para los escenarios presentes. Mientras tanto, para la selección de los valores de H_s correspondientes a los escenarios futuros, se utilizó el régimen extremal de esta variable. El régimen extremal de H_s corresponde al ajuste de una función de probabilidad de valores extremos a los valores más altos de la serie de H_s que se tiene en la frontera de forzamiento. Para realizar este ajuste, se seleccionaron los valores extremos de la serie de H_s mediante el **método POT (Peak Over Threshold)**, también conocido como método de excedencias sobre un umbral, definiendo el valor de H_s de **4.19 m** como el umbral inferior de los extremos; es decir, el valor a partir del cual un valor de H_s se considera extremo.

En este caso, la serie de valores extremos de H_s se ajustó a una función **GEV (General Extreme Value, ver ecuación 10)**, tal como se muestra en la Figura 26, donde los puntos negros son los valores extremos de H_s , la línea azul es la distribución **GEV** ajustada y las líneas negras son los intervalos de confianza del **90%** obtenidos para este ajuste. En este caso cada valor de H_s tiene asociado un período de retorno, equivalente a una determinada probabilidad de ocurrencia. Así, mayores valores de periodo de retorno están asociados a probabilidades de ocurrencia más bajas y, por ende, a valores de H_s más extremos. Dado que los escenarios futuros se quieren plantear a un horizonte de **100 años**, se leyó H_s para el período de retorno de **100 años**. Cabe aclarar que, en lugar de leer H_s sobre el ajuste (línea azul de la Figura 26), se leyó sobre el intervalo de confianza superior, buscando asumir una posición conservadora, con lo cual se encontró un H_s de **5.65 m**. Este valor de H_s se asignó a los escenarios futuros de la dirección **NE**, que, como se observa en la Tabla 2, es la dirección que presenta las alturas de ola mayores. Por otro lado, para definir el valor de H_s futuro para la dirección **ENE**, se disminuyó el valor de **5.65 m**, leído para el período de retorno de **100 años**, en un **15%**. Esta reducción del **15%** se definió calculando el porcentaje medio en el que las alturas de ola de la dirección **ENE** disminuyen respecto a las alturas de ola de la dirección **NE**, de acuerdo con los cuantiles presentados en la Tabla 2. En la Tabla 3 se presentan todos los valores de H_s definidos para los diferentes escenarios planteados.

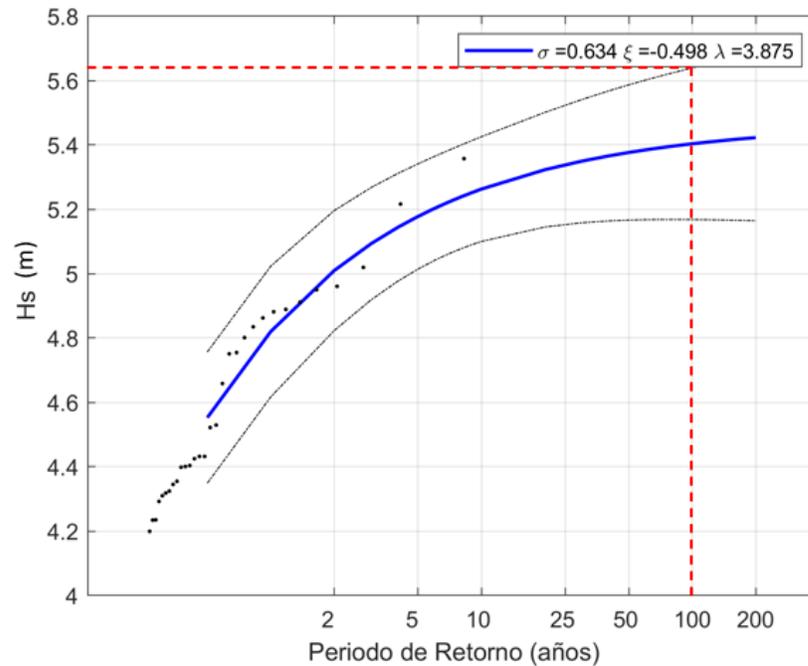


Figura 26. Régimen extremal de H_s realizado con base en el método **POT** (Peak Over Threshold).

$$H_s = \lambda - \frac{\sigma}{\xi} \left[1 - \left(-\ln \left(e^{-1/T_r} \right) \right)^{-\xi} \right] \quad (10)$$

Donde, λ es el parámetro de localización de la GEV, ξ es el parámetro de forma de la GEV y σ es el parámetro de escala de la GEV.

Después de definir los valores de H_s y dirección a utilizar en los diferentes escenarios, se pasó a definir los valores del período de pico (T_p) para cada caso. Dado que la altura de ola significativa y el período de pico del oleaje son dos variables físicas estrechamente relacionadas, se construyó un gráfico de “scatter plot” de H_s vs. T_p en el punto de forzamiento, y se ajustó una función que permite estimar un valor T_p correspondiente a cada uno de los valores de H_s definidos para los diferentes escenarios. El “scatter plot” y la función mencionados se presentan en la Figura 27. Los valores de T_p encontrados para los diferentes escenarios se presentan en la Tabla 3.

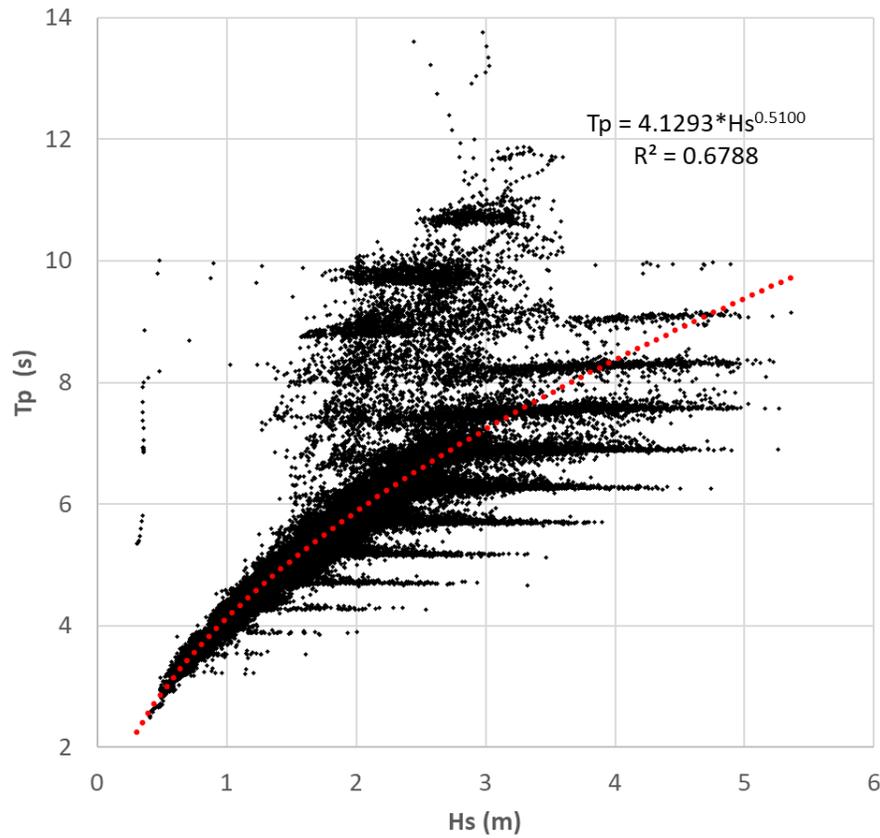


Figura 27. Scatter Plot de H_s vs. T_p en el punto de forzamiento.

9.2. Selección de forzamientos de nivel del mar para escenarios presentes y futuros

Después de determinar los parámetros del oleaje que se utilizarían como forzamiento en los diferentes escenarios que se desea analizar, se pasó a definir los valores de la marea astronómica (MA), marea meteorológica (MM) y posible nivel aumento de nivel del mar (SLR) necesarios para definir el nivel del mar total (WL) a introducir en el modelo durante cada escenario a modelar. La marea astronómica se definió como un parámetro constante para todos los escenarios a modelar y su valor se determinó como un medio de la carrera de marea más probable identificada en el histograma de carreras de marea (ver Figura 19). Respecto a la marea meteorológica, se decidió que en los escenarios presentes de condiciones medias esta tendría un valor de 0.0 m. Para definir los valores de la marea meteorológica en los escenarios tanto presentes como futuros en condiciones extremas, se analizó el régimen extremal de esta variable (ver Figura 28). Para los escenarios presentes en condiciones extremas se tomó el valor de marea meteorológica del período de retorno de 2 años. Para los escenarios futuros en condiciones extremas se tomó el período de retorno de 100 años, leído sobre el intervalo de confianza superior, al igual que como se hizo para H_s , ya que en esta zona el ajuste del régimen extremal tiene asociada una incertidumbre mucho mayor.

Cabe aclarar que la función ajustada a los valores extremos de la marea meteorológica también es una **General Extreme Value** (ver ecuación 2) y, este ajuste se realizó mediante el método POT, utilizando como umbral el cuantil del 99.7% de la marea meteorológica (0.071 m), ya que este es el que permitió un mejor ajuste. Por otro lado, para los escenarios futuros

en los que se desea tener en cuenta el posible efecto del aumento del nivel del mar, se asumió un valor de SLR de 0.36 m para un horizonte de 100 años, tomando como referencia el aumento promedio de 3.6 mm/año que reportan los expertos para la región del Caribe (Cortés, *et al.*, 2020). Los valores de MA, MM y SLR definidos para todos los escenarios a simular en Delft3D se presentan en la Tabla 3.

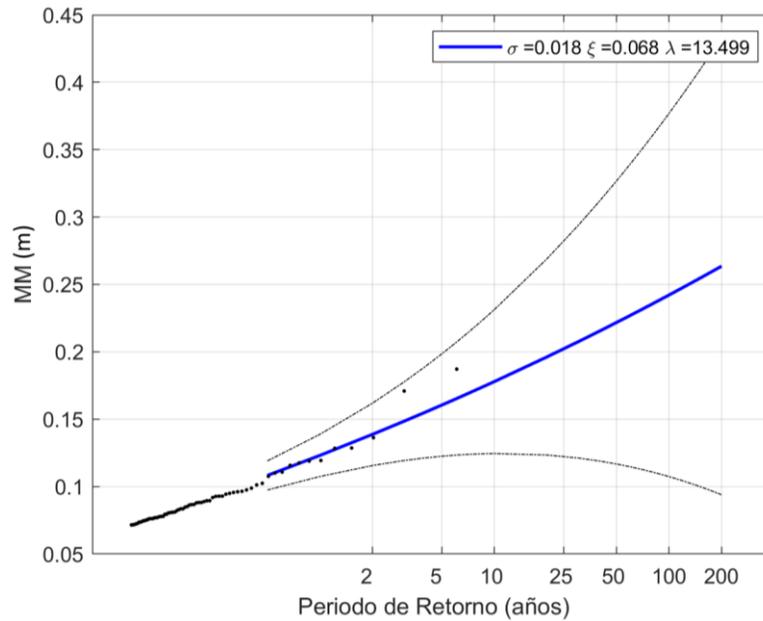


Figura 28. Régimen extremal de marea meteorológica (MM).

$$MM = \lambda - \frac{\sigma}{\xi} \left[1 - \left(-\ln \left(e^{-1/Tr} \right) \right)^{-\xi} \right] \tag{11}$$

9.3. Resumen de escenarios propuestos

De acuerdo con los procedimientos descritos en las secciones 9.1 y 9.2, se definieron los 7 escenarios que se presentan en la Tabla 3. En esta tabla se presenta la descripción básica de cada escenario propuesto junto con los parámetros de forzamiento de oleaje y nivel del mar que le corresponden. Cabe recordar que, de acuerdo con los resultados obtenidos en el proceso de calibración del Delft3D, todos estos forzamientos serán introducidos en un único punto de la frontera norte del dominio, con lo cual el modelo asumirá una condición uniforme a lo largo de toda esta frontera, ya que, después de probar diferentes configuraciones con múltiples puntos de forzamiento, se encontró que el modelo tenía un mejor comportamiento cuando se utilizaba un único forzamiento uniforme.

Tabla 3. Tabla resumen de escenarios propuestos.

Escenario	Descripción	Dir [°]	Hs [m]	Tp [s]	MA [m]	MM [m]	SLR [m]	WL [m]
A	Presente medio	45	1.9	5.7	0.06	0.00	0.00	0.06
B	Presente extremo	45	4.9	9.3	0.06	0.13	0.00	0.19
C	Futuro (Proyección oleaje únicamente)	45	5.7	10.0	0.06	0.13	0.00	0.19
D	Futuro (SLR+ Proyección oleaje)	45	5.7	10.0	0.06	0.38	0.36	0.80
E	Presente medio	67.5	1.8	5.6	0.06	0.00	0.00	0.06
F	Presente extremo	67.5	4.2	8.6	0.06	0.13	0.00	0.19
G	Futuro (SLR+ Proyección oleaje)	67.5	4.8	9.2	0.06	0.38	0.36	0.80

10. Resultados y análisis de escenarios propuestos

Después de configurar y ejecutar los 4 escenarios presentes y los 3 escenarios futuros propuestos se procedió a procesar los resultados obtenidos con el acople de los módulos WAVE y FLOW del Delft3D. A continuación, se presentan los resultados de dichos escenarios y se analizan los cambios que sufre la altura de ola significativa y la dirección del oleaje entre los escenarios presentes y futuros.

10.1. Resultados escenarios presentes

En la Figura 29 se presentan los resultados de los 4 escenarios representativos de las condiciones presentes de oleaje y nivel del mar en el Golfo de Urabá, correspondientes a los escenarios A, B, E y F mostrados previamente en la Tabla 3. Los escenarios presentes en condiciones medias para las direcciones NE y ENE se presentan en la Figura 29 (a) y (b), respectivamente. Del mismo modo, los escenarios presentes en condiciones extremas para las direcciones NE y ENE se presentan en la Figura 29 (c) y (d), respectivamente.

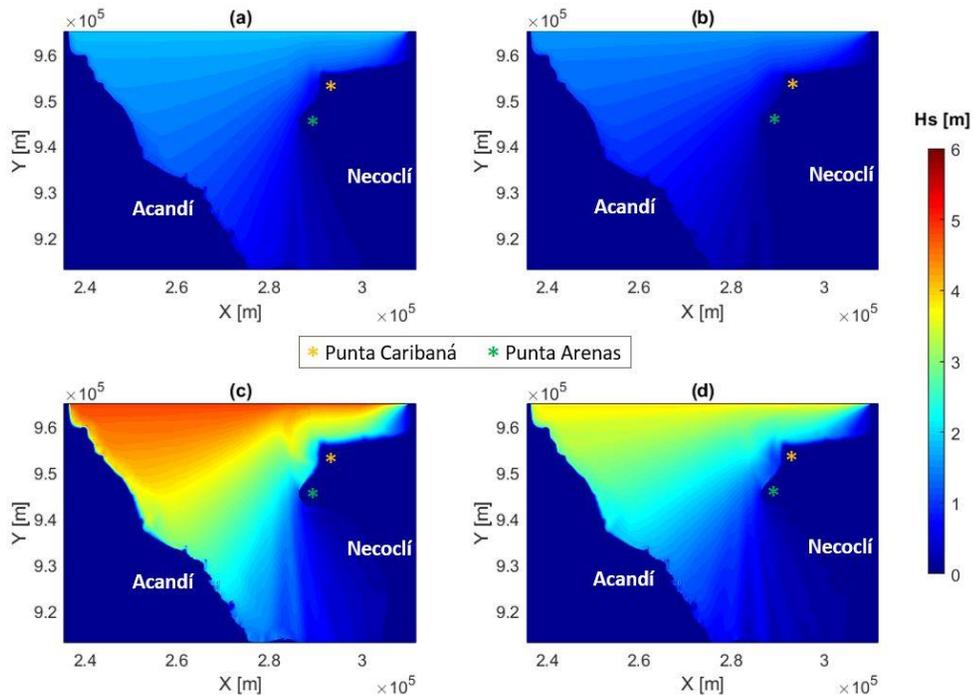


Figura 29. Resultados de Hs tras modelado numérico en Delft3D de escenarios presentes propuestos. (a) Resultados escenario A. (b) Resultados escenario E. (c) Resultados de escenario B. (d) Resultados escenario F.

En la Figura 29 (a) y (b), correspondientes a los escenarios A y E, se observa que el oleaje proveniente de las direcciones **NE** y **ENE** generan un patrón similar en el avance del frente de olas. Adicionalmente, los resultados denotan que en condiciones medias la magnitud de altura significativa de ola se mantiene aproximadamente entre 0 y 2 metros a lo largo de todo el dominio, lo cual es consistente con los forzamientos utilizados en estos casos. Por otro lado, en la Figura 29 (c) y (d), correspondientes a los escenarios B y F, como era de esperarse, se observa un aumento en las magnitudes de la altura de ola significativa respecto a las condiciones medias, pero en este caso, el patrón de avance de los frentes de oleaje cambia ligeramente entre ambos escenarios según la dirección del forzamiento. Los resultados de los 4 escenarios presentes muestran que la costa sur de Necoclí se encuentra protegida de los oleajes más típicos de la zona (**NE** y **ENE**). Mientras que la costa Oeste del Golfo (Acandí), se encuentra más expuesta a este tipo de oleaje, sobre todo en su zona Norte. Por otra parte, la costa Oeste de Punta Arenas y Punta Caribaná reciben oleajes más energéticos que Necoclí, pero menos energéticos que Acandí.

10.2. Resultados escenarios futuros

En la Figura 30 (a), (b) y (c) se presentan los resultados de los 3 escenarios futuros propuestos (C, D y G, respectivamente), mostrados previamente en la Tabla 3. Los resultados presentados en la Figura 30 (a) y (b) están asociados la dirección predominante del oleaje (**NE**) y muestran mayores magnitudes de H_s en el dominio si se comparan con los resultados asociados a la dirección **ENE**, mostrados en la Figura 30 (c), lo que es consistente con los forzamientos utilizados en cada caso. En la Figura 30 (a) y (b) se observa un pico en la zona noreste con concentraciones de grandes magnitudes de H_s , este comportamiento local podría asociarse a la batimetría de la zona, sin embargo, también podría tratarse de una anomalía generada al no contar con una batimetría de detalle, pues tal como se mostró en la Figura 7, fue necesario realizar una interpolación batimétrica y, justamente la zona noreste se tenían datos con una resolución espacial baja. También, en la Figura 30 (a) y (b) se observa un comportamiento muy similar tanto en el patrón de avance del oleaje como en sus magnitudes. En la sección 10.3 se realizará la comparación de resultados para determinar con exactitud las diferencias entre los escenarios analizados.

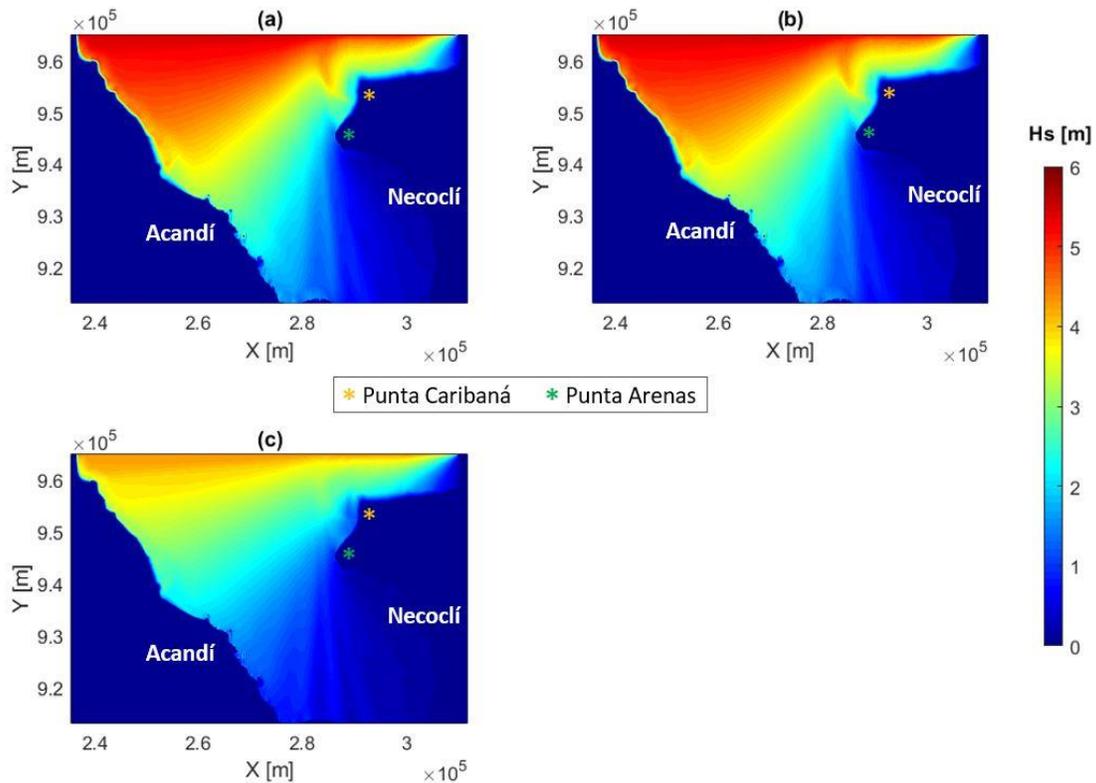


Figura 30. Resultados de H_s tras modelado numérico en Delfi3D de escenarios futuros propuestos. (a) Resultados de escenario C. (b) Resultados de escenario D. (c) Resultados de escenario G.

10.3. Comparación de escenarios presentes y futuros

Hasta ahora se han presentado los resultados de los escenarios presentes y futuros de forma independiente. En esta sección se realizará la comparación de los diferentes escenarios propuestos, para esto se tomaron como referencia los escenarios A y E, correspondientes a los escenarios presentes en condiciones medias para las direcciones **NE** y **ENE**, respectivamente. Luego, se calculó la razón o división entre las H_s de los demás escenarios y las H_s del escenario de referencia de su misma dirección (**NE** o **ENE**). Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 31.

En la Figura 31 (a) se muestra el mapa de la razón o división entre los valores de H_s del escenario presente extremo (B) y el presente medio (A), ambos correspondientes a la dirección **NE**. Del mismo modo, en la Figura 31 (b) se presenta la razón de H_s obtenida entre el escenario futuro D y el escenario A, asociados a la dirección **NE**. Por otra parte, en la Figura 31 (c) y (d) se presentan los mapas de razón para escenarios de la dirección **ENE**, tomando como referencia el escenario presente de condiciones medias (E). La Figura 31 (c) corresponde a la razón entre las H_s del escenario presente extremo (F) y las H_s del presente medio (E). Finalmente, en la Figura 31 (d) se tiene la razón de H_s entre el escenario futuro G y el escenario presente medio de la dirección **ENE** (E).

En la comparación de resultados se encontró que en todos los casos hubo un aumento de H_s respecto al escenario de referencia (presente medio), pues la razón representada en los

diferentes mapas de la Figura 31 es siempre mayor que 1. Hasta ahora, en los resultados independientes de los escenarios presentes y futuros (Figura 29 y Figura 30), se destacaban las mayores magnitudes de H_s en la zona Oeste del dominio (Acandí). Sin embargo, al analizar la razón de H_s en los escenarios evaluados respecto a las condiciones medias del presente, se encuentra que la zona más impactada sería Necoclí, ubicado en la zona Sur-Este del dominio, tal como se observa en la Figura 31, donde los mayores cambios se dan en los puntos 1 (coincidente con la localización de la boya Akuará) y 4. Si bien estos serían los puntos con mayores incrementos de H_s , también es importante destacar que en el resto del dominio se encuentra que, ante todos los escenarios evaluados la H_s podría aumentar entre 2 y 3 veces respecto al escenario medio del presente. Aunque frente a Necoclí es donde se encuentran mayores incrementos de H_s , es importante tener en cuenta que los grandes aumentos que se dan en la zona más próxima a la costa de este municipio podrían estar asociados a anomalías numéricas relacionadas con los contornos batimétricos en el dominio y, por ende, pueden no obedecer a un aumento real.

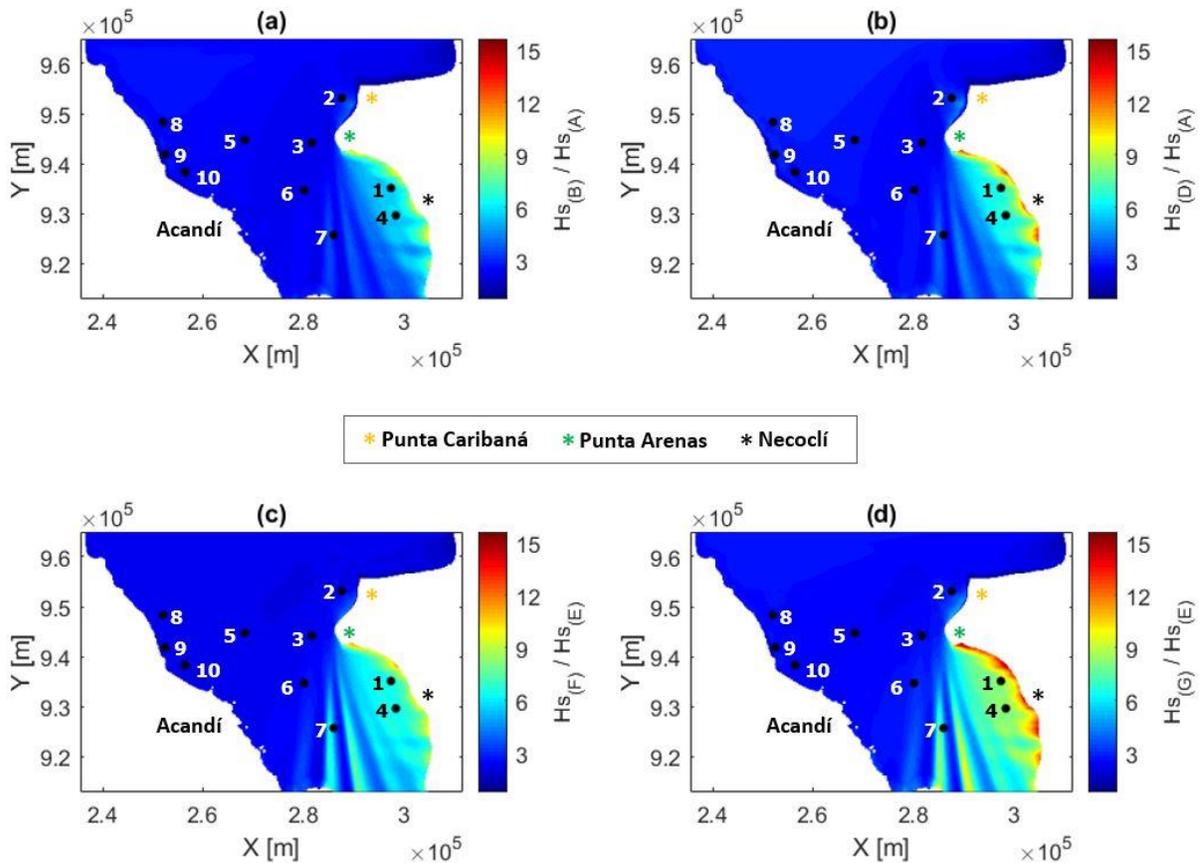


Figura 31. Razón entre H_s de escenarios evaluados y H_s de escenario presente en condiciones medias. (a) Razón entre H_s escenario B y H_s escenario A. (b) Razón H_s escenario D y H_s escenario A. (c) Razón H_s escenario F y H_s escenario E. (d) Razón H_s escenario G y H_s escenario E.

Para complementar los análisis realizados a partir de la Figura 31, en la Tabla 4 se presentan las razones entre los valores de H_s encontrados para los diferentes puntos de control en los escenarios estacionarios A, B, C y D. En la primera columna de la Tabla 4 se numeran los 10 puntos de control que se utilizarán para el análisis, que corresponden a los

mismos puntos presentados en la Figura 23. En la segunda columna de la Tabla 4 se presentan los valores de H_s obtenidos en el escenario A para los 10 puntos de control. En las columnas 3, 4 y 5 se presentan, respectivamente, las razones definidas por los valores de H_s encontrados en los escenarios B, C y D divididos entre el valor de H_s obtenido en el escenario A. Una razón mayor a 1 en las columnas 3, 4 o 5 de la Tabla 4 indica H_s sufre un aumento en los escenarios B, C o D respecto a la condición del escenario A, es decir, respecto a las condiciones medias presentes. Una razón menor que 1 indica que H_s disminuye respecto a las condiciones medias presentes. Mientras tanto, una razón igual a 1 significa que H_s en el escenario y punto evaluados se mantiene igual que en el escenario A. Como se puede observar en la Tabla 4, todas las razones encontradas son mayores a 1 e incluso, mayores a 2, lo que quiere decir que en los escenarios B, C y D siempre se ha incrementado el valor de H_s respecto al escenario A en todos los puntos de control, siendo este incremento en todos los casos mayor a un 50%.

Al comparar los diferentes escenarios de la dirección **NE** en los 10 puntos de control seleccionados (puntos presentados en la Figura 31). En esta tabla se observa que en el escenario B (presente en condiciones extremas) H_s es entre 2.30 y 5.72 veces mayor que en el escenario A (presente en condiciones medias). Esto quiere decir que la zona de estudio en el presente ya experimenta valores de H_s muy superiores a las condiciones medias durante eventos extremos. Sin embargo, el incremento de H_s es significativamente mayor bajo los escenarios futuros propuestos para un período de retorno de 100 años. En consistencia con los resultados mostrados en la Figura 31, se tiene que los puntos 1 y 4 ubicados frente a la zona Sur de Necoclí son los que experimentan los incrementos más drásticos en H_s , pese a estar en la zona más abrigada del dominio. Por otro lado, en la Tabla 4 se evidencia que los escenarios C y D conducen exactamente al mismo resultado de aumento de H_s en todos los puntos, algo que ya se esperaba al observar la Figura 30. Esto significa que el aumento del nivel del mar propuesto para el escenario futuro D no afecta en este caso la propagación de la altura de ola significativa en la zona de estudio. En el Anexo F se presenta una tabla análoga (Tabla 9) para los escenarios analizados en la dirección **ENE**, en la cual se evidencia la misma tendencia de aumento en todos los escenarios, alcanzando incluso aumentos de H_s superiores a los encontrados para la dirección **NE**. Cabe resaltar que se analizó el período de pico en los puntos de control, encontrando que solo presentaba cambios de aproximadamente 0.1 segundos respecto al período de pico de forzamiento, por lo cual no se ahondó en más análisis con esta variable.

Tabla 4. Razón entre H_s de escenarios estacionarios (NE) evaluados y H_s de escenario estacionario presente (NE) en condiciones medias, para los 10 puntos de control seleccionados.

Punto	$H_{s(A)}$ [m]	$H_{s(B)} / H_{s(A)}$	$H_{s(C)} / H_{s(A)}$	$H_{s(D)} / H_{s(A)}$
1	0.0	5.7	6.9	6.9
2	0.9	3.0	3.4	3.4
3	1.0	2.3	2.4	2.4
4	0.0	5.7	6.8	6.8
5	1.3	2.5	2.7	2.7
6	0.8	2.5	2.7	2.7
7	0.4	2.9	3.1	3.1
8	1.5	2.6	2.9	2.9
9	1.2	2.7	2.9	2.9
10	1.3	2.3	2.6	2.6

En la Tabla 5 se presentan las diferencias entre las direcciones del oleaje obtenidas en los escenarios B, C y D, respecto al escenario A, para los 10 puntos de control. Todos los escenarios presentados en la Tabla 5 fueron forzados con oleajes provenientes de la dirección NE, sin embargo, en los 10 puntos de control se observan cambios en la dirección del oleaje. Por otro lado, las diferencias direccionales obtenidas entre los casos C y D respecto al A son las mismas, es decir que, el aumento del nivel del mar considerado no afecta el comportamiento direccional del oleaje en la zona de estudio. Teniendo en cuenta lo anterior, se puede afirmar que la magnitud de H_s afecta la dirección del oleaje durante su propagación.

Tabla 5. Diferencia entre dirección del oleaje en escenarios (NE) evaluados y dirección del oleaje en el escenario presente (NE) de condiciones medias, para los 10 puntos de control seleccionados.

Punto	$Dir_{(A)}$ [°]	$Dir_{(B)} - Dir_{(A)}$	$Dir_{(C)} - Dir_{(A)}$	$Dir_{(D)} - Dir_{(A)}$
1	289.8	-11.3	-12.6	-12.6
2	9.0	330.0	324.6	324.6
3	14.3	-9.1	-11.3	-11.3
4	314.1	-7.2	-8.4	-8.4
5	29.6	-4.6	-5.7	-5.7
6	8.8	-5.3	-6.5	-6.5
7	352.2	-1.3	-2.5	-2.5
8	36.1	-1.0	-1.3	-1.3
9	39.9	4.2	4.5	4.5
10	32.0	4.9	5.4	5.4

10.4. Discusión de resultados

A partir del análisis de los resultados presentados anteriormente se encontró que la marea no tiene en este caso particular una influencia relevante en el comportamiento de los patrones del oleaje en el Golfo de Urabá. Esto puede deberse a que, tanto en el Golfo como en el Caribe colombiano en general se tiene un régimen micromareal que implica rangos de marea pequeños (en este caso alrededor de 40 cm), los cuales no generan corrientes ni alteraciones hidrodinámicas importantes que puedan afectar la propagación del oleaje al interior del Golfo con la batimetría que se tiene en la zona de estudio. Estos hallazgos son consistentes con Escobar (2011), quien, utilizando Delft3D encontró que el forzamiento de la marea en el Golfo de Urabá tiene un efecto poco relevante en la hidrodinámica de la zona, específicamente en lo relativo a las corrientes.

Además, Escobar (2011) encontró que, en condiciones medias durante la época seca del año, las variables que más influyen en la hidrodinámica del Golfo de Urabá son las corrientes de densidad y la descarga del río Atrato (variables que no fueron analizadas en el presente estudio). Sin embargo, en el trabajo realizado por Escobar (2011) también se concluye que, bajo condiciones hidrometeorológicas extremas, otros procesos hidrodinámicos pueden cobrar más relevancia, como por ejemplo el oleaje, que es una de las variables en las que se enfocó el presente estudio, precisamente para la evaluación de posibles escenarios extremos.

Por otro lado, los resultados del trabajo permiten confirmar que los oleajes más típicos que pueden llegar al Golfo de Urabá son los que provienen del Noreste, siendo estos los oleajes más probables y también los más energéticos. Esto es consistente con las direcciones típicas del oleaje encontradas por Sánchez & Sipión (2020) y Osorio *et al.* (2009) en el Caribe colombiano y con la forma del continente americano en esta zona, donde el Noreste y el Este son las únicas direcciones en las que se tienen aguas abiertas al océano Atlántico. En el presente estudio, además, se encontró estos oleajes dominantes del Noreste ingresan al Golfo de Urabá por el Norte y sufren poca disipación antes de llegar a la costa de Acandí (Chocó). Mientras tanto, estos algunos de estos oleajes que vienen del Noreste también se pueden propagar a lo largo de la zona de estudio, donde luego sufren transformaciones significativas en magnitud y dirección por efectos de refracción y difracción alrededor de Punta Arenas, por lo que finalmente llegan con poca energía a la costa de Necoclí. Pese a llegar con menos energía a Necoclí, la simulación de posibles escenarios futuros permitió evidenciar que, para un horizonte de 100 años, Necoclí es la zona que puede sufrir mayores incrementos de altura en la zona de estudio.

Por otro lado, Sánchez & Sipión (2020) evaluaron también las variaciones estacionales que tienen las diferentes variables hidrodinámicas en el Golfo de Urabá, esta variabilidad estacional no se analizó en el presente estudio, pero se considera relevante de cara a posibles investigaciones futuras. Adicionalmente, cabe resaltar que, pese a que en este estudio el aumento del nivel del mar en sí mismo mostró no generar alteraciones importantes de las variables hidrodinámicas analizadas en la escala espacial utilizada para las simulaciones y análisis, esto no permite evaluar qué efectos podría generar este aumento de nivel a escalas de análisis más finas y locales en las zonas costeras, donde las profundidades son mucho menores y los procesos hidrodinámicos son más complejos, ya que para ello se requerirían batimetrías y estudios de mayor detalle.

11. Conclusiones

En el análisis hidrodinámico basado en los datos de “*hindcast*” se encontró que la dirección predominante del oleaje que llega al Golfo de Urabá es la dirección Noreste, con una probabilidad de ocurrencia del **52%**. Adicionalmente, esta es también la dirección dominante, es decir, de la que provienen los oleajes más energéticos. Esta dirección, sumada a la morfología del Golfo, propicia que Acandí, Chocó, sea el lugar que experimenta mayores alturas de ola significativa frente a sus costas dentro de la zona de estudio. Mientras que la zona Sur de Necoclí se encuentra protegida de los oleajes más típicos (**NE** y **ENE**).

Pese a que la dirección **NE** es la más probable y la que tiene asociadas las alturas de ola significantes más energéticas en la frontera norte de la zona de estudio, la dirección **ENE** es la que puede generar mayores incrementos de *H_s* bajo los escenarios futuros planteados. Es decir, que los oleajes **ENE** en el futuro podrían generar mayores impactos sobre la costa sur de Necoclí que los que generan en el presente. Esto es relevante teniendo en cuenta que los oleajes de esta dirección son los que llegan al Golfo de Urabá el 37% del tiempo.

A partir del análisis realizado de los registros de los mareógrafos de Cartagena, Coveñas, Sapzurro y Turbo, se encontró que la interacción de la marea con morfología del terreno y la batimetría compleja del Golfo de Urabá genera alteraciones en esta variable, pues se evidenció que el nivel del mar registrado por el mareógrafo de Turbo (ubicado en la zona Sur del Golfo de Urabá), pese a no sufrir desfases temporales respecto a los demás registros, sí presenta deformaciones singulares que no se dan en los demás instrumentos de medición analizados.

En los escenarios futuros propuestos se encontraron variaciones en el comportamiento del oleaje en términos de altura de ola significativa y dirección frente a las costas de Acandí y Necoclí. Estos hallazgos pueden ser un punto de partida importante para futuros estudios, ya que las variaciones de estos parámetros del oleaje podrían propiciar: el aumento del potencial erosivo, el riesgo de inundación costera, alteraciones en la morfodinámica de las zonas litorales aledañas y afectaciones sobre los ecosistemas marino-costeros de la zona.

12. Trabajo futuro

Durante el desarrollo del presente trabajo se encontraron varias líneas posibles de trabajo futuro que podrían servir de base para nuevos estudios en el Caribe colombiano, especialmente en el Golfo de Urabá. A continuación, se describen las posibles líneas de trabajo futuro:

La morfología del Golfo de Urabá induce a procesos complejos de reflexión – difracción, los desarrolladores del Delft3D afirman que, para resolver adecuadamente la difracción, la malla debe tener 10 celdas por longitud de onda, es decir, que para el presente estudio se requeriría un tamaño de celda aproximado de 5 m, lo cual era inviable en términos computacionales. Además, durante el proceso de calibración del modelo se identificó que el Delft3D es sensible al tamaño de celda de la malla y al paso de tiempo de cálculo (time step), por lo tanto, disminuir el tamaño de las celdas a valores muy pequeños respecto al tamaño del dominio, puede generar inestabilidades numéricas. Por todo lo anterior, una línea de trabajo futuro podría asociarse a un análisis de sensibilidad robusto implementando el modelo Delft3D-WAVE o SWAN para analizar la relación entre el tamaño de celda y la solución de la difracción.

Contar con un sistema de monitoreo robusto y continuo en el tiempo de las variables hidrodinámicas al interior del Golfo de Urabá, permitiría realizar estudios de mayor detalle en esta zona. Por ejemplo, se podrían mejorar los procesos de calibración y validación de modelos como el Delft3D o caracterizar los diferentes fenómenos hidrodinámicos de interés con información de campo. Para este propósito sería fundamental contar también con batimetrías de mejor resolución espacial.

De acuerdo con los resultados obtenidos en el análisis hidrodinámico del nivel del mar a partir de los registros de los mareógrafos de Cartagena, Coveñas, Sapzurro y Turbo, se identificó la importancia de llevar a cabo un estudio más profundo de los cambios que puede experimentar la marea al ingresar al Golfo de Urabá.

De acuerdo con la revisión de la literatura, se encontró que el Golfo de Urabá requiere estudios enfocados a analizar el impacto de las intervenciones antrópicas sobre la hidrodinámica de la zona. Debido a que para el presente estudio no se contaba con batimetrías de detalle, no fue posible incorporar este análisis. Por lo tanto, esto constituye una línea de trabajo futuro importante para la zona.

13. Bibliografía

- Agencia Europea de Medio Ambiente. (08 de 10 de 2015). *El cambio climático y el mar*. Obtenido de Agencia Europea de Medio Ambiente: <https://www.eea.europa.eu/es/senales/senales-2015/articulos/el-cambio-climatico-y-el-mar#:~:text=El%20cambio%20clim%C3%A1tico%20est%C3%A1%20causando,la%20p%C3%A9rdida%20de%20biodiversidad%20marina>
- Aguilar, C. (2016). *Modelado hidrodinámico de la Flecha de El Rompido y su entorno*. Trabajo de fin de máster, Sevilla.
- Alcaldía Municipal de Necoclí. (2016). *Plan de desarrollo municipal 2016-2019 "por un buen gobierno"*. Urabá, Antioquia.
- Arcadis Nederland BV, Royal Haskoning DHV, Deltares, Fundación Herencia Ambiental Caribe, JESyCA S.A.S, Aqua y Terra, & Universidad del Norte. (2017). *Plan maestro de erosión costera - Colombia*. Colombia.
- Avella, F., Osorio, A., Parra, E., Burgos, S., Vilardy, S., Botero, C., . . . Mojica, D. (2009). Gestión del litoral en Colombia. Reto de un país con tres costas. Libro. In I. (CYTED), *Manejo Costero Integrado Y Política Pública en Iberoamérica: un diagnóstico. Necesidad de cambio* (pp. 175-210).
- Barrera, P. D. (2016). *Delft3D flexible Mesh modelling of the Guayas River and Estuary system in Ecuador*. Trabajo de fin de máster, Delft University of Technology & National University of Singapur.
- Bustamante, D. (2017). Escenario de cambio climático a nivel de subcuencas hidrográficas para el año 2050 de la provincia de Chimborazo-Ecuador. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*, 15-27. doi: <http://doi.org/10.17163/lgr.n26.2017.02>
- Cámara de Comercio del Chocó. (2017). *Una mirada a la dinámica económica del Chocó durante el año 2017 desde la Cámara de Comercio*. Chocó.
- Ceballos, C. (2004). Distribución de playas de anidación y áreas de alimentación de tortugas marinas y sus amenazas en el Caribe colombiano. *Boletín de Investigaciones Marinas y costeras*, 79-99.
- Cepeda, L. (2010). *El Caribe chocoano: riqueza ecológica y pobreza de oportunidades*. Cartagena de Indias: Banco de la República - Sucursal Cartagena.
- Comisión Colombiana del Océano [CCO]. (2015). *Comisión Colombiana del Océano*. Obtenido de Comisión Colombiana de Océano Territorio Maniro Costero: <http://www.cco.gov.co/cco/areas/gestion-del-territorio-marino-costero.html#subsubtitle11>
- CORANTIOQUIA. (2008). *El cambio climático ¿Una caja de pandora?* Medellín.
- Correa, C. A., Etter, A., Díaz, J., Rodríguez, S., Ramírez, W., & Corzo, G. (2020). Spatiotemporal evaluation of the human footprint in Colombia: Four decades of

- anthropic impact in highly biodiverse ecosystems. *Ecological Indicators*, 1-10. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106630>
- Correa, I. D., & Paniagua, J. F. (2015). The Arboletes-Punta Rey Litoral, Southern Caribbean Coast. En S. I. Publishing, *Hermelin M. (eds) Landscapes and Landforms of Colombia. World Geomorphological Landscapes* (págs. 55-63). Springer. doi:10.1007/978-3-319-11800-0_4
- 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*, 33, 7-28.
- Cortés, J., Villamizar, A., Nagy, G., Girot, P., Miglioranza, K., & Villasante, S. (2020). Ecosistemas marino-costeros. In J. Moreno, C. Laguna-Defior, V. Barros, E. Calvo, J. Marengo, & U. Oswald (Eds.), *Adaptación Frente a los Riesgos del Cambio Climático en los Países Iberoamericanos s – Informe RIOCCADAPT* (pp. 131-160). Madrid, España: McGraw-Hill.
- DANE. (2018). *Censo Nacional de Población y Vivienda 2018 - Colombia. Información general Antioquia*. Obtenido de <https://sitios.dane.gov.co/cnpv/#/>
- DANE. (2018). *Censo Nacional de Población y Vivienda 2018 - Colombia. Información general Chocó*. Obtenido de <https://sitios.dane.gov.co/cnpv/#/>
- Deltares. (2020). *Deltares systems - Hydro-Morphodynamics User Manual*.
- Deltares. (2021). *Deltares systems - Functional Description*.
- Deltares. (2021). *Deltares systems - Wave User Manual*.
- Díaz, J. M. (2014). *Colección Ecológica del Banco de Occidente - Región Caribe de Colombia*. I/M Editores. Obtenido de <https://www.imeditores.com/banocc/caribe/>
- Douglass, S. L., Nathan, R. A., & Malyszczek, J. D. (2004). Coastal and Port Engineering. En J. T. Ricketts, M. K. Loftin, & F. S. Merritt, *Standard Handbook for Civil Engineers* (5th ed.). Florida: McGraw-Hill.
- Escobar, C. A. (2011). Relevancia de procesos costeros en la hidrodinámica del Golfo de Urabá (Caribe Colombiano). *Boletín de investigaciones Marinas y Costeras*, 40(2), 327-346.
- Escobar, C. A., & Velásquez, L. (2015). Marine Currents in the Gulf of Urabá, colombian Caribbean sea. *Journal of Coastal Research*, 1-12. doi:10.2112/JCOASTRES-D-14-00186.1
- Escobar, C. A., & Velásquez, L. (2018). Modeling the sediment dynamics in the gulf of Urabá, colombian Caribbean sea. *Ocean Engineering*, 476-487.
- Espinoza, M. E. (2018). *Gulf of Guayaquil Tidal Simulation Using DELFT3D Hydrodynamic Model During An El Niño Event and Normal Conditions*. Guayaquil, Ecuador.

-
- Fenton, J. (2020). *Coastal and Ocean Engineering Course*. Vienna University of Technology, Institute of Hydraulic Engineering and Water Resources Management, Vienna.
- Garijo, C., Mediero, L., & Garrote, L. (2018). Usefulness of AEMET generated climate projections for climate change impact studies on floods at national-scale (Spain). *Ingeniería del agua*, 153-166.
- Gobernación del Chocó. (2016). *Plan de desarrollo departamental del Chocó 2016-2019*.
- Gomis, D., Álvarez, E., Jorda, G., Marcos, M., Aznar, R., Rodríguez, E., . . . Sotillo, M. G. (2016). Regional marine climate scenarios in the NE Atlantic sector close to the Spanish shores. *Scientia Marina*, 215-234.
- Guerra, L. A., & Mancera, J. E. (2015). Evaluación de amenazas antropogénicas en ecosistemas de playa en San Andrés, una isla pequeña del Caribe suroccidental. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 44(1), 33-54.
- Gutiérrez, J. M., & Pons, M. R. (2006). Modelización numérica del cambio climático: Bases científicas, incertidumbres y proyecciones para la Península Ibérica. *Revista C y G*.
- Gyssels, P., Baldissone, M. C., Hillman, G., Rodríguez, A., Bosc, J., Corral, M., . . . Farias, H. D. (2013). Aplicaciones del modelo numérico Delft3D a diferentes problemas hidrosedimentológicos en casos argentinos. *Mécanica Computacional*, XXXII, 2757-2777.
- Higueta, M., & Quintana, R. A. (2020). *Modulación de las corrientes oceánicas en el Golfo de Urabá a partir de la onda de marea*. Trabajo de grado, Universidad de Antioquia, Turbo, Antioquia.
- Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC WGII]. (2014). *Climate Change 2014 Impacts, Adaptation, and Vulnerability Part A: Global and Sectorial Aspects*. New York: Cambridge University Press. Obtenido de <https://www.ipcc.ch/languages-2/spanish/ipcc-en-espanol-publications/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]. (2014). *Cambio Climático 2014 Informe de síntesis Resumen para responsables de políticas*. Obtenido de <https://www.ipcc.ch/languages-2/spanish/ipcc-en-espanol-publications/>
- INVEMAR. (2002). *Áreas de anidación y de alimentación de las tortugas marinas en el Caribe colombiano*. Bogotá, D.C.
- Iñiguez, J. D. (2019). *Soluciones ingenieriles ante la elevación del mar para la implementación de un puerto espacial en la costa ecuatoriana*. Guayaquil, Ecuador.
- Jaramillo, A. (2016). Panorama de la erosión costera en el Golfo de Urabá. Evidencia de la necesidad de un programa de monitoreo costero regional.
- Jaramillo, A. (2016). Panorama de la erosión costera en el Golfo de Urabá. Evidencia de la necesidad de un programa de monitoreo costero regional. 1-16.

- Keyzer, L. M., Herman, P. M., Smith, B. P., Pietrzak, J. D., James, R. K., Candy, A. S., . . . Dijkstra, H. A. (2020). The potential of coastal ecosystems to mitigate the impact of sea-level rise in shallow tropical bays. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1-11. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecss.2020.107050>
- Lacambra, C. L., Lozano, C., Alonso, D. A., & Fontalvo, M. L. (2003). Amenazas naturales y antrópicas en las zonas costeras colombianas. En INVEMAR, *Serie de documentos generales de INVEMAR* (págs. 1-74). Colombia.
- Londoño, G. S., & Murillo, E. M. (2017). *Variabilidad espacio temporal del nivel del mar en la costa del Caribe colombiano*. Trabajo de fin de grado, Universidad de Antioquia, Turbo, Antioquia.
- Marine Energy in Far Peripheral and Island Communities [MERiFIC]. (2014). *Application of numerical models and codes*. University of Plymouth, Plymouth.
- Martín, L., Rivera, J., & Castizo, R. (2018). *Cambio climático y desarrollo sostenible en Iberoamérica 2018 Informe La Rábida, Huelva*. La Rábida.
- McGraw-Hill. (2003). *McGraw-Hill Dictionary of Scientific and Technical Terms* (6th ed.). New York: McGraw-Hill.
- 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. *Avances en Recursos Hidráulicos*(13), 37-54.
- Morelo, G., & Martínez, O. J. (2018). *Influencia de características oceanográficas y sedimentológicas sobre la distribución de microgasterópodos bentónicos en Punta Caribana nororiente del Golfo de Urabá (Necoclí, Colombia), en la época húmera abril/2018 a agosto/2018*. Trabajo de grado, Universidad de Antioquia, Turbo, Antioquia.
- Muñoz, Á. E. (2017). Evaluación económica y social de cuatro municipios liderados por alcaldes en el departamento de Chocó. *Lebret*, 99-117. doi:<http://dx.doi.org/10.15332/rl.v0i9.1952>
- Orejarena, A. F., Sayol, J. M., Marcos, M., Otero, L., Restrepo, J. C., Hernández, I., & Orfila, A. (2019). Coastal Impacts Driven by Sea-Level Rise in Cartagena de Indias. *Frontiers in Marine Science. Coastal Ocean Processes*, 1-16.
- Orejuela, F. (2020). *Modulación de oleaje causado por la construcción de una obra de protección costera utilizando un modelo numérico con mallas no estructuradas. Caso de estudio Puerto Rey - Minuto de Dios*. Trabajo de grado, Universidad de Antioquia, Turbo, Antioquia.
- Osorio, A. F., Mesa, J. C., Bernal, G. R., & Montoya, R. D. (2009). Reconstrucción de cuarenta años de datos de oleaje en el mar Caribe colombiano empleando el modelo WWIII y diferentes fuentes de datos. *Boletín Científico CIOH*, 37-56.
- Osorio, J. D., Osorio, A. F., & Pélaez, D. S. (2017). Ecosystem management tools to study natural habitats as wave damping structures and coastal protection mechanisms.

-
- Ecological Engineering*, 130, 282-295.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.07.015>
- Padilla , S. (2018). *Análisis espectral del oleaje en el litoral antioqueño por medio de modelación numérica*. Trabajo de grado, Universidad de Antioquia, Turbo, Antioquia.
- Rangel, N. (2009). Contribución antropogénica a los cambios geomorfológicos y evolución reciente de la costa Caribe colombiana. *Gestión y Ambiente*, 43-56.
- Reyer, C., Adams, S., Albrecht, T., Baarsch, F., Boit, A., Canales, N., . . . Thonicke, K. (2015). Climate change impacts in Latin America and the Caribbean and their implications for development. *Regional Environmental Change*, 1601-1621.
- Rueda, J. G., Osorio, A. F., & Guzmán, A. (2019). Set-up and input datasets files of the Delft3D model for hydrodynamic modelling considering wind, waves, tides and currents through multidomain grids. *Data in brief*, 1-4.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.104921>
- Ruiz, J. D. (2020). *Cambios hidrodinámicos bajo escenarios de oleaje y presencia de obras costeras, sector río Hobo- Puerto Rey. Caribe colombiano*. Trabajo de grado, Universidad de Antioquia, Turbo, Antioquia.
- Sánchez, H., Bolívar, H. J., Villate, D. A., & Escobar, G. (2019). Influencia de los impactos antrópicos sobre la evolución del bosque de manglar en Puerto Colombia (Mar Caribe colombiano). *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 15(1), 1-16.
- 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*. Trabajo de grado , Universidad de Antioquia, Turbo, Antioquia.
- Silva, R. (2005). *Análisis y descripción estadística del oleaje*. Ciudad de México.
- Támara, N., Obregón, M., Pulgarín, H., Sánchez, L. M., & Alabares, S. C. (2018). Plataforma de avistamiento para tortugas en la playa Bobalito, El lechugal, Necoclí-Antioquia, utilizando iluminación especial y energía alternativa: propuesta de manejo y conservación. *Revista del Sistema de Ciencia, Tecnología e Información*, 85-98.
- Thompson, W. (2020). *BASE*. Obtenido de Beyond the Amphidrome [Figura]: <https://www.base-mag.com/explore/beyond-the-amphidrome>
- Toimil , A., Losada, I., & Camus, P. (2016). Metodología para el análisis del efecto del cambio climático en la inundación costera: aplicación a Asturias. *Ribagua*, 56-65. Obtenido de <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1016/j.riba.2016.07.004>
- Toro, V. G., Mosquera, W., Barrientos , N., & Bedoya , Y. (2019). Circulación oceánica del Golfo de Urabá usando campos de viento de alta calidad. *Boletín científico CIOH*, 38(2), 26-35. doi:10.26640/22159045.2019.516
- Universidad de Antioquia y Gobernación de Antioquia. (2018). *Informe final del proyecto "Investigación para reversión del proceso de erosión en las costas del mar de Antioquia"*. Medellín.

-
- US Army Corps of Engineers [USACE]. (2003). Apendix A - Glossary of Coastal Terminology. En U. A. [USACE], *Coastal Engineering Manual* (págs. A1-A94).
- Vélez de López, M. T. (2011). Gestión ambiental de las zonas costeras. Proceso de apropiación de un territorial en la zona costera al norte de Cartagena, Colombia. *Gestión ambiental de las zonas costeras*, 12-24.
- Vivas, A. (2019). *Caracterización y amenaza de los volcanes de lodo en los municipios de Turbo, Necoclí, San Juan de Urabá y Arboletes*. Apartadó.
- Williams, S. (2013). Sea level rise implications for Coastal Regions. *Journal of Coastal Research*, 63, 184-196. doi:10.2112/SI63-015.1
- Yin, Y., Karunarathna, H., & Reeve, D. E. (2019). Numerical modelling of hydrodynamic and morphodynamic response of a meso-tidal estuary inlet to the impacts of global climate variabilities. *Marine Geology*, 229-247. doi:<https://doi.org/10.1016/j.margeo.2018.11.005>

14. Anexos

14.1. Anexo A. Nomenclatura de ecuaciones presentadas

Tabla 6. Nomenclatura de ecuaciones presentadas

Término	Unidad	Significado
c_x	m/s	Velocidad de propagación en x
c_y	m/s	Velocidad de propagación en y
c_θ	m/s	Velocidad de propagación en θ
c_σ	m/s	Velocidad de propagación en σ
d	m	Profundidad por debajo de algún plano horizontal de referencia (<i>datum</i>)
E (en Delft-FLOW)	m/s	Evaporación
E (en Delft-WAVE)	-	Espectro de densidad de energía $E(\sigma, \theta)$
F_η y F_ξ	m/s^2	Fuerzas que representan el desequilibrio de los esfuerzos horizontales de Reynolds
fu	1/s	Parámetro de coriolis en u
fv	1/s	Parámetro de coriolis en v
$\sqrt{G_{\xi\xi}}$ y $\sqrt{G_{\eta\eta}}$	m	Coefficientes utilizado para transformar coordenadas curvilíneas a rectangulares
g	m/s^2	Aceleración debida a la gravedad
H	m	Profundidad total del agua ($H = d + \zeta$; d positivo hacia abajo)
M_η	m/s^2	Fuente o sumidero de momento en dirección η
M_ξ	m/s^2	Fuente o sumidero de momento en dirección ξ
N	-	Espectro de densidad de acción $\mathbf{N}(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta) / \sigma$
P	m/s	Precipitación
P_{atm}	$\text{kg}/(\text{ms})^2$	Presión atmosférica
P_η	$\text{kg}/(\text{m}^2\text{s}^2)$	Gradiente hidroestático de presión en la dirección η
P_ξ	$\text{kg}/(\text{m}^2\text{s}^2)$	Gradiente hidroestático de presión en la dirección ξ
Q	m/s	Fuente o sumidero global por unidad de área
q_{in}	1/s	Fuente local por unidad de volumen
q_{out}	1/s	Sumidero local por unidad de volumen
R	km	Radio de la tierra (6378.137 km, WGS84)

S	-	Representa los efectos de generación, disipación e interacciones onda-onda no lineales $S(\sigma, \theta)$
t	s	Tiempo
U y V	m/s	Velocidades promediadas en profundidad
u	m/s	Velocidad de flujo en la dirección x o ξ
v	m/s	Velocidad de flujo en la dirección y o η
ν_v	-	Coefficiente de viscosidad de remolino vertical
w	m/s	Velocidades físicas verticales
x, y, z	m	Coordenadas cartesianas
ζ	m	Nivel del agua por encima de algún plano horizontal de referencia (<i>datum</i>)
θ	°	Dirección de la ola
λ	°	Longitud
λ (en GEV)	-	Parámetro de localización de la GEV
ξ y η	-	Coordenadas horizontales, curvilíneas
ξ (en GEV)	-	Parámetro de forma de la GEV
ρ	kg/m ³	Densidad del agua
ρ_0	kg/m ³	Densidad de referencia del agua
σ (en Delft-FLOW)	-	Coordenada vertical escalada $\sigma = \frac{z-\zeta}{a+\zeta}$; (superficie, $\sigma = 0$ nivel del fondo, $\sigma = -1$)
σ (en Delft-WAVE)	-	Frecuencia relativa
σ (en GEV)	-	Parámetro de escala de la GEV
ϕ	°	Latitud
ω	m/s	Velocidad de flujo en la dirección z

Anexo B. Ecuaciones para la transformación de coordenadas

Las ecuaciones 10 y 11 corresponden a ξ y η que representan las coordenadas cartesianas, mientras que λ y ϕ se refieren al sistema de coordenadas esféricas.

$$\xi = \lambda \quad (12)$$

$$\eta = \phi \quad (13)$$

$\sqrt{G_{\xi\xi}}$ y $\sqrt{G_{\eta\eta}}$ corresponden a coeficientes usados para transformar coordenadas curvilíneas a rectangulares (Deltares, 2020), tal como se muestra en las ecuaciones 12 y 13.

$$\sqrt{G_{\xi\xi}} = R \cos \phi \quad (14)$$

$$\sqrt{G_{\eta\eta}} = R \quad (15)$$

Donde R es el radio de la tierra (6378.137 km, WGS84).

14.1. Anexo C. Ecuaciones de momento del módulo Delft3D-FLOW

Las ecuaciones de momento en las direcciones ξ y η están dadas por las ecuaciones 14 y 15, respectivamente.

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d + \zeta} \frac{\partial u}{\partial \sigma} - \frac{v^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} \\ - fv = -\frac{1}{\rho_0\sqrt{G_{\xi\xi}}} P_\xi + F_\xi + \frac{1}{(d + \zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(v_v \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + M_\xi \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d + \zeta} \frac{\partial v}{\partial \sigma} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} - \frac{u^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} \\ + fu = -\frac{1}{\rho_0\sqrt{G_{\eta\eta}}} P_\eta + F_\eta + \frac{1}{(d + \zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(v_v \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + M_\eta \end{aligned} \quad (17)$$

Donde, ω es la velocidad de flujo en la dirección z , fv es el parámetro de coriolis en v , ρ_0 es densidad de referencia del agua, P_ξ es el gradiente hidroestático de presión en la dirección ξ , F_ξ y F_η son fuerzas que representan el desequilibrio de los esfuerzos horizontales de Reynolds, v_v es el coeficiente de viscosidad de remolino vertical y M_ξ es la fuente o sumidero de momento en dirección ξ , fu es el parámetro de coriolis en u , P_η es el gradiente hidroestático de presión en la dirección η , y M_η es la fuente o sumidero de momento en dirección η .

En modelos 3D la velocidad vertical ω , en el sistema de coordenadas σ , se calcula a partir de la ecuación de continuidad, tal como se muestra en la ecuación 16. La velocidad ω es la velocidad vertical relativa al plano σ en movimiento y puede ser interpretada como la velocidad asociada con movimientos ascendentes y descendentes (Deltares, 2020).

$$\begin{aligned} \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \left((d + \zeta)u\sqrt{G_{\eta\eta}} \right)}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \left((d + \zeta)v\sqrt{G_{\xi\xi}} \right)}{\partial \eta} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} \\ = (d + \zeta)(q_{in} - q_{out}) \end{aligned} \quad (18)$$

Las ecuaciones descritas tienen en cuenta el efecto de precipitación y evaporación en la superficie. La ecuación 17 permite calcular las velocidades verticales físicas, requeridas únicamente para fines de post procesamiento (Deltares, 2020).

$$w = \omega + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \left[u\sqrt{G_{\eta\eta}} \left(\sigma \frac{\partial H}{\partial \xi} + \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} \right) + v\sqrt{G_{\xi\xi}} \left(\sigma \frac{\partial H}{\partial \eta} + \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} \right) \right] + \left(\sigma \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial \zeta}{\partial t} \right) \quad (19)$$

Donde, w representan las velocidades físicas verticales.

14.2. Anexo D. Características de mareógrafos analizados

En la Tabla 7 se muestra la zona, fuente, resolución temporal, fechas y ubicación geográfica de los mareógrafos analizados en el presente estudio.

Tabla 7. Características de los mareógrafos analizados.

Zona	Fuente	Longitud (°)	Latitud (°)	Resolución temporal	Fecha inicio	Fecha fin
Cartagena	Hawaii Sea Level Center	-75.533	10.383	1 dato/hora	01/05/1993	30/07/2019
Coveñas	DIMAR	-76.205277	9.4091666	1 dato/3 horas	07/08/2013	31/12/2020
Sapzurro	DIMAR	-77.3652778	8.6602778	1 dato/3 horas	04/08/2015	31/12/2020
Turbo	DIMAR	-76.735464	8.066946	1 dato/minuto	18/12/2017	20/06/2019

14.3. Anexo E. Localización de puntos de interés

En la Tabla 8 se muestra la localización geográfica de los 10 puntos de interés en los cuales se enfocaron los análisis del presente estudio.

Tabla 8. Localización geográfica de puntos de interés.

Punto	Longitud (°)	Latitud (°)
1 (Akuará)	-76.8389	8.4557
2	-76.9289	8.6177
3	-76.9829	8.5367
4	-76.8299	8.4062
5	-77.1044	8.5412
6	-76.9964	8.4512
7	-76.9424	8.3702
8	-77.2528	8.5727
9	-77.2483	8.5142
10	-77.2123	8.4827

14.1. Anexo E. Resultados de comparación de escenarios en la dirección ENE

En la Tabla 9 se presentan las razones obtenidas al dividir los valores de H_s de los escenarios estacionarios F y G (correspondientes a la dirección ENE), entre los valores de H_s del escenario E. Del mismo modo, en la Tabla 10 se presentan los cambios de dirección que sufrió el oleaje durante la propagación de estos escenarios. En ambas tablas se presentan resultados para los 10 puntos de control que se trabajaron a lo largo del documento (ver Figura 23).

Tabla 9. Razón entre H_s de escenarios estacionarios (ENE) evaluados y H_s de escenario estacionario presente (ENE) en condiciones medias, para los 10 puntos de control seleccionados.

Punto	$H_{s(E)}$ [m]	$H_{s(F)} / H_{s(E)}$	$H_{s(G)} / H_{s(E)}$
1	0.0	6.6	8.5
2	0.6	2.6	3.0
3	0.6	2.4	2.7
4	0.0	6.6	8.4
5	1.0	2.2	2.4
6	0.4	2.6	3.0
7	0.1	4.8	5.3
8	1.2	2.3	2.6
9	1.0	2.3	2.7
10	1.0	2.1	2.3

Tabla 10. Diferencia entre dirección del oleaje en escenarios (ENE) evaluados y dirección del oleaje en el escenario presente (ENE) de condiciones medias, para los 10 puntos de control seleccionados.

Punto	$Dir_{(E)}$ [°]	$Dir_{(F)} - Dir_{(E)}$	$Dir_{(G)} - Dir_{(E)}$
1	289.9	-11.5	-12.3
2	19.9	334.6	327.9
3	21.3	-8.7	-10.2
4	313.9	-6.8	-7.6
5	39.8	-3.4	-4.3
6	15.0	-5.7	-6.8
7	354.9	-0.6	-1.1
8	48.0	-1.4	-1.8
9	47.9	1.4	1.5
10	41.2	1.8	2.2