

# ESTUDIO OCEANOGRÁFICO PARA TRABAJOS DE MANTENIMIENTO DEL BORDE COSTERO CENTRO DE CONVENCIONES DE CARTAGENA.

## BAHIA DE LAS ÁNIMAS

Por Consorcio:



El presente informe se describe la dinámica oceanográfica, en la Bahía de las Ánimas, Cartagena, necesario para el desarrollo de obras de mantenimiento del borde costero del Centro de Convenciones de Cartagena.

**ABRIL 2025**

# **ESTUDIO OCEANOGRÁFICO PARA TRABAJOS DE MANTENIMIENTO DEL BORDE COSTERO CENTRO DE CONVENCIONES DE CARTAGENA.**

## **BAHIA DE LAS ÁNIMAS**

Elaborado por:

**ECOPLANET LTDA**

**Abril, 2025**

## CONTENIDO

Introducción .....	11
<b>OBJETIVO GENERAL</b> .....	11
<b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b> .....	11
<b>METODOLOGÍA</b> .....	12
Capítulo 1 .....	8
FACTORES METEOROLÓGICOS .....	8
<b>1.1 CLIMATOLOGÍA GENERAL</b> .....	8
<b>1.2 FENÓMENOS DE MACRO-ESCALA (GLOBAL)</b> .....	10
<b>1.2.1 Índice de Oscilación del Sur (El Niño)</b> .....	10
<b>1.3 FENÓMENOS DE MESO-ESCALA</b> .....	11
<b>1.3.1 Régimen de vientos</b> .....	11
<b>1.3.2 Ondas del este</b> .....	14
<b>1.3.3 Tormentas y huracanes</b> .....	15
<b>1.3.4 Frentes fríos</b> .....	18
<b>1.4 FENÓMENOS DE MICROESCALA (LOCAL)</b> .....	19
<b>1.4.1 Precipitación</b> .....	19
<b>1.4.2 Temperatura</b> .....	20
Capítulo 2 .....	21
FACTORES OCEANOGRÁFICOS.....	21
<b>2.1 BATIMETRIA</b> .....	21
<b>2.2 SEDIMENTOS BAHÍA DE CARTAGENA</b> .....	21
<b>2.3 MAREA</b> .....	23
<b>2.4 ASCENSO RELATIVO DEL NIVEL DEL MAR</b> .....	25
<b>2.4.1 Subsistencia local</b> .....	25
<b>2.5 MAR DE LEVA (SWELL)</b> .....	28

<b>2.6</b>	<b>COMPONENTES QUE DETERMINAN LA COTA DE INUNDACIÓN</b> ....	30
<b>2.7</b>	<b>CIRCULACION GENERAL DEL CARIBE</b> .....	32
<b>2.8</b>	<b>TRANSPORTE DE SEDIMENTOS</b> .....	34
<b>2.9</b>	<b>REGIMEN DE OLEAJE</b> .....	37
<b>2.9.1</b>	<b>Oleaje en aguas profundas</b> .....	37
Capítulo 3 .....		39
CONFIGURACIÓN DE LOS MODELOS .....		39
<b>3.1</b>	<b>GRILLA DE CÁLCULO</b> .....	39
<b>3.1.1</b>	<b>Modelo hidrodinámico (corrientes)</b> .....	39
<b>3.1.2</b>	<b>Modelo de oleaje</b> .....	40
<b>3.2</b>	<b>BATIMETRIA</b> .....	41
<b>3.3</b>	<b>DEFINICIÓN DE LAS CONDICIONES DE FRONTERA</b> .....	43
<b>3.3.1</b>	<b>Corrientes</b> .....	43
<b>3.3.2</b>	<b>Condiciones de frontera - Oleaje</b> .....	46
<b>3.4</b>	<b>VALIDACIÓN DEL MODELO</b> .....	48
Capítulo 4 .....		50
RESULTADOS DE LA MODELACIÓN.....		50
<b>4.1</b>	<b>RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE CORRIENTES</b> .....	50
<b>4.2</b>	<b>RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE OLEAJE</b> .....	53
<b>4.3</b>	<b>CÁLCULO DE FUERZAS EN COLUMNAS Y MUROS</b> .....	56
<b>4.4</b>	<b>IMPACTO DE LA PLUMA DE SEDIMENTOS DEL CANAL DEL DIQUE</b> 58	
Capítulo 5 .....		60
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		60
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....		63



## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Registros de eventos ENOS desde 1951. La clasificación es efectuada por la NOAA usando el Índice Oceánico del Niño. ....	11
<b>Tabla 2.</b> Categoría de huracanes que afectaron la costa colombiana. ....	17
<b>Tabla 3.</b> Distribución porcentual de los meses en que se han presentado huracanes en el área de la costa Caribe colombiana (1964 – 2004). ....	17
<b>Tabla 4.</b> Cálculo de la cota de inundación por eventos extremos contemplando ascenso del nivel del mar para los años 2040, 2050 y 2100. ....	31
<b>Tabla 5.</b> Concentración de sólidos suspendidos totales (SST) en cuatro estaciones REDCAM de la Bahía de Cartagena para diferentes años en las dos épocas climáticas principales. ....	35
<b>Tabla 6.</b> Tabla de distribución de frecuencias cruzada de la altura y dirección de la ola. Fuente: elaboración propia. ....	38
<b>Tabla 7.</b> Características de las grillas de cálculo de oleaje. ....	41
<b>Tabla 8.</b> Resultado del análisis de la dirección del viento de Cartagena (Molares, 2011). ....	45
<b>Tabla 9.</b> Resultado del análisis de la velocidad del viento de Cartagena (R. Molares, 2011). ....	45
<b>Tabla 10.</b> Componentes armónicos de la marea de Cartagena. ....	46
<b>Tabla 11.</b> Condiciones de frontera para el cálculo de corrientes. ....	46
<b>Tabla 12.</b> Condiciones de frontera para el cálculo de oleaje. ....	47
<b>Tabla 13.</b> Parámetros de la ola registrados por las boyas de oleaje virtual en las posiciones indicadas en la Figura 33, para los dos escenarios simulados. Hs: altura significativa de la ola; Ubot: velocidad orbital en el fondo; Periodo: periodo de la ola. ....	56
<b>Tabla 14.</b> Cálculo de la Fuerza (Newton) ejercida por el oleaje y la corriente sobre columnas y muros en los sectores indicados (Figura 35), de la línea de costa del Centro de Convenciones, para el caso de vientos en la bahía con dirección del oeste. ....	58

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Zona de Convergencia Intertropical. a) Época de vientos b) transición y c) época húmeda o de lluvias. Fuente: Adaptado de (Pujos et al., 1986). .....	10
<b>Figura 2.</b> Distribución de frecuencia de clases del viento en aguas profundas frente a Cartagena. Elaboración propia.....	12
<b>Figura 3.</b> Rosa de viento en aguas profundas frente a Cartagena. Elaboración propia.....	13
<b>Figura 4.</b> Ubicación de las estaciones meteorológicas cercanas al área de interés (izq.) y rosa de vientos correspondientes en cada una de estas estaciones (der.). Serie de tiempo de vientos corresponde al lapso de 10 años (2000 – 2010). Fuente: (R. Molares, 2011). .....	14
<b>Figura 5.</b> Porcentaje de ocurrencias de ondas del este registradas por el CIOH (Fuente: propia, con información del Boletín Meteomarinero Mensual CIOH (2004 / 2019).....	15
<b>Figura 6.</b> Porcentaje mensual de ocurrencia de frentes fríos registrados por el CIOH. Fuente: autor. Calculado con información del Boletín Met. Mensual CIOH 2004 / 2019).....	19
<b>Figura 7.</b> Precipitación promedio en el área de Cartagena. Fuente: datos tomados de IDEAM datos climatológicos 1981 – 2010. <a href="http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/clima">http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/clima</a> . .....	19
<b>Figura 8.</b> Temperatura ambiental promedio en el área de Cartagena. Fuente: datos tomados de IDEAM datos climatológicos 1981 – 2010. <a href="http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/clima">http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/clima</a> .....	20
<b>Figura 9.</b> Batimetría en el área de influencia del proyecto. ....	21
<b>Figura 10.</b> Composición, en %, de los limos finos (10 µm). Fuente: Modificado de Andrade et al. (2004). .....	23
<b>Figura 11.</b> Clasificación de la marea en el Caribe. MS: Mixta principalmente semidiurna. MD: Mixta principalmente diurna. D: Diurna. Fuente: Adaptado de (Kjerfve, 1981). .....	24
<b>Figura 12.</b> Componente M2 de la marea en el Caribe. Las líneas continuas negras representan líneas con la misma fase expresada en grados. Las líneas discontinuas (rojo) son isolíneas de amplitud en centímetros. Fuente: Adaptado de (Kjerfve, 1981).....	24
<b>Figura 13.</b> Distribución especial del rango (cm) promedio de marea en el Caribe. Fuente: Adaptado de (Kjerfve, 1981). .....	25

<b>Figura 14.</b> Ascenso relativo del nivel del mar en la Cartagena. Fuente: Modificado de (Restrepo & López, 2008) .....	25
<b>Figura 15.</b> Desplazamiento vertical medido en Cartagena (10° 23' 28,80N - 75° 32' 1,87"W). Fuente: (C. Andrade et al., 2017) .....	26
<b>Figura 16.</b> Desplazamiento vertical medido en Cartagena (10° 23' 28,80N - 75° 32' 1,87"W). Fuente: (Restrepo-Ángel et al., 2021).....	27
<b>Figura 17.</b> Velocidad vertical (mm/año) calculado para la ciudad de Cartagena. Fuente: (Restrepo-Ángel et al., 2021) .....	28
<b>Figura 18.</b> Porcentaje mensual de ocurrencia de mar de leva registrados por el CIOH. Fuente: autor. Calculado con información del Boletín Met. Mensual CIOH 2004 / 2019).....	29
<b>Figura 19.</b> Patrones principales de corrientes dentro y fuera del Mar Caribe: Corriente del Norte de Brasil (NBC), Corriente Ecuatorial del Norte (NEC), Corriente Caribe del Sur (sCC), Corriente Caribe del Norte (nCC) y Corriente Caribe Subsuperficial (CCU). Los círculos representan estructuras con movimiento hacia el oeste: vórtices de la NBC (punteado), vórtices anticiclónicos (rojo) y vórtices ciclónicos (azul). Fuente: (Jouanno et al., 2009). .....	34
<b>Figura 20.</b> Rosa de oleaje en aguas profundas frente a Cartagena. Fuente: Elaboración propia. ....	37
<b>Figura 21.</b> Distribución de frecuencias de clases de la altura de la ola. Fuente: elaboración propia.....	38
<b>Figura 22.</b> Malla del dominio de cálculo de corrientes en la Bahía de Cartagena. ....	40
<b>Figura 23.</b> Dominio de cálculo es un esquema de cuatro grillas. La grilla 4 (der.) corresponde al área de interés, en la Bahía de las Ánimas, cubriendo el borde costero del Centro de Convenciones de Cartagena. ....	41
<b>Figura 24.</b> Sondeos empleados para la construcción de las grillas de cálculo diseñadas. ....	42
<b>Figura 25.</b> Grilla batimétrica de la Bahía de Cartagena, modelo de corrientes. ...	42
<b>Figura 26.</b> Grilla batimétrica de Bahía de las Ánimas (Grilla 4), modelo de oleaje. ....	43
<b>Figura 27.</b> Variación mensual del caudal promedio (1984-2000) en cinco estaciones hidrológicas a lo largo del Canal del Dique. Santa Helena II es la estación más cercana a la desembocadura del Canal del Dique en la Bahía de Cartagena. (Adaptado de Unal, 2008). ....	44
<b>Figura 28.</b> Superposición de las curvas de marea calculada (azul) con el modelo vs mediciones (naranja) en la Bahía de Cartagena. ....	49

<b>Figura 29.</b> Corrientes simuladas en la parte norte de la Bahía de Cartagena (izq.) y Bahía de las Ánimas (der.), durante el ascenso (arriba) y descenso (abajo) de la marea.....	51
<b>Figura 30.</b> Boyas virtuales para registrar la velocidad de la corriente a lo largo del borde costero del Centro de Convenciones. ....	52
<b>Figura 31.</b> Corrientes medidas en las boyas virtuales ubicadas a lo largo del borde costero del Centro de Convenciones (arriba). En la parte baja de la figura se registra el recorrido de la marea. ....	53
<b>Figura 32.</b> Altura de la ola calculada para el área general de Cartagena (izq.) y norte de la Bahía de Cartagena (der.), con viento del noreste y oleaje hacia el suroeste en aguas profundas fuera de la bahía. ....	54
<b>Figura 33.</b> Altura de la ola calculada para la Bahía de las Ánimas con viento del oeste (izq.), y con viento del sur (der.). ....	55
<b>Figura 34.</b> Boyas virtuales para registrar parámetros del oleaje largo del borde costero del Centro de Convenciones. ....	56
<b>Figura 35.</b> Sectorización del borde costero del Centro de Convenciones para caracterizar .....	57
<b>Figura 36.</b> Concentración de sedimentos suspendidos calculados para la época seca (izq.) y húmeda (der). ....	59

## Introducción

El presente documento tiene como objeto presentar los resultados de la simulación numérica de la dinámica oceanográfica, que incluye, corrientes, sedimentos y oleaje, en la Bahía de Cartagena, específicamente en la Bahía de las Ánimas, donde se ubica el Centro de Convenciones de Cartagena, con el propósito de establecer las fuerzas del oleaje y la corriente que interactúan con muros y pilotes del borde costero del Centro de Convenciones, necesario para los trabajos de mantenimiento y reparación que son requeridos.

Para el estudio fue necesario efectuar un análisis estadístico de variables meteorológicas y oceanográficas en aguas profundas, para la configuración y simulación de los escenarios definidos mediante el empleo de modelos numéricos. Como resultado de la modelación fue posible establecer la dinámica hidrodinámica, en el área de interés.

En los primeros capítulos se hace una revisión bibliográfica que permite conocer la dinámica general del área de estudio y de esa forma, poder replicar esas características mediante la aplicación de modelos numéricos. Seguidamente se definen los escenarios de simulación basados en los resultados del paso anterior, para continuar con la simulación de estos escenarios.

Desde el área general del Mar Caribe, hasta la zona de influencia en la Bahía de Cartagena y Bahía de las Ánimas, se hacen diferentes simulaciones utilizando la metodología de grillas de nido (*nested grid*), de tal forma que la simulación de la dinámica oceánica en el sector contempla la influencia de la dinámica oceanográfica del Mar Caribe, dando así consistencia a los resultados.

### OBJETIVO GENERAL

Caracterizar la dinámica oceanográfica de la Bahía de las Ánimas y establecer las fuerzas que interactúan con el borde costero del Centro de Convenciones de Cartagena.

### OBJETIVOS ESPECÍFICOS

A continuación, se relacionan los objetivos específicos a alcanzar.

- Determinación de la climatología en el área de influencia de la Bahía de Cartagena.
- Validación del modelo numérico.
- Diseño de escenarios de modelación a partir de la climatología y estadística de parámetros oceanográficos y meteorológicos.
- Modelación de escenarios desde la escala sinóptica (Mar Caribe) hasta la escala local.
- Caracterización de la dinámica oceanográfica y meteorológica en la escala local.

## **METODOLOGÍA**

Mediante el uso de información primaria, secundaria y cálculos, empleando modelos numéricos, a continuación, se desarrolla la metodología que se empleó para el logro de los objetivos específicos relacionados anteriormente.

### **Determinación de la climatología en el área de influencia de la Bahía de Cartagena.**

Se analizó la climatología (meteorología y oceanografía) del área general del Mar Caribe (escala sinóptica) para determinar las condiciones promedio y extremas que fueron llevadas hasta la Bahía de las Ánimas. Se determinaron los patrones de huracanes y tormentas, así como mares de leva generados por frentes fríos, estableciendo patrones estacionales e intensidad de estos. Esta información se constituyó como la base para diseñar los escenarios de simulación desde la escala sinóptica (Mar Caribe), hasta la escala local (Bahía de las Ánimas). Se emplearon bases de datos globales para establecer regímenes de viento promedio y local, y para calcular patrones del oleaje y corrientes. Durante la realización de este objetivo, se evaluó la estadística básica de los principales parámetros oceanográficos, para establecer cuantitativamente los regímenes promedio y extremal.

## **Diseño de escenarios de modelación a partir de la climatología y estadística de parámetros oceanográficos y meteorológicos.**

Para el diseño de los escenarios de modelación para el cálculo del oleaje, se analizó la estadística básica del oleaje y del viento, lo que, relacionado con la climatología, lo permitió definir las características del oleaje y viento en el área general de interés.

## **Modelación de escenarios desde la escala sinóptica (Mar Caribe) hasta la escala local.**

Para el estudio fue necesario emplear modelos numéricos que permitieran resolver el campo de corrientes y campo de oleaje desde la escala general (mar Caribe) hasta la escala local.

Para resolver el campo de oleaje fue empleado el modelo numérico de simulación de oleaje SWAN (*Simulating Wave Nearshore*) desarrollado por DELFT HYDRAULICS (Holanda), con lo que se pudo obtener estimadas realistas del régimen del oleaje teniendo en cuenta: topografía del fondo (batimetría), línea de costa, campo de vientos y nivel del mar. SWAN es empleado en muchos estudios de ingeniería, para el conocimiento de condiciones extremas del oleaje en aguas costeras (lo que incluye estuarios, canales, bahías, etc.). El modelo es de tercera generación para la simulación de oleaje en aguas profundas, intermedias y someras (<http://www.wldelft.nl/soft/swan/>).

Como condiciones de frontera (caso del oleaje) se tomaron parámetros del oleaje y viento, extremos en aguas profundas. En el caso de corrientes, se empleó la estadística de vientos de aguas profundas y de aguas interiores.

El campo de corrientes fue calculado empleando el modelo MOHID (MOdelo HIDrodinámico), desarrollado por MARETEC (Marine and Environmental Technology Research Center) en el Instituto Politécnico de Lisboa. Es un modelo hidrodinámico 3D, que posee módulos para estimar desde el transporte de sedimentos hasta la calidad de las aguas. MOHID permite la adopción de una filosofía de modelación integrada, no solo de procesos físicos o biogeoquímicos, sino también de múltiples escalas y sistemas, permitiendo el uso de modelos anidados. Es una herramienta capaz de simular problemas costeros complejos y

flujos estuarinos (de Pablo et al., 2019; Franz et al., 2017; Martins et al., 2001; Vaz et al., 2018, 2020).

La información batimétrica empleada fue obtenida del proyecto ETOPO1<sup>1</sup> (en la escala mayor) y en la escala intermedia fue utilizada la información batimétrica de la cartografía náutica nacional. La batimetría del área específica de interés fue levantada expresamente para el proyecto.

---

<sup>1</sup> ETOPO1 es un modelo global de relieve con una resolución de 1 arco de minuto, desarrollado por NGDC (National Geophysical Data Center de NOAA) y disponible en:  
<https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/global.html>

# Capítulo 1

## FACTORES METEOROLÓGICOS

### 1.1 CLIMATOLOGÍA GENERAL

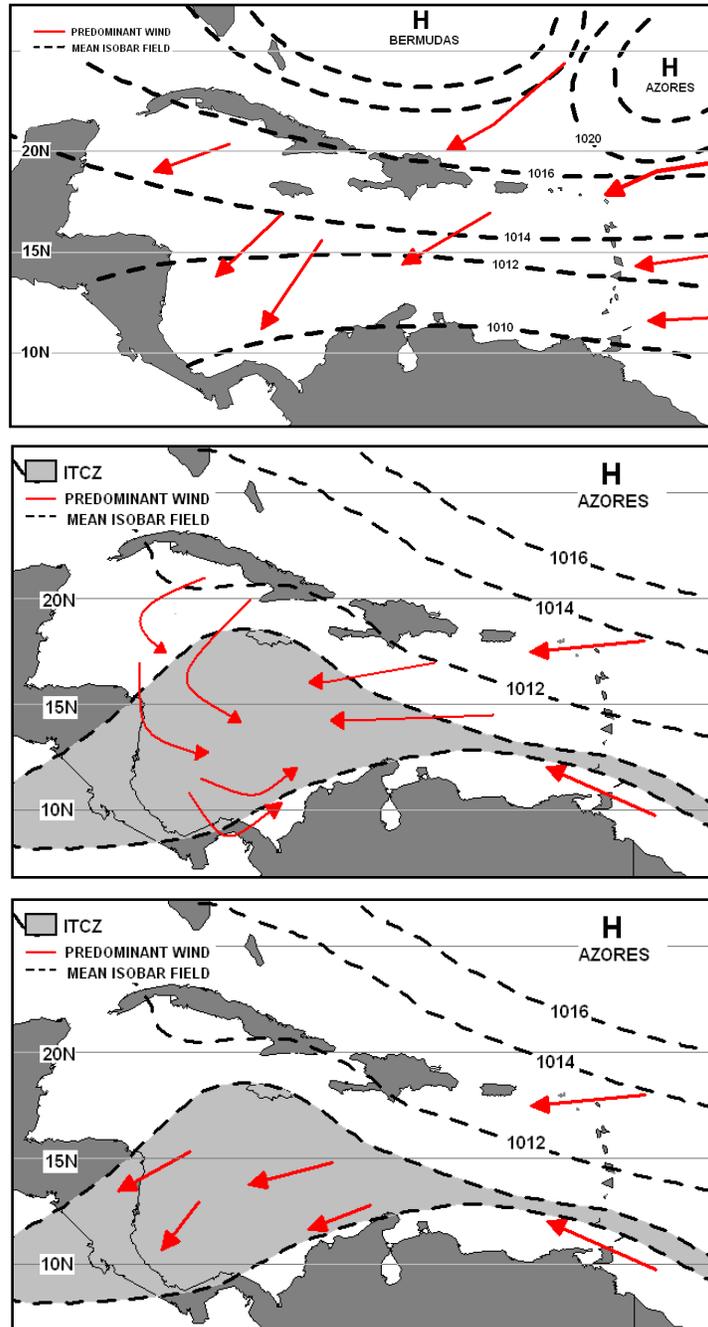
En el mar Caribe colombiano las masas de aire existentes son principalmente los vientos Alisios del noreste con una duración del 43% del tiempo y 60% en total del cuadrante noreste, y adicionalmente con una baja frecuencia los huracanes y tormentas tropicales generadas en el Mar Caribe, que se mueven desde el este hacia el oeste, siguiendo trayectorias que se sitúan al norte de los 12° de latitud norte (entre Cuba y el continente americano).

El clima en el Caribe colombiano es modulado por la posición geográfica de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) y por el movimiento meridional del sistema de monzones americanos (C. A. Andrade, 2000). Así, durante la estación de fuertes vientos la ZCIT permanece en el sur alrededor de los 0°-5° de latitud sur desde donde influye en la región Caribe al incidir en el campo de las corrientes, lo cual hace que se genere vientos fuertes y uniformes sobre toda la cuenca del Caribe. La variación de la ZCIT, durante todo el año, permite que el viento del este ejerza influencia sobre la región y cuando esta sale de la cuenca hacia el norte, la dirección e intensidad predominante del viento cambia (viento suave), iniciando la estación de lluvias y desarrollo extenso de convección con tormentas severas al occidente del Caribe colombiano (C. Andrade, 1993; C. A. Andrade, 2000).

En la cuenca del Caribe predominan ciertos sistemas que condicionan la climatología de la región, como son corrientes de viento de bajo nivel que durante la estación de vientos (diciembre – marzo) permanecen en la cuenca de Colombia con velocidades superiores a los 12 m/s y tienen un importante componente sur, mientras que en el nivel de los 200 milibares (aproximadamente 10Km de altura) el sistema de vientos se caracteriza por presentar una dirección opuesta al del viento en superficie siendo principalmente de componente norte y manteniendo casi la misma velocidad, situación que determina la circulación ciclónica característica del Caribe colombiano (C. A. Andrade, 2000) (ver Figura 1).

Durante la estación de lluvias (septiembre – noviembre), por el contrario, se produce una inversión de este sistema de vientos, tanto en superficie como en altura,

alcanzando la corriente de vientos fuertes en el Caribe central hacia el mes de octubre. La posición y velocidad alcanzada por la corriente de vientos de bajo nivel en el centro de la cuenca mantiene modulada la vorticidad del viento superficial en el Caribe, produciendo así vorticidad anticiclónica al norte de los 14°N durante la estación húmeda y fuerte vorticidad ciclónica al sur de los 14°N, situaciones que dejan ver pequeños cambios estacionales (C. A. Andrade & Barton, 2000).



**Figura 1.** Zona de Convergencia Intertropical. a) Época de vientos b) transición y c) época húmeda o de lluvias. Fuente: Adaptado de (Pujos et al., 1986).

Otros sistemas que influyen en la climatología del Caribe colombiano es el de los monzones de América, los cuales son sistemas que también han sido considerados como los responsables de la conectividad atmosférica en el calentamiento superficial. De esta forma se ha identificado la presencia del sistema monzónico de América del Sur durante diciembre - febrero en el verano austral mientras que el sistema del norte ocurre durante junio-agosto en el verano boreal y el de América Central que ocurre entre los monzones hemisféricos haciéndose presentes durante dos periodos durante marzo - junio y de septiembre a noviembre.

## 1.2 FENÓMENOS DE MACRO-ESCALA (GLOBAL)

### 1.2.1 Índice de Oscilación del Sur (El Niño)

La variabilidad interanual asociada al Índice de Oscilación del Sur (ENOS), y el calentamiento de las aguas superficiales del este tropical del océano Pacífico asociado con la inversión de la dirección del viento en la circulación del tipo Walker en el hemisferio sur tienen una importante influencia en el clima del Caribe. Periodos cálidos del El Niño (ENOS) están correlacionados con sequías en las costas del norte de Colombia y Venezuela, mientras que la Niña (la fase inversa de ENOS – periodo frío) coincide con anomalías positivas de la precipitación (Álvarez et al., 1995).

De acuerdo con (Poveda & Mesa, 1997) la hidrología del trópico suramericano está fuertemente acoplada a una baja frecuencia de un fenómeno atmosférico a larga escala que ocurre sobre el Atlántico y el Pacífico. ENOS afecta las condiciones climáticas e hidrológicas en escalas de tiempo que varían de estaciones a décadas. Con algunas diferencias regionales en cuanto a la ocurrencia y amplitud, el trópico suramericano exhibe anomalías negativas en la precipitación asociadas con fases poco cálidas del Niño, y anomalías positivas de precipitación con las fases frías (La Niña). Los efectos del ENOS en las descargas de los ríos ocurren progresivamente, lo cual es de particular interés en el Golfo de Morrosquillo teniendo en cuenta que allí desembocan varios brazos del delta del río Sinú.

La oficina meteorológica nacional de los Estados Unidos (The National Oceanographic and Atmospheric Administration - NOAA) desarrolló el Índice

Oceánico del Niño (ONI) para identificar estos eventos. Es un promedio corrido por tres meses de la temperatura superficial del mar (TSM) en la región 3.4 del Niño (5 N – 5°S, 120°W-170°W). Los eventos del Niño son definidos cuando se identifican 5 meses consecutivos cuya TSM se encuentra 0.5°C sobre o por debajo de la TSM característica del mes (Sobre: El Niño. Debajo: La Niña). En la Tabla 1 se relaciona el registro histórico de la ocurrencia de este fenómeno desde 1951.

**Tabla 1.** Registros de eventos ENOS desde 1951. La clasificación es efectuada por la NOAA usando el Índice Oceánico del Niño.

El Niño				La Niña		
Débil	Moderado	Fuerte	Muy fuerte	Débil	Moderado	Fuerte
1952-53	1951-52	1957-58	1982-83	1954-55	1955-56	1973-74
1953-54	1963-64	1965-66	1997-98	1964-65	1970-71	1975-76
1958-59	1968-69	1972-73	2015-16	1971-72	1995-96 2011-12	1988-89
1969-70	1986-87	1987-88		1974-75		1998-99
1976-77	1994-95	1991-92		1983-84		1999-00
1977-78	2002-03			1984-85		2007-08
1979-80	2009-10			2000-01		2010-11
2004-05	2023			2005-06		
2006-07				2008-09		
2014-15				2016-17		
2018-19				2017-18		
2019-20				2021 - 22		

Fuente: [https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ONI\\_v5.php](https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php)

## 1.3 FENÓMENOS DE MESO-ESCALA<sup>2</sup>

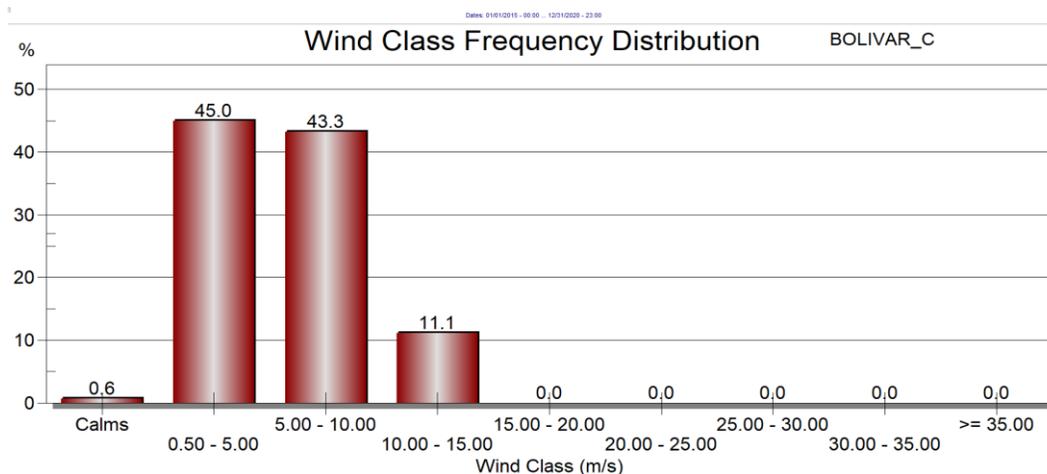
### 1.3.1 Régimen de vientos

El viento en aguas profundas se caracterizó mediante la estadística de datos de vientos obtenidos del producto “Global Ocean Hourly Reprocessed Sea Surface Wind and Stress from Scatterometer and Model” del proyecto Copernicus

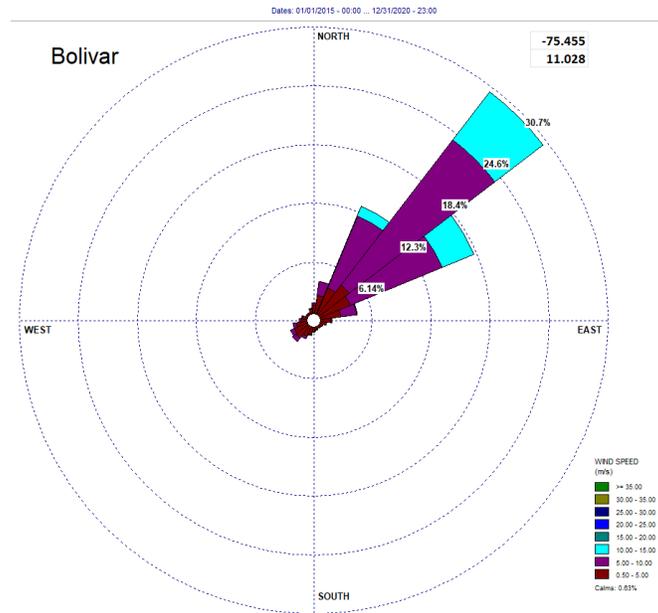
<sup>2</sup> La meso-escala cubre fenómenos meteorológicos y oceanográficos que cubren geográficamente espacios entre 5 km y cientos de kilómetros.

(WIND\_GLO\_PHY\_L4\_MY\_012\_006), el cual contiene campos horarios de viento en la superficie del mar y tensión (stress) de nivel 4, con una resolución espacial horizontal de 0.125 y 0.25 grados. Se utilizan observaciones de dispersómetros (*scatterometers*) y las variables asociadas del modelo de reanálisis ERA5 del Centro Europeo para Pronósticos Meteorológicos de Mediano Plazo (ECMWF) para calcular campos de diferencia promediados temporalmente. La serie de datos de cinco años se obtuvo en aguas abiertas (75.4545 W, 11.028 W).

De acuerdo con los resultados del análisis estadístico del viento en aguas profundas, la probabilidad de ocurrencia del 88% en cuanto a la velocidad del viento es entre los 0.5 y 10 m/s. Velocidades entre 10 y 15 m/s se dan en un 11.1% de los casos (Figura 2). En cuanto la dirección del viento es consistente del NE (Figura 3).

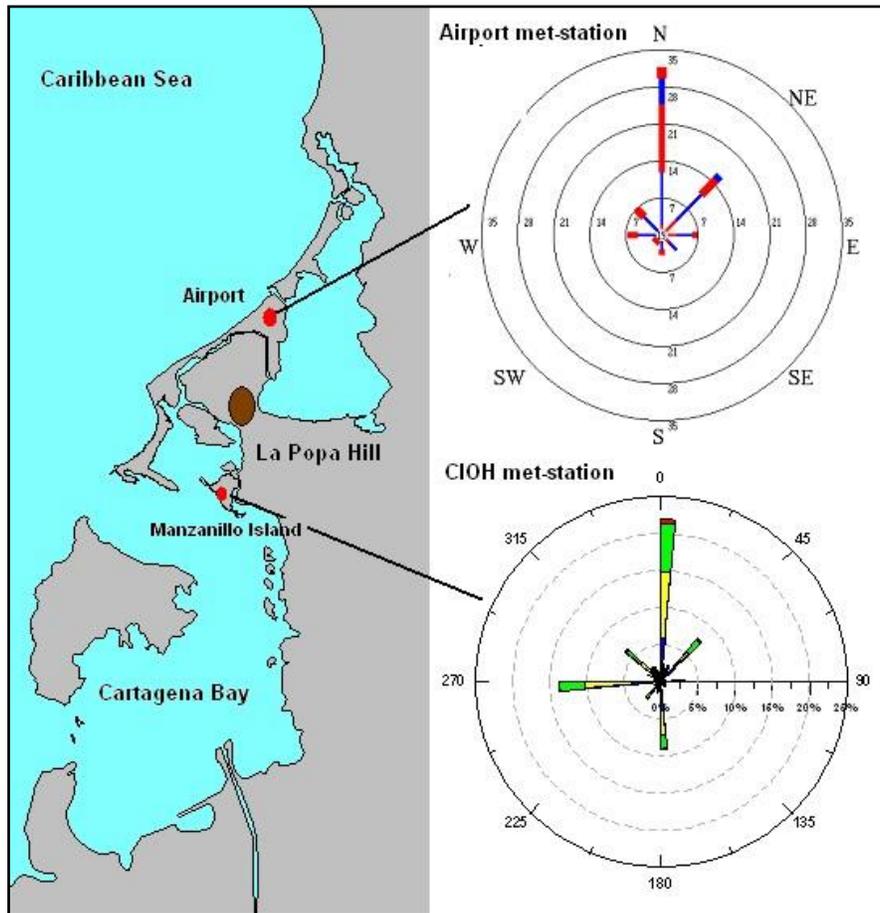


**Figura 2.** Distribución de frecuencia de clases del viento en aguas profundas frente a Cartagena. Elaboración propia.



**Figura 3.** Rosa de viento en aguas profundas frente a Cartagena. Elaboración propia.

Por otra parte, en la escala local (Bahía de Cartagena), durante todo el año los regímenes de velocidad media del viento, al igual que en la gran mayoría de los puertos del litoral Caribe colombiano, están influenciadas por las oscilaciones del sistema de alta presión de las Azores y las fluctuaciones de la Zona de Convergencia Intertropical sobre el área, generando que se intensifiquen o se disminuyan los vientos Alisios dependiendo de la época del año, así como su dirección (Figura 4).



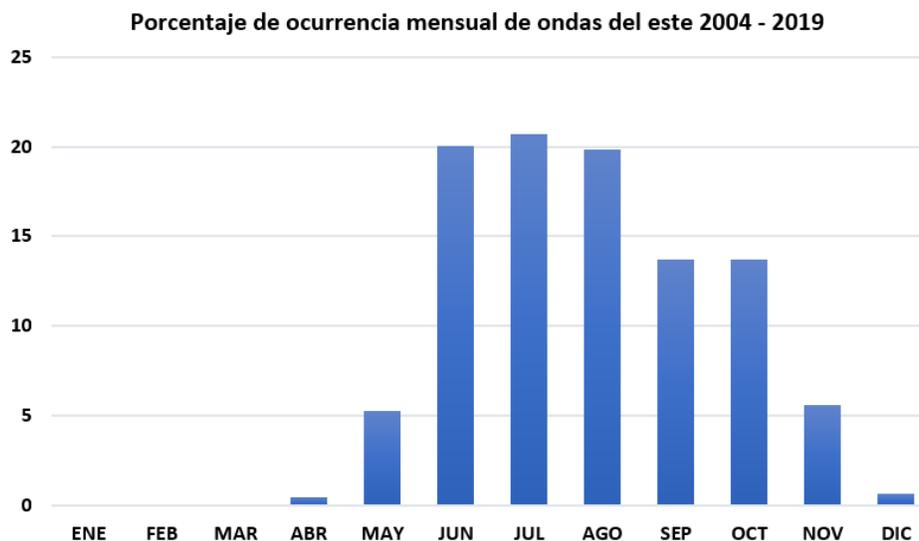
**Figura 4.** Ubicación de las estaciones meteorológicas cercanas al área de interés (izq.) y rosa de vientos correspondientes en cada una de estas estaciones (der.). Serie de tiempo de vientos corresponde al lapso de 10 años (2000 – 2010). Fuente: (R. Molares, 2011).

Durante el primer tercio del año, el viento es predominantemente del norte; en los meses siguientes, la incidencia de viento del oeste aumenta y el componente norte se debilita. Una vez que la temporada de lluvias está más cerca (de agosto a octubre), el componente del viento del norte se debilita aún más, y el componente del viento del sur está presente. En noviembre - diciembre se detecta el componente viento del norte y finalmente desaparece el componente sur.

### 1.3.2 Ondas del este

Son esencialmente cambios de tipo ondulatorio en la profunda corriente del este tropical, los que en su mayoría presentan curvatura ciclónica y deforman el campo de presión. La importancia de las ondas del este, frecuentes en la temporada lluviosa de la costa Caribe, radica en que el paso de una de ellas sobre un lugar dado produce alteraciones en el estado del tiempo, el cual se va deteriorando paulatinamente. Además, aunque solo un número reducido de estas ondas se intensifica, una gran parte de los huracanes tienen su origen en ellas. Tienen espesores de 6 a 8 kilómetros, en promedio unos 2000 kilómetros de longitud y se desplazan a velocidades de 15 a 30 km/h.

La zona costera del Caribe colombiano es afectada por estas perturbaciones atmosféricas entre los meses de mayo a noviembre, con un intervalo de aproximadamente seis días y un promedio de 39 ondas anuales, siendo más intensos los meses de junio a agosto con un promedio mensual de 10 a 9 ondas del este (Figura 5).



**Figura 5.** Porcentaje de ocurrencias de ondas del este registradas por el CIOH (Fuente: propia, con información del Boletín Meteomarinero Mensual CIOH (2004 / 2019).

### 1.3.3 Tormentas y huracanes

La temporada de huracanes para el área Caribe se inicia desde el primero de junio y se extiende hasta el mes de noviembre, siendo por datos estadísticos los meses

de agosto y octubre los más intensos. No obstante, se han presentado ciclones tropicales en muy bajo porcentaje durante el mes de mayo.

La probabilidad de que estos sistemas afecten territorio colombiano es apenas del 0,33 %; una cifra bastante reducida en comparación con otras áreas del Caribe (CIOH - ENSB, 2006). Los mayores daños asociados a estos sistemas son ocasionados por vientos fuertes, abundantes lluvias y marejadas en la costa. Continente adentro, se presentan inundaciones, deslizamientos y en menor intensidad vientos fuertes.

Entre 1965 y el 2004 el Caribe fue azotado por el paso de 140 ciclones tropicales, de los cuales 95 fueron huracanes clase 1 a 5, y 45 llegaron al grado de tormenta tropical. En los años 1957, 1962, 1976, 1982, 1983 y 1992, no se presentaron ciclones en ninguno de sus estados (en estos años se presentaron eventos cálidos El Niño), sin embargo, sí se presentaron en el Atlántico y Golfo de México, aunque en muy poca cantidad y baja intensidad. En los años post-niño, la ocurrencia de ciclones en el Mar Caribe, fue muy pobre (1984:1; 1985:1; 1986:1; 1987:2) (CIOH - ENSB, 2006).

Algunos de los más recordados en territorio colombiano fueron el Joan (octubre de 1988) que atravesó la península de la Guajira y se desplazó por el lado sur de San Andrés, el Roxanne (octubre de 1995) originado al norte del Archipiélago y César (julio de 1996) que efectuó su desplazamiento por el norte de la península de la Guajira y el Lenny (noviembre de 1999) que siguiendo una dirección atípica (oeste – este) afectó toda la costa norte colombiana.

La temporada de huracanes del 2020, fue especialmente fuerte estableciendo un récord mundial, teniendo en cuenta que se originaron 30 tormentas (con nombre asignado) de las cuales 12 llegaron a los EE.UU. En el caso colombiano, los huracanes Marco, Zeta, Eta e Iota, así como la tormenta tropical Gamma, pasaron por aguas colombianas, produciendo impactos en la zona costera con diferentes intensidades. En el caso de Eta e Iota, estos huracanes produjeron importantes daños en la infraestructura de la isla de Providencia.

La revisión de la actividad ciclónica entre 1964 y 2004 (CIOH - ENSB, 2006) permitió conocer que:

- El 24% de las tormentas tropicales originadas en el Atlántico afectaron el Mar Caribe.

- De las tormentas tropicales que afectaron el Caribe, solo el 8% afectaron las costas colombianas en el Caribe, lo que significa que solo el 2.6% de las tormentas nacidas en el Atlántico, afectaron las costas colombianas.
- En términos de la temporada de ciclónica, éste 2.6% de tormentas que afectaron las costas colombianas, el 75% ocurrieron en el mes de agosto y el 25% en el mes de diciembre.

En el caso del análisis de la afectación por huracanes en la costa colombiana se conocen las siguientes estadísticas:

- El 32% (13) de los huracanes originados en el Atlántico afectaron el Mar Caribe. Mientras que, de estos, solo el 17% afectó las costas colombianas. Lo que quiere decir que de los huracanes que se originaron entre 1964 y 2004, el 5.4% se acercó a las costas colombianas.
- En términos de la categoría de los huracanes que afectó la costa colombiana, estos se relacionan en la Tabla 2.
- En términos de los meses en que estos huracanes se hicieron evidentes en la costa, su distribución porcentual fue como lo muestra la Tabla 3.

**Tabla 2.** Categoría de huracanes que afectaron la costa colombiana.

Categoría	Porcentaje	Vel. Viento (nudos)
1	38.4%	64 – 82
3	15.38%	96 - 113
4	23%	114 - 135
5	23%	135

Fuente: CIOH (2006)

**Tabla 3.** Distribución porcentual de los meses en que se han presentado huracanes en el área de la costa Caribe colombiana (1964 – 2004).

Mes	Porcentaje
Julio	15.38 %
Agosto	15.38 %
Septiembre	46.1 %
Octubre	15.38 %
Noviembre	7.9 %

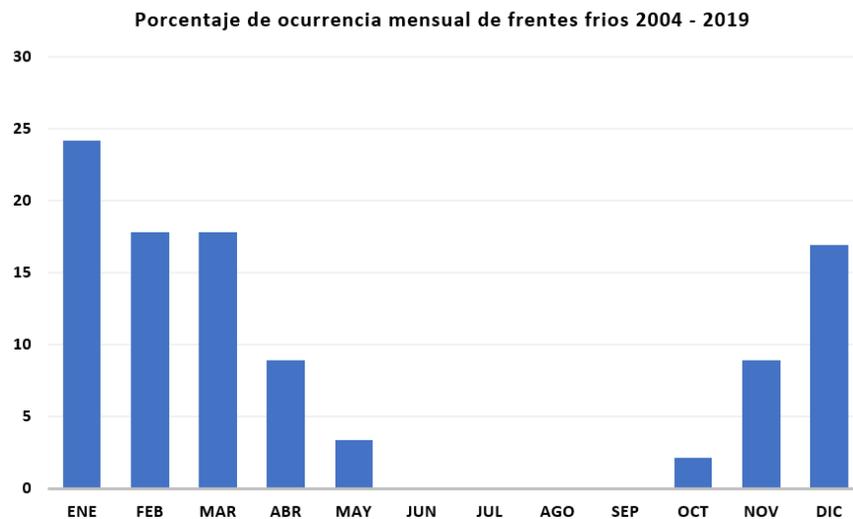
Fuente: CIOH (2006)

De acuerdo con (Willoughby & Rahn, 2004), el efecto por vientos de tormenta se limita a un radio de 100 a 150 km, incluso si el ojo de la tormenta se encuentra fuera de ese rango, los efectos como oleaje de fondo (mar de leva) y en general fuerte oleaje y lluvias, pueden representar un peligro para las zonas costeras.

Aunque un huracán no pase cerca de la línea de costa, éste puede generar oleaje de fondo (*swell*), fenómeno asociado a olas de tormenta que son generadas en lugares remotos y que viajan cientos de kilómetros hasta llegar a las playas. Se caracterizan por aparecer sin previo aviso, cuando no existe un sistema de observación climático, con períodos entre 12 y 18 segundos y alturas de 2 a 4 metros de acuerdo con la dinámica misma desde su formación hasta su arribo (Ortiz Royero, 2009).

### 1.3.4 Frentes fríos

Los frentes fríos ingresan (del ártico) al mar Caribe generando fuertes vientos y precipitaciones; sin embargo, estos frentes se disipan al norte del mar Caribe, por lo que en las costas del Caribe colombiano no se siente un efecto palpable en la temperatura. El mar Caribe es afectado anualmente por 15 frentes fríos en promedio, siendo los meses de diciembre a marzo los más activos (Figura 6). En algunos casos, la afectación directa es la ocurrencia de fenómenos de mar de leva.

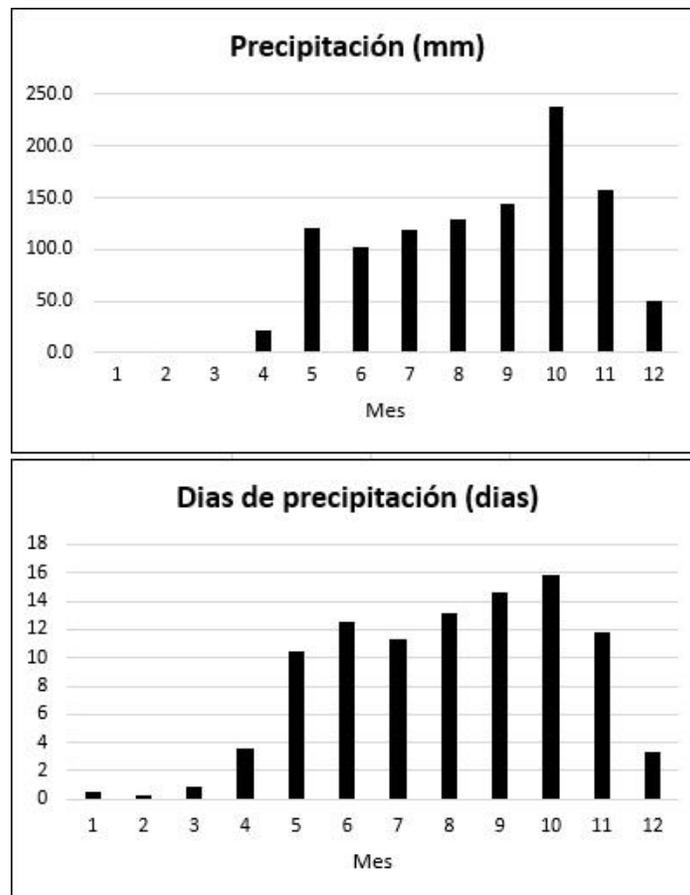


**Figura 6.** Porcentaje mensual de ocurrencia de frentes fríos registrados por el CIOH.  
Fuente: autor. Calculado con información del Boletín Met. Mensual CIOH 2004 / 2019).

## 1.4 FENÓMENOS DE MICROESCALA (LOCAL)

### 1.4.1 Precipitación

La precipitación es la evidencia directa de la presencia de la ZCIT en la costa Caribe y define las épocas del año.

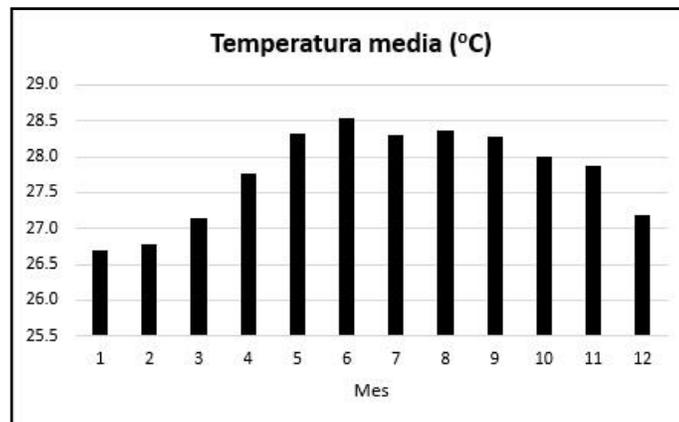


**Figura 7.** Precipitación promedio en el área de Cartagena. Fuente: datos tomados de IDEAM datos climatológicos 1981 – 2010. <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/clima>.

En el sector de Cartagena las lluvias inician en el mes de abril con un aumento sostenido hasta el mes de octubre, cuando inicia el final de la época húmeda (Figura 7). A partir de esa fecha la ZCIT sobrepasa Cartagena desplazándose hacia el sur.

### 1.4.2 Temperatura

En el área de interés, el clima está modelado por la dinámica de la Zona de Convergencia Intertropical que es un efecto directo de la declinación terrestre. Así entonces la dinámica de la ZCIT origina las épocas climáticas del año y consigo, cambios en la temperatura, precipitación, vientos y la humedad relativa, entre otros. En la Figura 8 se muestra la fluctuación anual de la temperatura promedio.



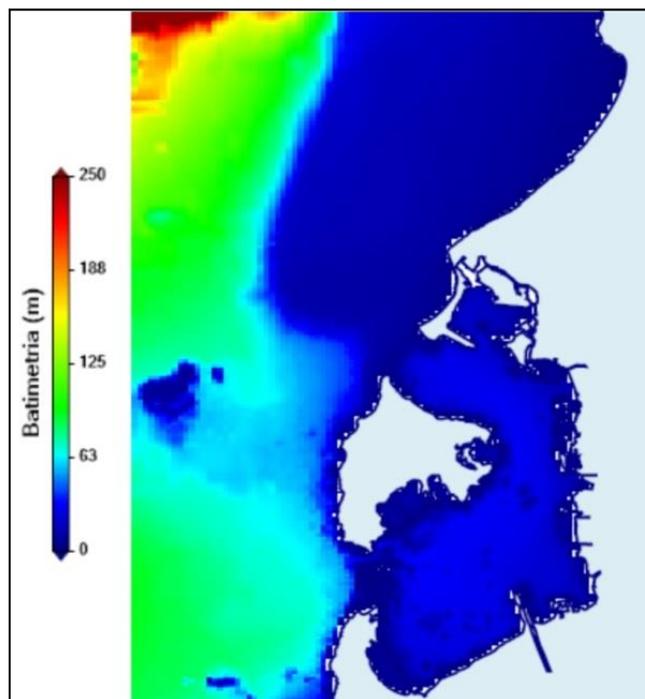
**Figura 8.** Temperatura ambiental promedio en el área de Cartagena. Fuente: datos tomados de IDEAM datos climatológicos 1981 – 2010. <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/clima>.

## Capítulo 2

# FACTORES OCEANOGRÁFICOS

### 2.1 BATIMETRIA

En el área general del proyecto, en la Bahía de Cartagena, que corresponde al sector de aguas profundas delimitado por la línea de costa entre la isla de Barú y Punta Canoas, se encuentran profundidades menores de 250 m. En la Bahía de Cartagena las profundidades son menores de 30 m. (Figura 9).



**Figura 9.** Batimetría en el área de influencia del proyecto.

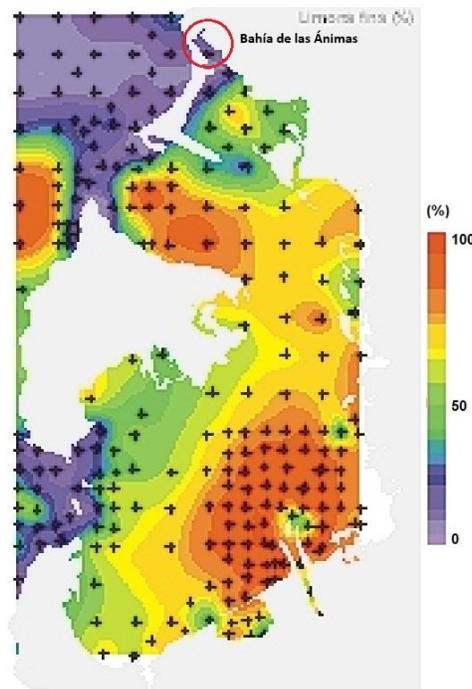
### 2.2 SEDIMENTOS BAHÍA DE CARTAGENA

Los mayores efectos en la dinámica de la sedimentación de la bahía se deben a la presencia de dos estructuras antrópicas: la Escollera de Bocagrande y el canal del

Dique. A lo largo de la Escollera se encuentra depositado el material relativamente grueso proveniente de la deriva litoral de Bocagrande y además se comporta como una barrera que afecta la dinámica del agua y los sedimentos en toda la bahía. Los sedimentos finos (lodos) que vienen del canal del Dique se encuentran en la mayoría de los fondos en las partes profundas de la bahía, ocupando las partes que hasta hace veinte años el predominio era de arenas en la parte interna de Bocachica (C. Andrade et al., 2004).

El material más fino de sedimentos en el fondo ( $10\ \mu\text{m}$ ), predominantemente limos y parcialmente arcillas, se encuentra en las zonas de baja velocidad del flujo (a lo largo de las costas y en la parte sur de la bahía), excepto la vecindad de la desembocadura del canal del Dique (Figura 10), donde la sedimentación de las partículas muy livianas no tiene que ocurrir debido a las altas velocidades del flujo (C. Andrade et al., 2004).

Andrade et al. (2004) analizan los cambios de la profundidad ocurridos recientemente (un siglo) en los fondos de la Bahía de Cartagena mediante la comparación de los levantamientos batimétricos de los años 1935, 1987 y 2004 y caracteriza y analiza la distribución de los sedimentos de la bahía en su parte externa e interna. Los resultados del estudio muestran que los sedimentos de la parte interior deben su repartición y origen a dos estructuras antrópicas, la Escollera de Bocagrande y el canal del Dique



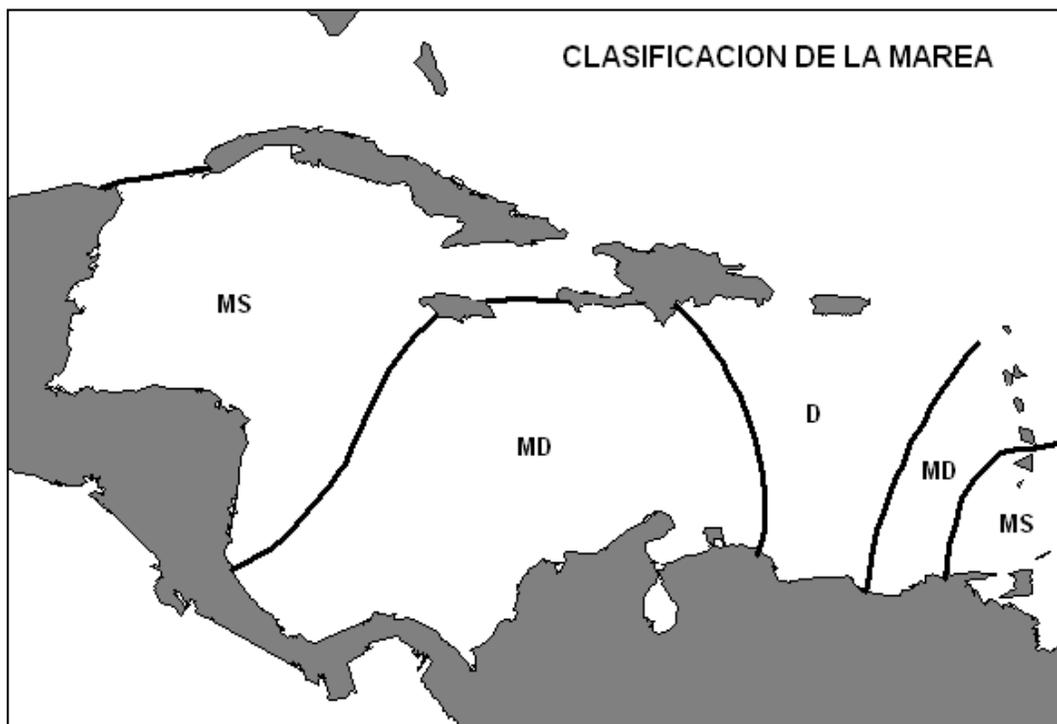
**Figura 10.** Composición, en %, de los limos finos (10  $\mu\text{m}$ ). Fuente: Modificado de Andrade et al. (2004).

Los sedimentos del Dique ya han ocupado las partes que eran arenosas de los fondos hace pocos años y su delta ha avanzado más de un kilómetro hacia el Norte, comprometiendo la profundidad del canal navegable de acceso a Bocagrande y la bahía interna de Cartagena (Figura 10).

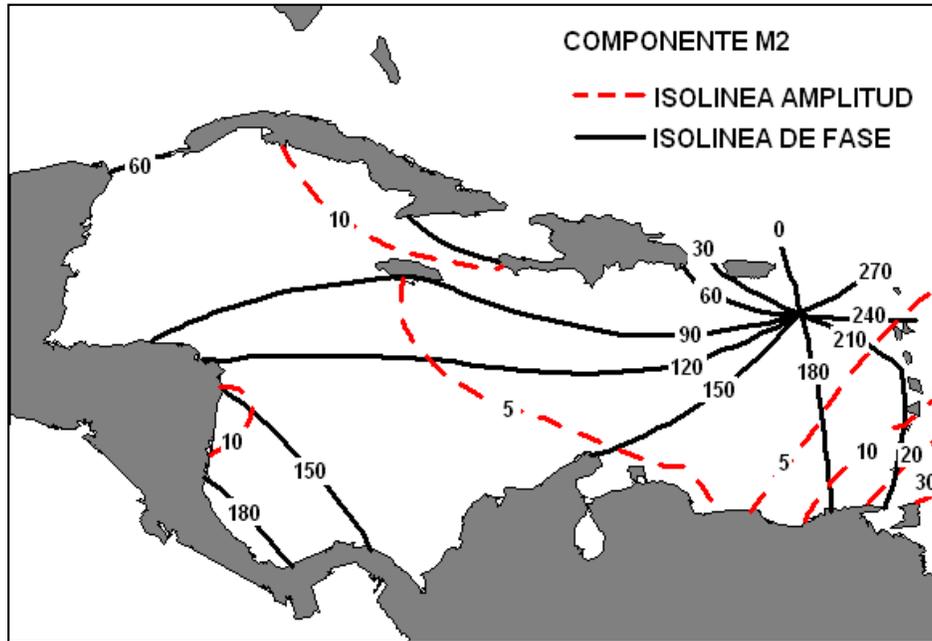
En el caso de la Bahía de las Ánimas, se evidencia que el impacto del canal del Dique en cuanto al aporte sedimentario de limos finos es casi inexistente.

### 2.3 MAREA

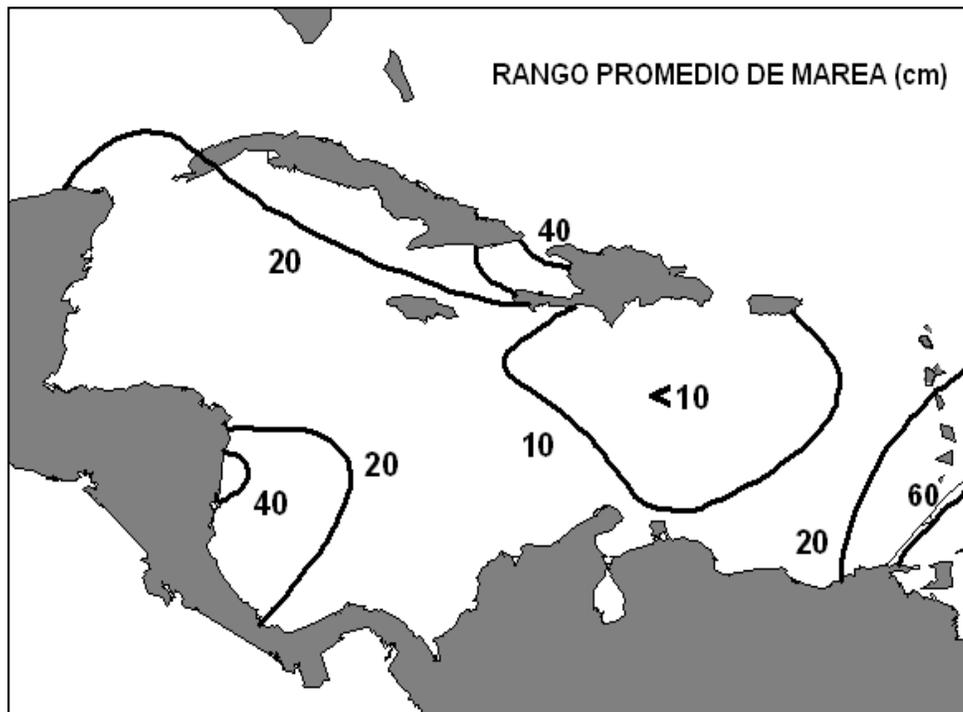
La marea del Caribe es débil, con un rango mareal que varía de 20 a 30 cm. y rara vez excede los 50 cm., por lo cual, se cataloga como micro mareal (rango  $<2$  m). De acuerdo con Molares (2004), la marea en el Golfo de Morrosquillo es del tipo mixta diurna, sin embargo, otros autores no tienen en cuenta la componente principal solar ( $S_2$ ) en la clasificación de la marea, definiéndola como mixta semidiurna (Ver Figura 11 – 13).



**Figura 11.** Clasificación de la marea en el Caribe. MS: Mixta principalmente semidiurna. MD: Mixta principalmente diurna. D: Diurna. Fuente: Adaptado de (Kjerfve, 1981).



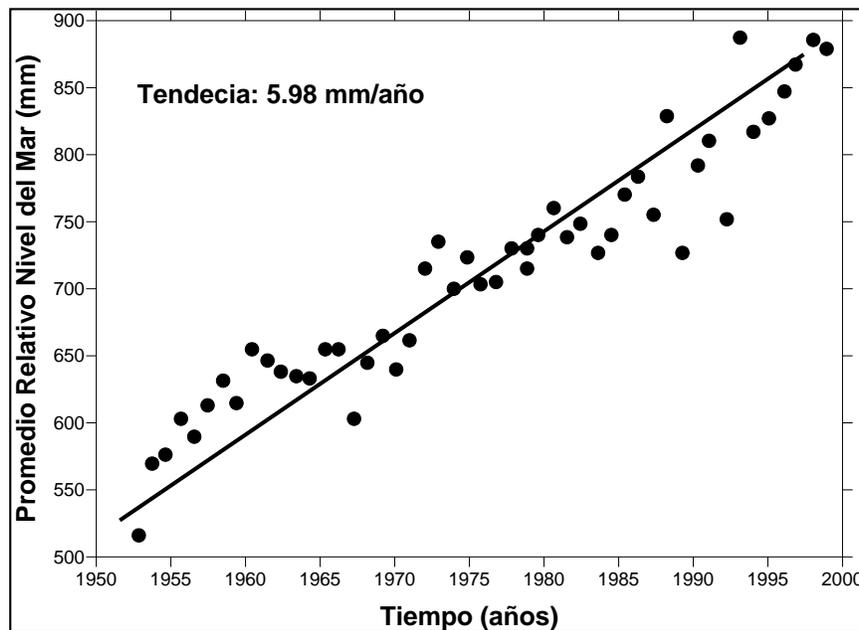
**Figura 12.** Componente M2 de la marea en el Caribe. Las líneas continuas negras representan líneas con la misma fase expresada en grados. Las líneas discontinuas (rojo) son isolíneas de amplitud en centímetros. Fuente: Adaptado de (Kjerfve, 1981).



**Figura 13.** Distribución especial del rango (cm) promedio de marea en el Caribe. Fuente: Adaptado de (Kjerfve, 1981).

## 2.4 ASCENSO RELATIVO DEL NIVEL DEL MAR

La falta de información disponible de mediciones del nivel del mar en sitio específico del proyecto no permite establecer una medición del ascenso del nivel del mar en ese sector, sin embargo, las mediciones existentes en Cartagena podrían ser representativas para una amplia región del Caribe colombiano (Ruiz-Ochoa et al., 2008)



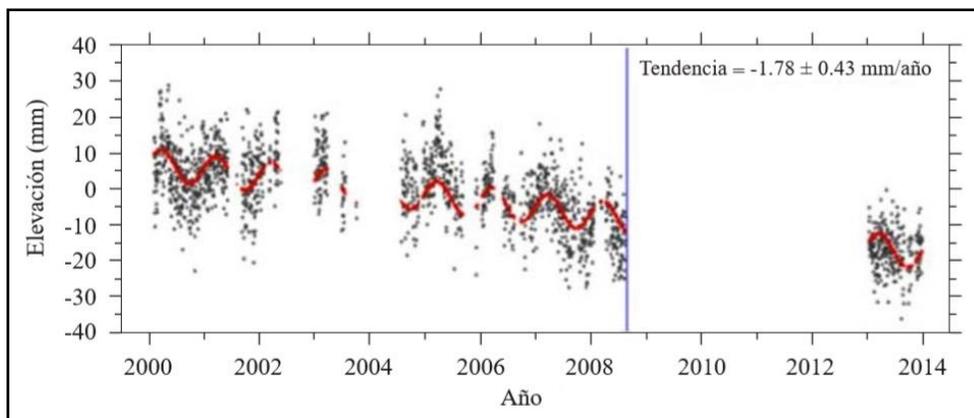
**Figura 14.** Ascenso relativo del nivel del mar en la Cartagena. Fuente: Modificado de (Restrepo & López, 2008)

El análisis de las series de tiempo de nivel del mar en Cartagena indica un ascenso relativo del nivel del mar de 5.98 mm/año (Restrepo & López, 2008) (Figura 14).

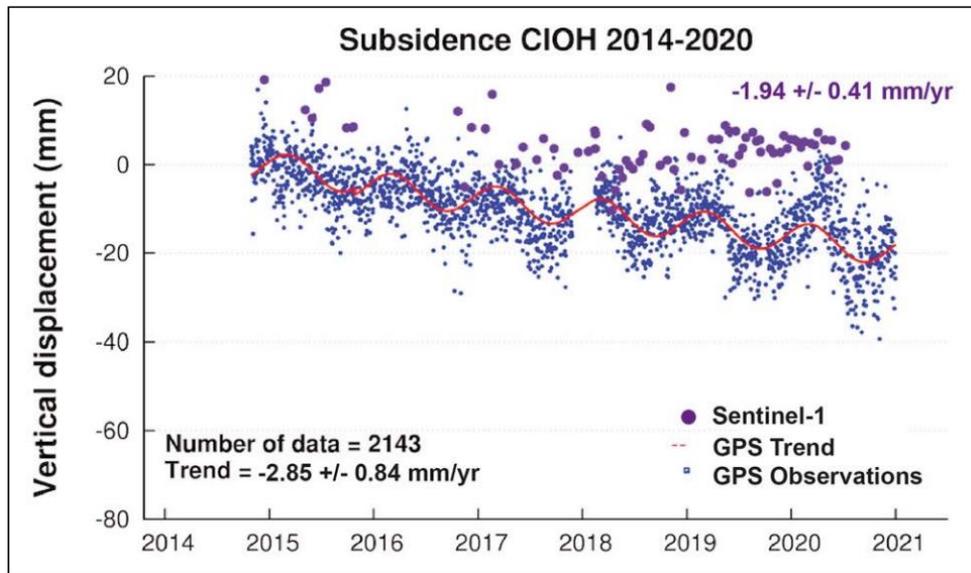
### 2.4.1 Subsistencia local

En los últimos años Colombia instaló estaciones GNSS (Global Navigational Satellite Systems) para definir la altura de referencia el cual está integrado dentro de la red continental SIRGAS (Geocentric Reference System for the Americas) para garantizar la consistencia del marco de referencia local con el sistema global de referencia. Aunque el equipo se encuentra instalado en Cartagena, las mediciones pueden ser tenida en cuenta como referencia para el área de estudio.

La estación geodésica de Cartagena (CART), forma parte de la red MAGNA-ECO del Instituto Geográfico “Agustín Codazzi” de Colombia. Fue instalada el 2 de marzo de 2000 en el CIOH, Isla de Manzanillo en Cartagena. Mediante el procesamiento de 1.841 datos, correspondientes al periodo entre el 3 de marzo de 2000 y el 29 de diciembre de 2013, Andrade, et al (2016) obtuvo una tendencia vertical de la velocidad de  $-1,78 \pm 0,43$  mm por año (Figura 15 y Figura 16).



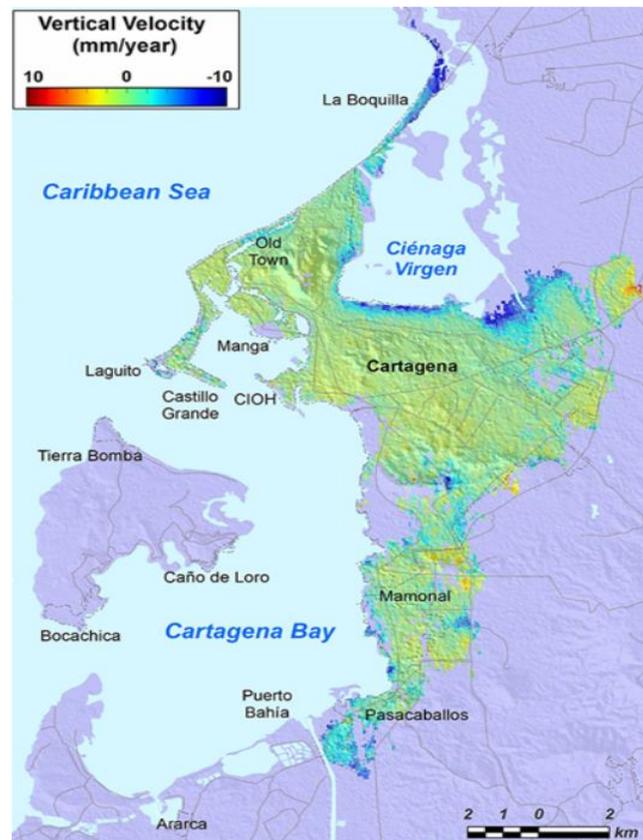
**Figura 15.** Desplazamiento vertical medido en Cartagena ( $10^{\circ} 23' 28,80N - 75^{\circ} 32' 1,87"W$ ).  
Fuente: (C. Andrade et al., 2017)



**Figura 16.** Desplazamiento vertical medido en Cartagena (10° 23' 28,80N - 75° 32' 1,87"W). Fuente: (Restrepo-Ángel et al., 2021).

Estudios más recientes han aplicado observaciones del Radar Interferométrico de Apertura Sintética (InSAR) sobre movimientos verticales (Restrepo-Ángel et al., 2021). Los resultados revelan una tasa a largo plazo (> 60 años) de aumento del nivel del mar (RSLR) de  $5.98 \pm 0.01$  mm/año. Las últimas dos décadas han mostrado una tasa aún mayor de RSLR de  $7.02 \pm 0.06$  mm/año. Las tasas de subsidencia medidas por GPS oscilan entre  $-5.71 \pm 2.18$  y  $-2.85 \pm 0.84$  mm/año. Los datos de InSAR para el período 2014–2020 muestran tasas acumulativas de subsidencia de hasta 72.3 mm. Se encontró que los movimientos verticales inducidos geológicamente representan el 41% de los cambios observados en el RSLR y que la subsidencia constituye una amenaza importante para la preservación de Cartagena. Las tasas de subsidencia geodésicas implicarían un aumento adicional de RSLR de 83 mm para 2050 y 225 mm para 2100.

En el caso específico del área del Centro de Convenciones de Cartagena, es muy parecida a la de la estación del CIOH, con valores de aproximadamente 2 mm/año (Figura 16).



**Figura 17.** Velocidad vertical (mm/año) calculado para la ciudad de Cartagena. Fuente: (Restrepo-Ángel et al., 2021)

## 2.5 MAR DE LEVA (SWELL)

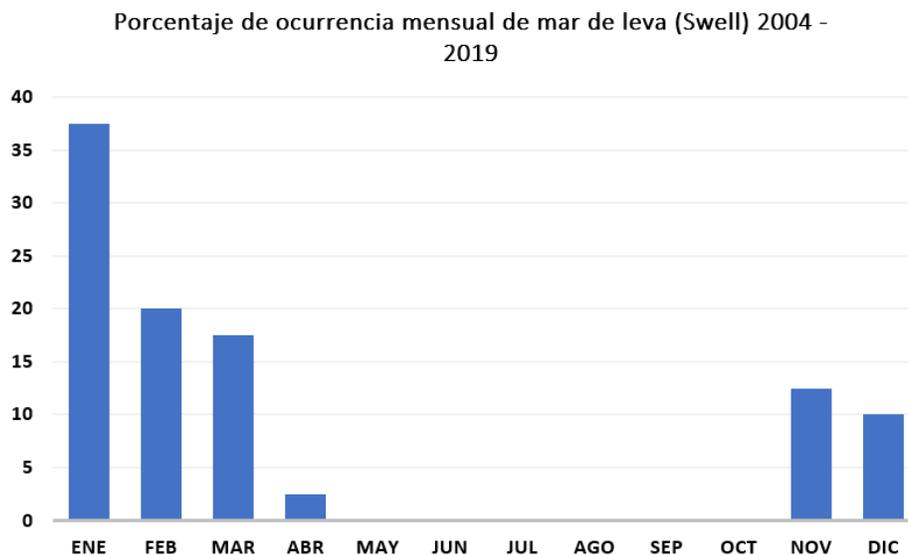
El fenómeno conocido como mar de leva consiste en el aumento anormal de la altura del oleaje, que es ocasionado por el efecto de fricción entre la superficie del mar y la masa de aire atmosférico en movimiento, el cual es intensificado con el paso de sistemas atmosféricos de mal tiempo (bajas presiones) que empujan las aguas oceánicas hacia la costa causando oleaje fuerte y aumento en el nivel del mar. El tamaño de las olas formadas depende de la velocidad y el tiempo que persista la misma velocidad de viento.

La incidencia de los efectos de este fenómeno sobre cualquier tipo de embarcación es mucho más fuerte en las áreas costeras ya que la altura de la ola aumenta en la medida que encuentre cambios en la profundidad. También se causan daños en la costa, provocando inundaciones en sectores aledaños a las playas y originando además diferentes grados de erosión que algunas veces ocasiona daños en las

construcciones cercanas tales como estructuras de muelles menores y viviendas que por su ubicación se expongan a los efectos directos del fenómeno.

En Colombia el fenómeno afecta la costa Caribe colombiana. Es típico de la época seca o de vientos (diciembre - abril), aunque las estadísticas muestran que casi siempre se presenta en enero y febrero y en algunas ocasiones se extiende a marzo. El sistema de mal tiempo que normalmente origina este fenómeno en el Caribe es el relacionado con la incursión del frente frío, que en su desplazamiento inicial hacia el sureste alcanza latitudes de 15° norte o menos. Esta incursión polar o frente lleva consigo un sistema de olas y vientos generados por su mal tiempo asociado y el cual comienza a viajar a través del Mar Caribe, con destino final las costas de Centroamérica, Venezuela y Colombia, donde se traduce en el fenómeno de mar de leva.

Su duración es de aproximadamente 48 horas siendo su inicio más intenso que su final, pero su impacto se ve reforzado por la acción de los vientos Alisios que por la época soplan del norte - noreste y son más intensos en horas de la tarde, lo cual hace el fenómeno más dañino en esas horas. De acuerdo con registros del CIOH el durante el evento se genera oleaje con una altura entre los 2 y 2.5 m. En la Figura 18 se muestra la ocurrencia porcentual de eventos de mar de leva sucedidos entre los años 2004 y 2019 de acuerdo con los Boletines Meteomarino Mensuales realizados por el CIOH.



**Figura 18.** Porcentaje mensual de ocurrencia de mar de leva registrados por el CIOH. Fuente: autor. Calculado con información del Boletín Met. Mensual CIOH 2004 / 2019).

## 2.6 COMPONENTES QUE DETERMINAN LA COTA DE INUNDACIÓN

Con la información de registros del nivel del mar disponibles en la Bahía de Cartagena (estación del CIOH en la isla de Manzanillo) se calcularon los componentes básicos que determinan la cota de inundación al norte de la bahía (isla de Manzanillo) y para el caso de un evento extremo probable. A continuación, se definen estas componentes y determinan los valores para cada una de ellas (Tabla 4).

**Promedio del nivel del mar (PNM):** Corresponde al valor promediado anual de los registros promediados mensualmente al cual se le sustrae el ascenso relativo del nivel del mar (ARNM). Este promedio se toma como la línea base para la determinación las componentes. Se encontró un PNM de 15.75 cm.

**Nivel del mar en el mes de octubre (NMO):** al presentarse en el mes de octubre los mayores niveles del mar y al no ser igual en cada año, es necesario determinar un promedio del nivel del mar para este mes (PNMO). El promedio del nivel del mar durante el mes de octubre se obtiene promediando el nivel del mar diario y luego encontrando el promedio de los meses de octubre de la serie de tiempo (1995 – 2001). Igualmente, se le sustrae el PNM, el efecto del Canal del Dique en la época húmeda (EFFCDO) y el aumento del nivel del mar por efecto del viento del sureste (SWW(SUP)). Al igual que con el PNM, a estos valores se les reduce el ARNM. El cálculo permitió encontrar in PNMO de 3.13 cm.

$$NMO = PNMO - PNM - EFFCDO - SWW (SUP) - ARNM$$

**Nivel del mar máximo del mes de octubre (NMMMMO):** el NMO no tiene en cuenta los picos en el nivel del mar (marea de Sicigia), por lo que, al evaluar un evento extremo, este valor deberá ser tenido en cuenta y es medido sobre el PNMO. El NMMMMO se obtiene de la sustracción del promedio de las máximas nivel del mar para el mes de octubre (PMNMO). El cálculo permitió encontrar in NMMMMO de 9.94 cm.

$$NMMMMO = PMNMO - PNMO - PNM - EFFCDO - SWW (SUP) - ARNM$$

**Aumento relativo del nivel del mar (ARNM):** incremento anual del promedio del nivel del mar. Este aumento puede ser causado por el cambio climático y por hundimiento del terreno (subsistencia). De acuerdo con Restrepo y López (2008), este valor es de 5.98 mm/año. En este cálculo se incluye el desplazamiento vertical por subsidencia, calculado por Mora et al. (2018), y que corresponde a 2.2 +/- 0.5 mm/año.

**Efecto del Canal del Dique en la época húmeda (EFFCDO):** incremento en el nivel del mar como producto del efecto de boyancia de aguas menos densas en la Bahía de Cartagena, por la descarga del Canal del Dique. De acuerdo con Molares (2011), este valor corresponde a 1.8 cm.

**Efecto por fenómeno de la niña (EFFENOS):** el fenómeno de la Niña produce un aumento en las precipitaciones, que incrementa el caudal de descarga del Canal del Dique, y que a su vez incrementa el nivel del mar en la costa oeste de la isla de Manzanillo en 1 cm (Molares, 2011).

**Aumento del nivel del mar por efecto del viento del sureste (SWW-SUP):** efecto del viento del suroeste durante la época húmeda, el cual produce un aumento en el nivel del mar por el apilamiento de masas de aguas contra el continente (set-up). De acuerdo con Molares (2011), este valor corresponde a 1 cm.

**Aumento del nivel del mar causado por tormentas (ANMCT):** el apilamiento de masas de agua contra el continente por efecto de fenómenos meteorológicos en el Caribe (tormentas y mar de leva), produce un incremento de 50 cm en el nivel del mar (Alexandre et al., 2011).

**Tabla 4.** Cálculo de la cota de inundación por eventos extremos contemplando ascenso del nivel del mar para los años 2040, 2050 y 2100.

COMPONENTE	ALTURA (cm) (sobre NMM)	DESCRIPCIÓN
ARNM (cm/año)	0.598	Aumento relativo del nivel del mar (incluye efectos por subsidencia)
ARNM varios autores	0.45	(C. A. Andrade, 2008)
	0.56	(Afanador-Franco et al., 2006)
	0.598	(Restrepo & López, 2008)
	0.56	(Sutherland et al., 2008)

Subsidencia	0.22	(Mora-Paez et al., 2018)
<b>ANMO</b>	<b>66.886</b>	<b>Anomalía del nivel del mar para los meses de octubre.</b>
NMO	3.138	Nivel del mar en el mes de octubre
NMMMMO	9.948	Nivel del mar máximo del mes de octubre
EFFCDO	1.8	Efecto del Canal del Dique en la época húmeda (R. Molares, 2011)
EFFENOS	1	Efecto por fenómeno de la Niña (R. Molares, 2011)
SWW-SUP	1	Aumento del nivel del mar por efecto del viento del sureste (R. Molares, 2011)
ANMCT	50	Aumento del nivel del mar causado por tormentas (Alexandre et al., 2008)
<b>COTA DE INUNDACION – PEOR ESCENARIO PROBABLE</b>		
<b>PROYECCIÓN</b>	<b>ALTURA (cm) (sobre NMM / 2020)</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
2040	78.84	Se calcula tomando la ANMO y adicionando un ARNM de 0.598 cm por cada año a partir del año 2020. La ANMO se calcula para condiciones extremas de marea (Sicigia), descarga del Canal del Dique durante la época húmeda y presencia de la Niña; se tienen en cuenta efectos de aumento del nivel del mar por el viento promedio del SW correspondiente a la época húmeda; y efectos de mar de leva, que, aunque no son frecuentes para esta época climática, existen evidencias sobre su ocurrencia.
2050	84.82	
2100	114.72	

**Nota:** Como se puede apreciar, este cálculo no incluye oleaje repentino producido dentro de la bahía por buques y lanchas, como tampoco el ocasionado por el régimen de viento y dinámica regional, que se describe más adelante.

## 2.7 CIRCULACION GENERAL DEL CARIBE

En el mar Caribe se destacan dos corrientes: La corriente del Caribe y la contracorriente de Panamá-Colombia, las cuales varían en intensidad dependiendo de la época del año y de los fenómenos de media escala presentes (C. A. Andrade & Barton, 2000)

Durante la época seca, la Zona de Convergencia Intertropical se ubica en su posición más meridional y es cuando soplan los vientos Alisios del noreste. Bajo esas circunstancias, la corriente del Caribe se hace presente en las aguas someras lo que induce transporte sedimentos en dirección hacia el oeste. La corriente del Caribe hace un giro ciclónico al acercarse a las costas de Panamá, e invierte su sentido hacia el este a lo largo de la costa colombiana. De esa forma se genera otra

corriente de menor velocidad y de sentido opuesto: la contracorriente de Panamá-Colombia. La velocidad de la contracorriente oscila entre 0.7 a 1.2 nudos y afecta la capa superficial de agua (Pujos et al., 1986). Estudios recientes han mostrado que la contracorriente tiene su máxima velocidad en 100m de profundidad en el área de estudio y que es casi permanente a esa profundidad (C. Andrade et al., 2003).

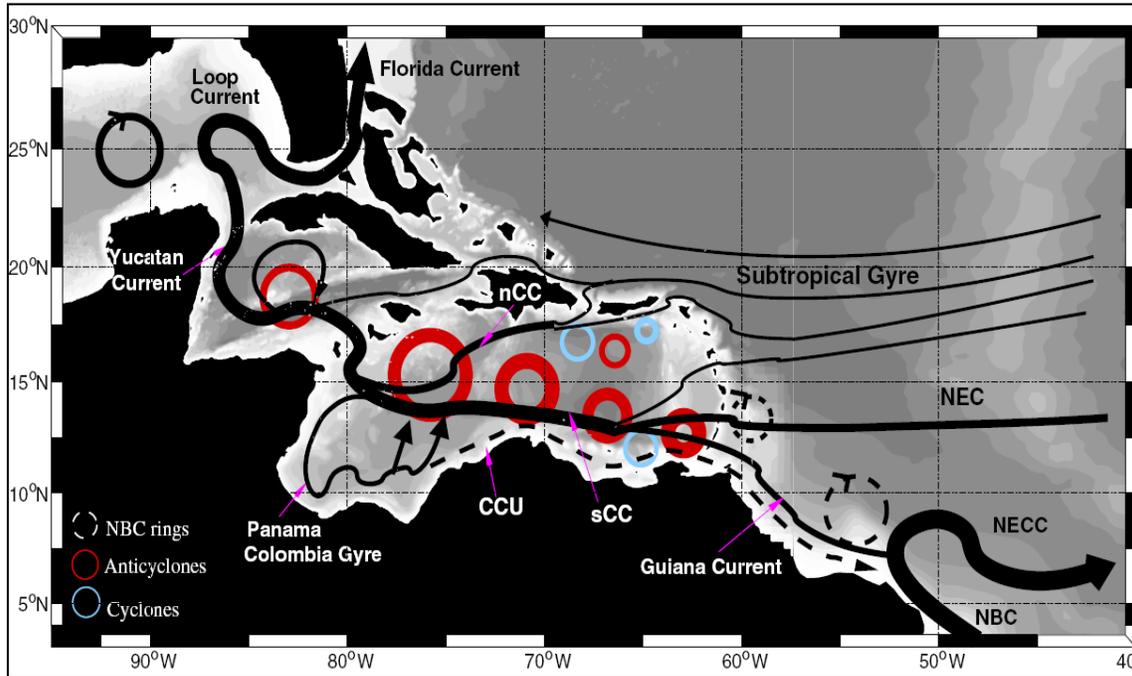
En la superficie, la contracorriente de Panamá-Colombia se detecta únicamente en el Golfo de Urabá durante la época seca. En la época húmeda, adquiere mayor importancia y se extiende, durante seis meses, hasta los alrededores de la desembocadura del río Magdalena. Incluso llega hasta las costas de la Guajira durante los meses más lluviosos del año, en octubre y noviembre (Pujos et al., 1986).

De forma más general, otros autores explican la circulación del Caribe de acuerdo con la Figura 19. La superficie del mar Caribe generalmente presenta corrientes que fluyen al oeste y que cambian de dirección en las elevaciones de las Aves, Beata y la plataforma de Venezuela antes de acercarse a la frontera natural que interrumpe la conexión del Atlántico y el Pacífico (Holcombe & Moore, 1977). Esta advección hacia el oeste confronta la elevación de Centro América y el flujo gira hacia el noroeste del Golfo de México. Esta corriente principal llamada Corriente Caribe tiene componentes norte y sur (Corriente Caribe del Sur – sCC, Corriente Caribe del Norte – nCC) .

La sCC, que es la principal fuente de la Corriente del Golfo empieza donde la Corriente Guyana y la Corriente Ecuatorial del Norte (NEC) fluye hacia las Antillas Menores. Esta continúa a lo largo de la costa norte de Venezuela, Colombia, Centro América y sur del arco de las Antillas Mayores. Su continuación hacia el oeste es conocida como la Corriente Yucatán y cuando ésta pasa al Golfo de México asume el nombre de Corriente de Giro (Loop Current). Este flujo se mantiene a través del estrecho de la Florida y se reconoce como la Corriente de Florida, iniciando la Corriente del Golfo. El flujo hacia el oeste de las Antillas se conoce como la Corriente de las Antillas (nCC). El movimiento opuesto profundo debajo esta corriente es parte de la corriente del oeste que actúa como una frontera continua que fluye fuera del Caribe (Fine & Molinari, 1988).

Empleado el modelo ROMS\_AGRIF V2.1 fue efectuada una simulación de la circulación superficial del Mar Caribe para las diferentes épocas del año. Los flujos superficiales fueron obtenidos de la base de datos COADS (*Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set*) que es la colección de datos más extensa disponible de datos marinos de superficie de los dos últimos siglos, e incluye datos de temperatura del

aire, presión a nivel del mar, temperatura superficial del mar, viento escalar, humedad relativa y específica, así como parámetros de calor, con una resolución de 1° X 1°.



**Figura 19.** Patrones principales de corrientes dentro y fuera del Mar Caribe: Corriente del Norte de Brasil (NBC), Corriente Ecuatorial del Norte (NEC), Corriente Caribe del Sur (sCC), Corriente Caribe del Norte (nCC) y Corriente Caribe Subsuperficial (CCU). Los círculos representan estructuras con movimiento hacia el oeste: vórtices de la NBC (punteado), vórtices anticiclónicos (rojo) y vórtices ciclónicos (azul). Fuente: (Jouanno et al., 2009).

Para los campos climatológicos fue empleado el World Ocean Atlas 2005 (WOA05), el cual es un set de campos climatológicos analizados objetivamente (resolución espacial 1°) de temperatura in situ, salinidad, oxígeno disuelto, nutrientes a profundidades estándar para periodos anuales, estacionales y mensuales de todo el océano. Fue extractada la información relativa al Mar Caribe para forzar el modelo.

## 2.8 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Los sedimentos transportados por el canal del Dique son de carácter terrígeno con un bajo contenido de arenas. La mayoría de las partículas son limos, con un tamaño de grano de unas micras, y arcillas, que se encuentran en menor cantidad. La concentración de los sólidos en suspensión -1 puede superar 1,000 mg/L en Pasacaballos (Lonin et al., 2004) El sedimento se transporta tanto por el arrastre del fondo como en suspensión. La formación de los flóculos tiene lugar en la desembocadura del canal donde se encuentra el frente entre las aguas dulces y salobres, con salinidades alrededor de 10 (Krone, 1962). La floculación favorece una intensa sedimentación en la boca del canal.

Otros autores reportan para el río Magdalena, concentraciones de sedimentos de alrededor de 4 kg/m<sup>3</sup> (4000 mg/L) (Higgins et al., 2016). Por otra parte, los diagnósticos de la calidad de aguas marinas y costeras del Caribe y Pacífico colombianos (Invemar) registran en los reportes de los años 2014 al 2019 una concentración de sedimento en la desembocadura del canal del Dique (Bahía de Cartagena), en promedio, para la época seca, de 135 mg/L, mientras que, para la época húmeda, 243 mg/L. En la Tabla 5 se relacionan las concentraciones medidas en las estaciones REDCAM.

**Tabla 5.** Concentración de sólidos suspendidos totales (SST) en cuatro estaciones REDCAM de la Bahía de Cartagena para diferentes años en las dos épocas climáticas principales.

ESTACIÓN	2014		2015		2016		2017		2018		2019		PROMEDIO	
	SECA	HUM	SECA	HUM										
DIQUE		160	80	160	12.5	180	120		220	470	242		135	243
CORELCA		35	60	7	12.5	15	18			24	27		29.4	20.3
ALCALIS		25	30	10	25	10	20		15	23	20		22	17
ASTILLERO		60	20	15	45	25	40			28	21		31.5	32

**Fuente:** datos tomados de “Diagnóstico de la calidad de aguas marinas y costeras del Caribe y Pacífico colombianos” (Invemar. Reportes 2014 a 2019).

La dinámica de sedimentos en la Bahía de Cartagena ha sido definida de acuerdo con 5 patrones de transporte de sedimentos (Lonin et al., 2004):

- **Patrón I:** Pluma con tendencia única en dirección Norte, gran magnitud de aporte de sedimentos y cubrimiento limitado de la parte lateral Este, extendiéndose hasta el sector más al Norte de la bahía, la bahía interior, es decir sectores noroeste y sureste. Se presume que este tipo de

comportamiento es consecuencia de un evento previo de lluvias y a la ausencia de vientos.

- **Patrón II:** Pluma con tendencia única en dirección Norte, gran magnitud de aporte de sedimentos y cubrimiento limitado a la mitad inferior, extendiéndose hasta la isla de Tierrabomba, sector Sureste. Se presume que este tipo de comportamiento es consecuencia de un evento previo de altas lluvias y presencia de vientos del Noreste.
- **Patrón III:** Pluma con tendencia única en dirección Norte, poco aporte de sedimentos y cubrimiento limitado a la parte inferior, concentrándose en la desembocadura del canal, es decir sector sureste. Se presume que este tipo de comportamiento es consecuencia de un evento previo de escasas lluvias y ausencia de vientos.
- **Patrón IV:** Pluma con tendencia única en dirección Noroeste, dirigida a la parte sureste de la isla de Tierraboma; aportes moderados de sedimentos, concentrado en la desembocadura del Canal y con cubrimiento parcial, localizado en el sector suroeste de la bahía. Se presume que este tipo de comportamiento es consecuencia de un evento previo de pocas lluvias y presencia de vientos del Noroeste.
- **Patrón V:** Pluma con tendencia única en dirección Noroeste, magnitud moderada de aporte de sedimentos y cubrimiento limitado a la mitad inferior de la bahía, extendiéndose hasta la isla de Tierrabomba, sector sureste. Se presume que este tipo de comportamiento es consecuencia de un evento previo de escasas lluvias y ausencia de vientos.
- **Patrón VI:** Pluma dividida en dos brazos, uno al Norte, tendiendo a Tierraboma y un segundo al Oeste, dirigido al canal de Bocachica; gran cantidad de aportes de sedimentos, concentrado en los dos brazos y con cubrimiento extendido sobre la totalidad de la bahía, incluyendo la bahía interior, es decir los cuatro sectores. Se presume que este tipo de comportamiento es consecuencia de un evento previo de lluvias y presencia de vientos del Noroeste.

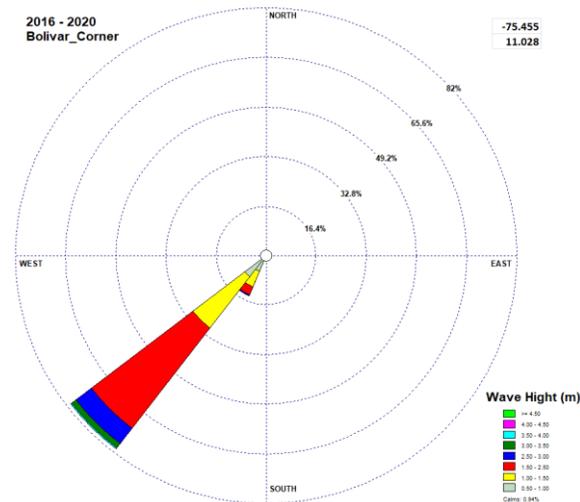
De los principales mecanismos que afectan la forma de la pluma, el de mayor impacto, es el flujo o aporte del canal, cuyas oscilaciones son del carácter estacional con perturbaciones pronunciadas, relacionadas con los eventos de lluvias en el recorrido del canal y el río de Magdalena. Un papel adicional en la distribución de la pluma juega el viento (Lonin et al, 2004).

## 2.9 REGIMEN DE OLEAJE

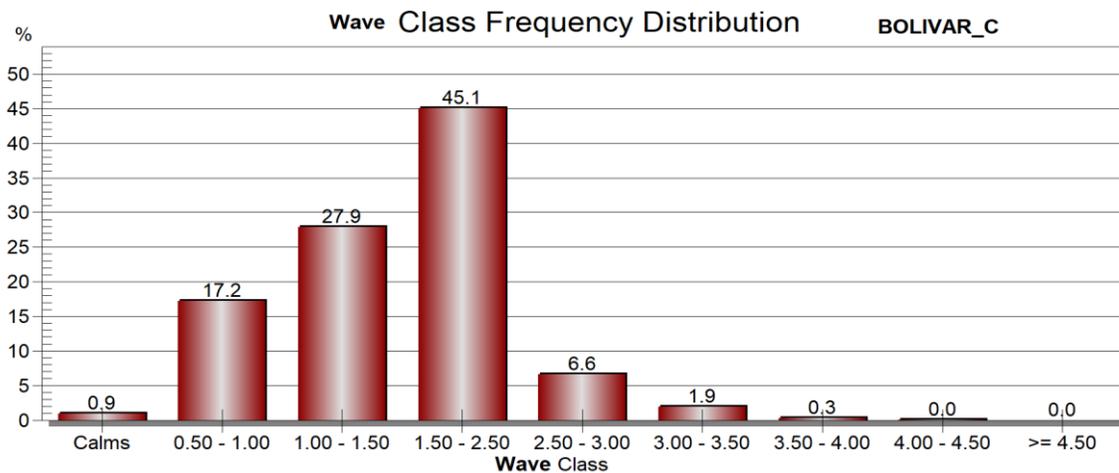
### 2.9.1 Oleaje en aguas profundas

Para la caracterización del oleaje en aguas profundas se analizó una serie de tiempo de oleaje con un intervalo de tres horas y con una longitud de un año (2024) en aguas profundas del Caribe, frente a Cartagena. La serie fue obtenida de la base de datos Copernicus. El producto empleado fue GLOBAL\_ANALYSISFORECAST\_WAV\_001\_027.

Se encontró que oleaje es principalmente hacia el suroeste Figura 20, correspondiendo al 94% de las ocurrencias (Tabla 6). En cuanto a la altura significativa (hs) las ocurrencias del 17.2%, 27.9% y 45.1% corresponden al rango de 0.5m – 1m, 1m-1.5m y 1.5m – 2.5m, respectivamente (Figura 21).



**Figura 20.** Rosa de oleaje en aguas profundas frente a Cartagena. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 21.** Distribución de frecuencias de clases de la altura de la ola. Fuente: elaboración propia.

**Tabla 6.** Tabla de distribución de frecuencias cruzada de la altura y dirección de la ola. Fuente: elaboración propia.

Dirección	Altura de la ola (m)								Total
	0.50 - 1.00	1.00 - 1.50	1.50 - 2.50	2.50 - 3.00	3.00 - 3.50	3.50 - 4.00	4.00 - 4.50	>= 4.50	
7.5 - 22.5	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
22.5 - 37.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
37.5 - 52.5	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03
52.5 - 67.5	0.00	0.10	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.16
67.5 - 82.5	0.08	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.12
82.5 - 97.5	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04
97.5 - 112.5	0.02	0.03	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08
112.5 - 127.5	0.03	0.03	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08
127.5 - 142.5	0.10	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14
142.5 - 157.5	0.19	0.23	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.45
157.5 - 172.5	0.29	0.18	0.14	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.62
172.5 - 187.5	0.57	0.20	0.05	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.84
187.5 - 202.5	1.08	0.21	0.23	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	1.55
202.5 - 217.5	5.75	5.64	2.77	0.30	0.06	0.00	0.00	0.00	14.53
217.5 - 232.5	9.00	21.20	41.71	6.24	1.85	0.32	0.02	0.00	80.34
232.5 - 247.5	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03
247.5 - 262.5	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
262.5 - 277.5	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
322.5 - 337.5	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
337.5 - 352.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sub-Total	17.21	27.90	45.09	6.60	1.91	0.32	0.02	0.00	99.06

## Capítulo 3

# CONFIGURACIÓN DE LOS MODELOS

Para la modelación de corrientes se empleará el modelo MOHID (versión profesional), que incluye un módulo hidrodinámico y otro de transporte, lo cual permitirá calcular la dinámica hidrodinámica y de transporte de sedimentos, dependiendo de la morfología submarina (batimetría) y morfología costera (línea de costa), las fuentes de sedimentos tales como descarga de sedimentos por escorrentías, caños y el canal del dique, y re-suspensión de sedimentos por corrientes barotrópicas o baroclínicas (vientos, mareas y diferencias de densidad).

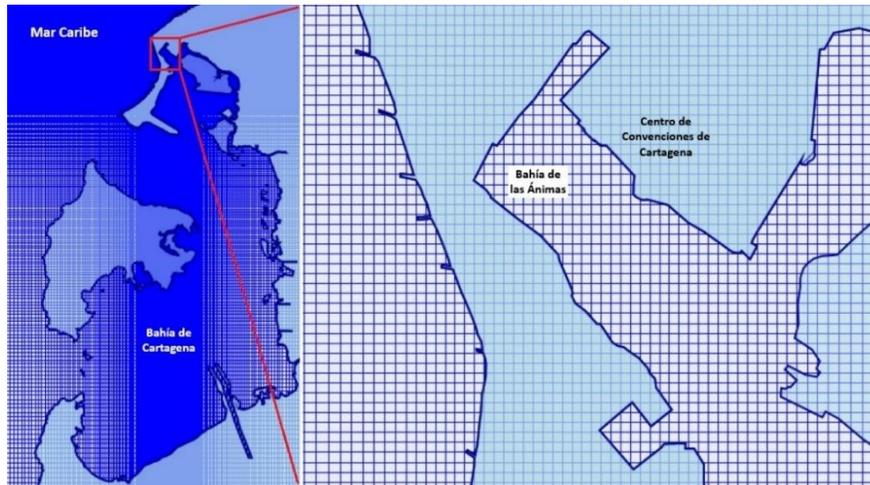
Por otra parte, se empleará el módulo de oleaje (SWAN), incluyendo así el transporte por corrientes generadas del oleaje, lo cual es importante en caso de eventos específicos de fuerte oleaje (ej. mar de leva; incremento de vientos).

En el presente capítulo se describe la configuración del modelo y el diseño de los escenarios de modelación necesarios para conocer el impacto de las obras propuestas en la dinámica oceanográfica.

### 3.1 GRILLA DE CÁLCULO

#### 3.1.1 Modelo hidrodinámico (corrientes)

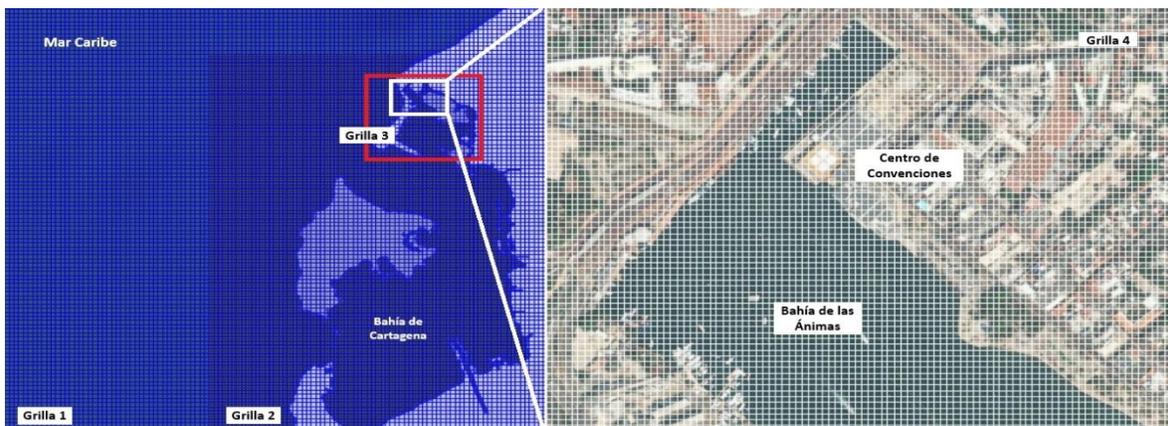
Para el cálculo de corrientes, se generó una malla de cálculo con resolución variable. Los tamaños máximos se ubicaron en las fronteras sur, este y oeste, con el objetivo de alcanzar un menor tamaño de celda en la Bahía de las Ánimas. Esto permite obtener una malla de cálculo con tamaños de celdas entre 200 y 15 metros, logrando una alta resolución en la Bahía de las Ánimas sin comprometer la estabilidad de los cálculos, debido a que la variación del tamaño de celda es progresiva (Figura 22).



**Figura 22.** Malla del dominio de cálculo de corrientes en la Bahía de Cartagena.

### 3.1.2 Modelo de oleaje

Con el propósito que el oleaje en el área específica de interés tuviera las características de su génesis (oleaje de aguas profundas), se diseñó un esquema de grillas de cálculo desde aguas profundas hasta la bahía de las ánimas (Figura 23). El esquema contempla grillas anidadas así: una grilla (1) general (parent grid), una grilla general de la Bahía de Cartagena (grilla 2) y finalmente dos grillas adicionales en la bahía interna y bahía de las ánimas (grilla 5 y 6). Las características de las grillas se describen en la Tabla 7.



**Figura 23.** Dominio de cálculo es un esquema de cuatro grillas. La grilla 4 (der.) corresponde al área de interés, en la Bahía de las Ánimas, cubriendo el borde costero del Centro de Convenciones de Cartagena.

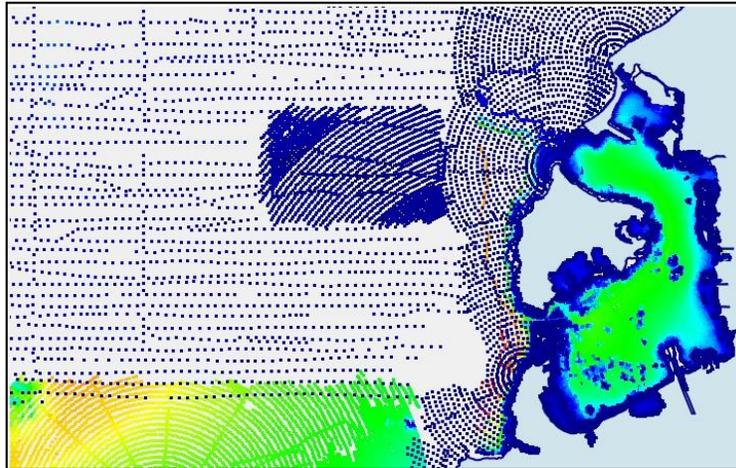
**Tabla 7.** Características de las grillas de cálculo de oleaje.

GRILLA	NODOS		Resolución (m)
	X	Y	
1	107	105	200
2	213	276	66
3	405	303	22
4	348	279	7

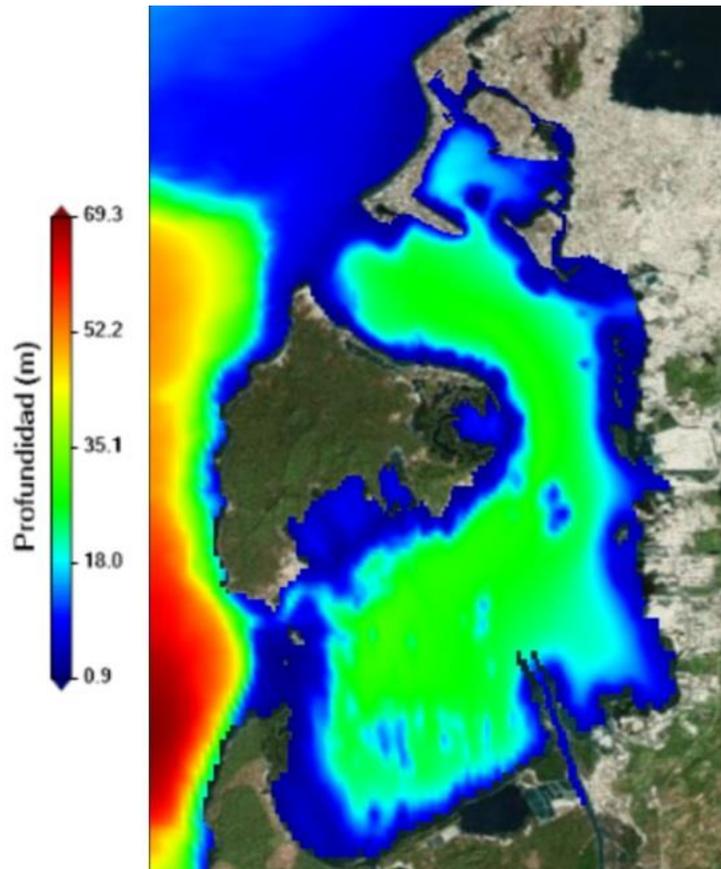
### 3.2 BATIMETRIA

Para la construcción de las grillas batimétricas fue utilizada la información batimétrica de la carta náutica COL 409 (Bajo Tortuguillas – Punta Canoas), COL 261 (Bahía de Cartagena), COL 255 (Islas del Rosario). Esta información batimétrica de la cartografía náutica nacional obtenida por la Dirección General Marítima – CIOH, fue extractada del software SONDas3, desarrollado por DIMAR. Además de lo anterior, se incluyó el levantamiento batimétrico del proyecto frente al borde costero del Centro de Convenciones y se digitalizó el área de la Bahía de las Ánimas de la carta COL 261 edición diciembre del 2023 (Figura 24). Con esta información se construyeron las grillas batimétricas de acuerdo con los dominios de cálculo definidos anteriormente para corrientes (Figura 25) y para el oleaje (Figura 26).

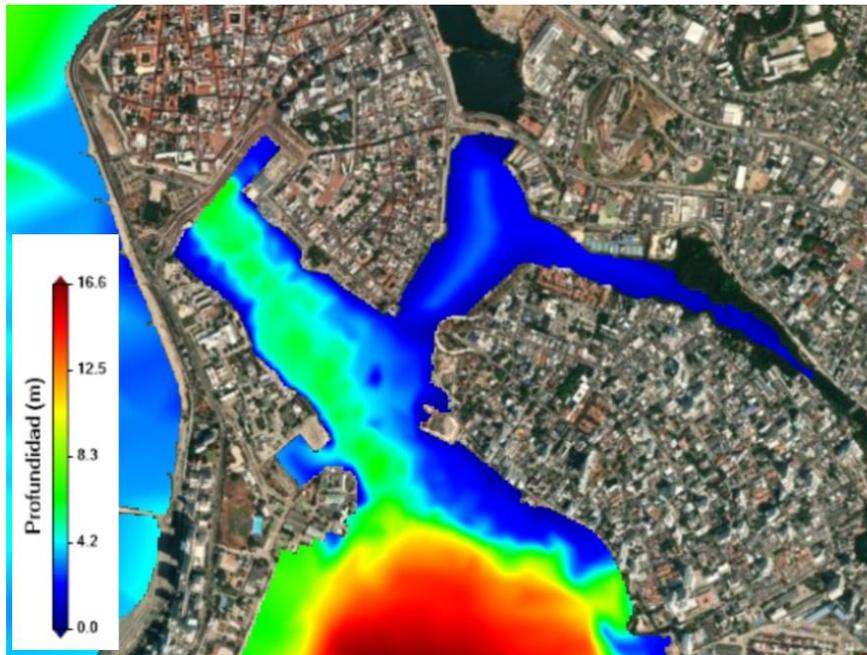
<sup>3</sup> El módulo de batimetrías y cartas náuticas de las costas de Colombia, **SONDas**, fue desarrollado por el CIOH – Pacífico (CCCP), con apoyo y asesoría del Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas, GIOC, de la Universidad de Cantabria de España en el año 2003.



**Figura 24.** Sondeos empleados para la construcción de las grillas de cálculo diseñadas.



**Figura 25.** Grilla batimétrica de la Bahía de Cartagena, modelo de corrientes.



**Figura 26.** Grilla batimétrica de Bahía de las Ánimas (Grilla 4), modelo de oleaje.

### 3.3 DEFINICIÓN DE LAS CONDICIONES DE FRONTERA

El cálculo de la dinámica de oleaje y de transporte de sedimentos se diferencia a lo largo del año de acuerdo con el régimen del clima. Teniendo en cuenta lo anterior fueron definidos varios escenarios de simulación para cada uno de los casos.

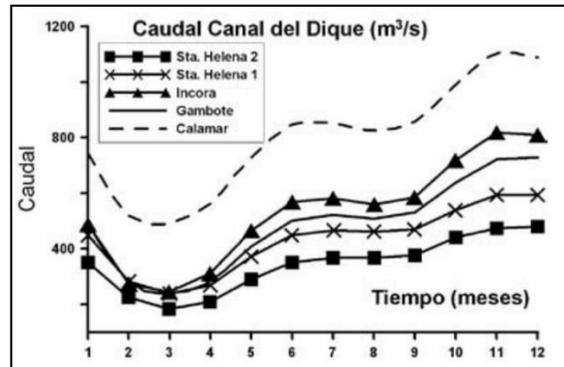
#### 3.3.1 Corrientes

Considerando que las principales forzantes de la circulación de aguas (corrientes) son la marea, el viento y la descarga del Canal del Dique, a continuación, se definen cada una de ellas para efecto de la configuración del modelo hidrodinámico.

##### 3.3.1.1 Descarga del Canal del Dique

El nivel del Canal del Dique depende del nivel del río Magdalena y del nivel del mar en la Bahía de Cartagena y en la Bahía de Barbacoas. El promedio anual del caudal en el río Magdalena es de alrededor de 7163 m<sup>3</sup>/s del cual, en promedio, cerca del

8 % (540 m<sup>3</sup>/s) es distribuido al Canal del Dique. Este porcentaje varía dependiendo de las condiciones del flujo del Magdalena en un rango entre el 9 % para los caudales máximos (1200 m<sup>3</sup>/s correspondientes a 16000 m<sup>3</sup>/s del Magdalena) a un 4 % durante los mínimos valores de caudal. En promedio, la Bahía de Cartagena recibe una rata de caudal de agua dulce de 130 m<sup>3</sup>/s (Ordoñez et al, 2007).



**Figura 27.** Variación mensual del caudal promedio (1984-2000) en cinco estaciones hidrológicas a lo largo del Canal del Dique. Santa Helena II es la estación más cercana a la desembocadura del Canal del Dique en la Bahía de Cartagena. (Adaptado de Unal, 2008).

La variación del caudal del Canal del Dique presenta un incremento sostenido de marzo a junio y de septiembre a noviembre, con tasas decrecientes entre estos periodos (Figura 27). Este comportamiento está estrechamente relacionado con las ratas de precipitación, cuyos máximos se dan en noviembre, con valores mínimos en marzo.

Las ratas de descarga para las épocas climáticas correspondientes a la época seca (diciembre– abril), época intermedia (mayo – junio) y a la época húmeda (septiembre– noviembre), 50, 150 y 350 m<sup>3</sup>/s, respectivamente (Molares y Mestres, 2012). Para el presente proyecto se considera el escenario más extremo probable (350 m<sup>3</sup>/s).

### 3.3.1.2 Viento

A diferencia del caso de la modelación del oleaje, en el que se emplea velocidades del viento en aguas abiertas, para el caso de la simulación de corrientes, ya que la

influencia del viento es local, se emplean los promedios de la variable de acuerdo con las épocas climáticas.

El viento con mayor ocurrencia es del norte, por la posición del borde costero del Centro de Convenciones, el viento más importante para considerar es el viento del 270, el cual es característico en los meses de agosto y noviembre (Tabla 8). En cuanto a la velocidad se define una velocidad de 4 m/s la cual supera los promedios mensuales (Tabla 9).

**Tabla 8.** Resultado del análisis de la dirección del viento de Cartagena (Molares, 2011)

DIRECTION	MONTH											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	<b>Magnitude</b>											
0	50.45	54.99	54.26	48.87	27.94	-	16.18	14.44	-	-	22.20	39.36
45	-	-	-	16.67	-	-	-	-	-	-	-	16.57
180	-	-	-	-	-	16.23	18.59	18.00	23.14	26.39	22.02	-
225	-	-	-	-	-	-	-	-	14.16	16.63	-	-
270	-	-	-	-	23.31	25.32	22.55	21.57	26.25	29.64	18.53	16.57
315	-	-	-	-	14.23	15.42	-	-	-	-	-	-
	<b>Total occurrence</b>											
<b>Occurrence</b>	50.45	54.99	54.26	65.53	65.48	56.98	57.31	54.01	63.56	72.66	62.75	72.50
	<b>Resulting monthly wind direction vector</b>											
	0.0	0.0	0.0	11.0	318.0	262.0	242.0	260.5	228.0	227.3	270.6	354.0

**Tabla 9.** Resultado del análisis de la velocidad del viento de Cartagena (R. Molares, 2011)

DIRECTION	MONTH											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	<b>Average wind speed (m/s)</b>											
0	3.06	3.82	3.43	3.40	2.71	-	2.93	3.02	-	-	2.99	2.76
45	-	-	-	3.43	-	-	-	-	-	-	-	2.39
180	-	-	-	-	-	2.23	2.76	2.51	2.77	2.35	-	-
225	-	-	-	-	-	-	-	-	3.84	3.17	-	-
270	-	-	-	-	2.91	3.04	3.18	3.03	3.30	3.09	2.89	2.94
315	-	-	-	-	3.60	3.06	-	-	-	-	-	-
	<b>Applied weight for each chosen wind directions during the month</b>											
0	1.00	1.00	1.00	0.75	0.43	-	0.28	26.73	-	-	0.35	0.54
45	-	-	-	0.25	-	-	-	-	-	-	-	0.23
180	-	-	-	-	-	0.28	0.32	33.33	0.36	0.36	0.35	-
225	-	-	-	-	-	-	-	-	0.22	0.23	-	-
270	-	-	-	-	0.36	0.44	0.39	39.93	0.41	0.41	0.30	0.23
315	-	-	-	-	0.22	0.27	-	-	-	-	-	-
	<b>Monthly wind speed (m/s)</b>											
<b>Speed</b>	3.06	3.82	3.43	3.41	2.98	2.84	2.97	2.85	3.23	2.84	2.93	2.72

### 3.3.1.3 Marea

La marea es calculada en las entradas de la Bahía de Cartagena, con base en el modelo global FES2004, determinando los componentes involucrados de acuerdo con la Tabla 10.

**Tabla 10.** Componentes armónicos de la marea de Cartagena.

COMPONENTE	ALTURA	FASE
M2	0.0695299	130.043
S2	0.00877101	183.893
K1	0.0951913	-118.691
K2	0.0118812	121.545
N2	0.0283202	108.426
2N2	0.00398642	716.116
O1	0.0543028	-124.539
Q1	0.0313174	-119.257
P1	0.00907303	-134.980
M4	0.000000	0.000000
Mf	0.0169927	-399.295
Mm	0.00820541	-638.832
Mtm	0.00344268	0.0493122
MSqm	0.000478366	-121.402

### 3.3.1.4 Resumen de las condiciones de frontera (corrientes)

De acuerdo con los puntos anteriores, en la Tabla 11 se relacionan las condiciones de frontera tenidas en cuenta para el cálculo de corrientes.

**Tabla 11.** Condiciones de frontera para el cálculo de corrientes.

V.Viento (m/s)	D.Viento (grados)	Caudal (m3/s)	Marea
4.0	270	350	FES2004

### 3.3.2 Condiciones de frontera – Oleaje

Considerando que las principales forzantes del oleaje en el área de interés son el oleaje y viento en aguas profundas, a continuación, se definen cada una de ellas para efecto de la configuración del modelo de oleaje.

### 3.3.2.1 Oleaje en aguas profundas

En este caso se consideran el oleaje extremal de aguas profundas considerando así eventos con una baja probabilidad de excedencia. En ese caso se toma un oleaje con una altura significativa de 4m, que corresponde a una probabilidad del 0.3 %, de acuerdo con los resultados de la caracterización del oleaje (Figura 21). Así mismo, se toma una dirección del oleaje hacia el suroeste (Figura 20).

### 3.3.2.2 Viento en aguas profundas

En el mismo sentido de la definición de las condiciones de frontera en el caso del oleaje, para el área de interés se definió una velocidad del viento de 15 m/s (Figura 2) con una dirección del noreste (Figura 3). De esta manera se consideran los casos de menor probabilidad, y extremales probables, sin embargo, para la zona costera (grillas 3 y 4) se consideraron las direcciones más desfavorables.

### 3.3.2.3 Resumen de las condiciones de frontera (oleaje)

Las condiciones de frontera se definieron para dos escenarios considerando que el régimen de viento en aguas profundas es relativamente constante a lo largo del año en lo relacionado con la dirección que es del noreste, mientras que en la zona costera sufre variaciones a lo largo del día y del año; en ese caso que utilizaron las condiciones de dirección menos favorables para el borde costero del Centro de Convenciones considerando viento en la zona costera del sur y del oeste.

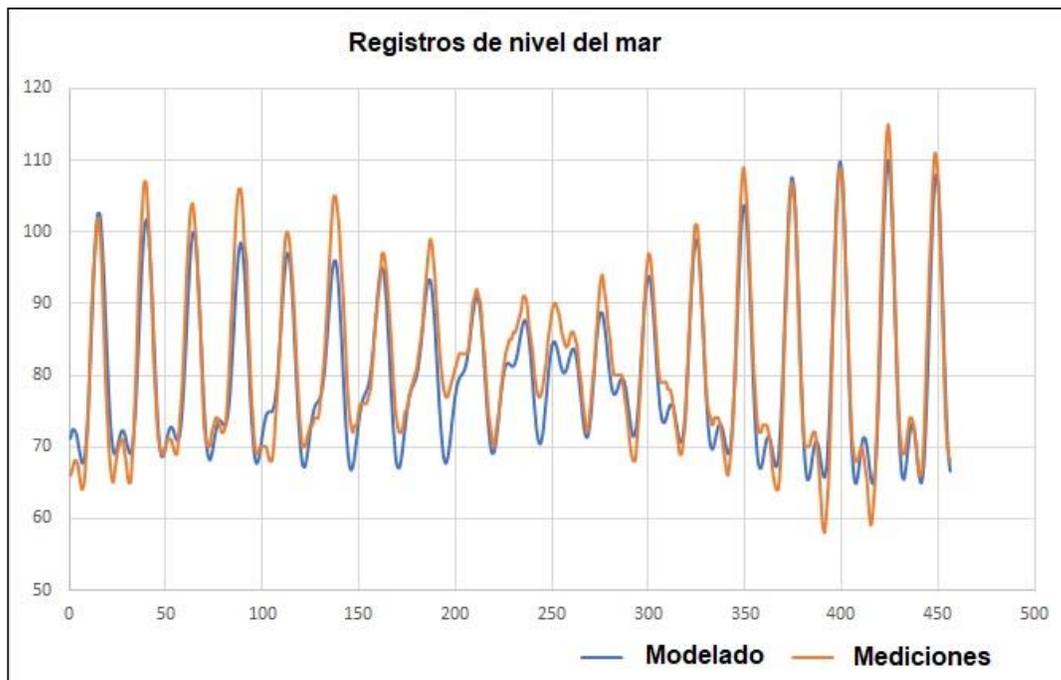
**Tabla 12.** Condiciones de frontera para el cálculo de oleaje.

Escenario	Nest (grilla)	V.Viento (m/s)	D.Viento (grados)	Altura de la ola (m) / profundas	D. Ola (grados)
1	1 y 2	15	22.5	4	225
	3 y 4	7	180		
2	1 y 2	15	22.5	4	225
	3 y 4	7	270		

### 3.4 VALIDACIÓN DEL MODELO

Para la validación del modelo fue necesario hacer una calibración de este, para lo cual se ajustaron algunos parámetros, además de determinar los valores más aproximados a los regímenes climáticos de las variables, de la forma como se describe en las secciones anteriores.

Con base en la bibliografía y diferentes experimentos de simulación hasta lograr un comportamiento aceptable de las principales variables físicas, se ajustaron diferentes parámetros tales como velocidad de caída del grano, coeficientes de arrastre, parámetros de rugosidad, entre otros.



**Figura 28.** Superposición de las curvas de marea calculada (azul) con el modelo vs mediciones (naranja) en la Bahía de Cartagena.

Siendo la marea la principal forzante de las corrientes en la Bahía de Cartagena, la superposición de las mediciones *insitu* del nivel del mar (naranja) con el cálculo del nivel del mar que se efectúa con el modelo (Figura 28), permite establecer una importante coherencia. El cálculo de la raíz del error cuadrático medio (RMSE) da un valor de 3.82 cm (si la variación es máxima de 40 cm, este valor representa menos del 10 % de diferencia), mientras que el error cuadrático (R2) es de 0.91 (si el valor es 1, significa una coherencia del 100%). Estos resultados dan una alta confianza en la señal de la marea calculada y su coincidencia con la marea registrada en la bahía.

## Capítulo 4

# RESULTADOS DE LA MODELACIÓN

Se presentan los resultados de la modelación de corrientes tanto en el área general de la Bahía de Cartagena, como en la Bahía de las Ánimas.

### 4.1 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE CORRIENTES

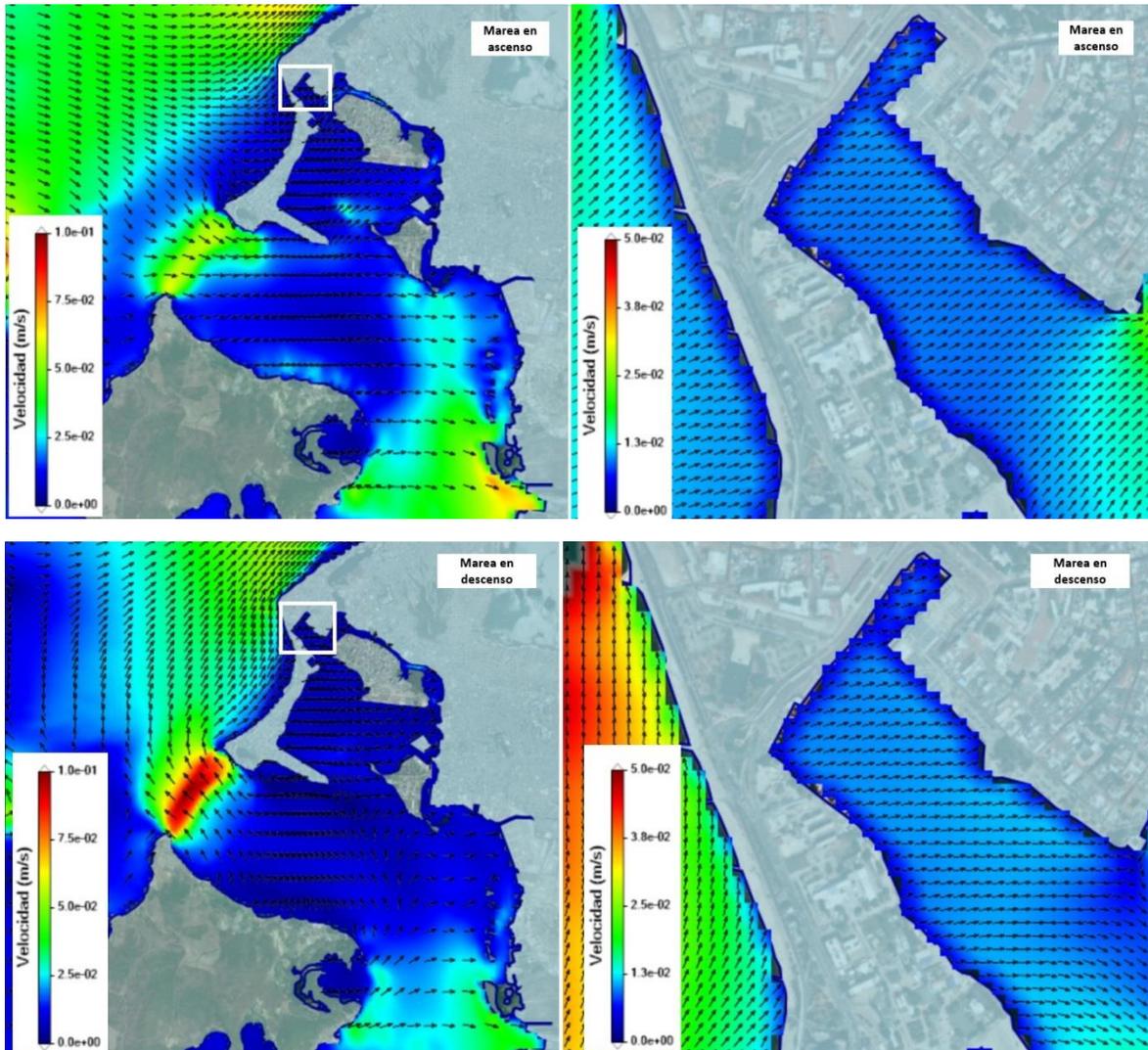
La dinámica de la Bahía de Cartagena está claramente influenciada y modulada por la marea y la descarga del Canal del Dique. En cuanto a las aguas superficiales, en espacios más confinados, como la Bahía de las Ánimas, predomina la influencia del viento.

El recorrido diario de la marea define los periodos de flujo y reflujos en la Bahía de Cartagena, siendo estos especialmente evidentes en Bocagrande y Bocachica. Durante la fase de ascenso de la marea, las corrientes de flujo en Bocagrande alcanzan velocidades de hasta 0.07 m/s, mientras que, en la fase de descenso, las corrientes de reflujos pueden llegar a 0.1 m/s. Este marcado cambio de dirección, tan evidente en Bocagrande, también se percibe hasta el centro de la Bahía de Cartagena. Sin embargo, en la Bahía de las Ánimas, este fenómeno es menos apreciable, ya que las corrientes tienden hacia el este bajo condiciones de viento del oeste, escenario considerado en la modelación como el más conservador para el presente estudio. En esta bahía, las corrientes alcanzan valores de hasta 0.006 m/s (Figura 29).

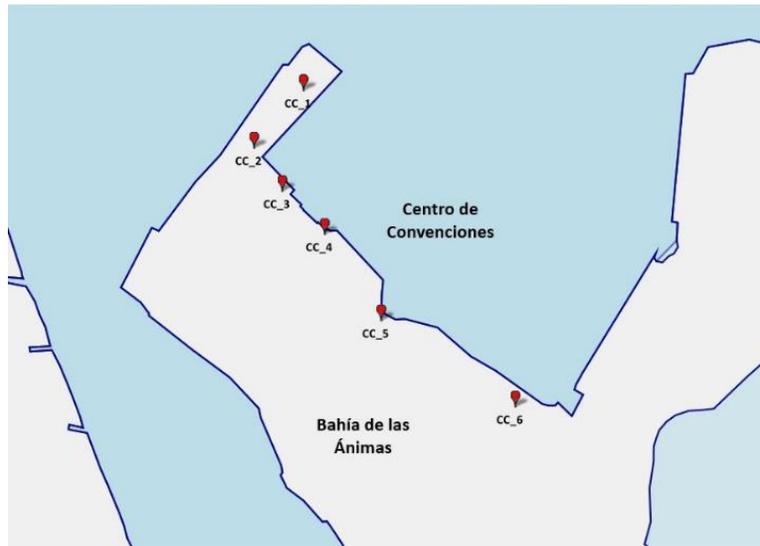
Con el objetivo de conocer el régimen de corrientes, identificar sus valores máximos y relacionarlos con el régimen de mareas, se establecieron boyas virtuales a lo largo del borde costero del Centro de Convenciones (Figura 30). Estas boyas registraron los valores de las corrientes durante un ciclo completo de marea, cuyos resultados se detallan en la Figura 31.

Los datos obtenidos revelan el régimen de corrientes en cada punto, evidenciando la variabilidad de su intensidad, directamente correlacionada con el régimen de marea. Destaca el desfase en la oscilación de la intensidad de las corrientes entre el sur (CC\_1 y CC\_2) y el norte (CC\_6) de la Bahía de las Ánimas. Otra

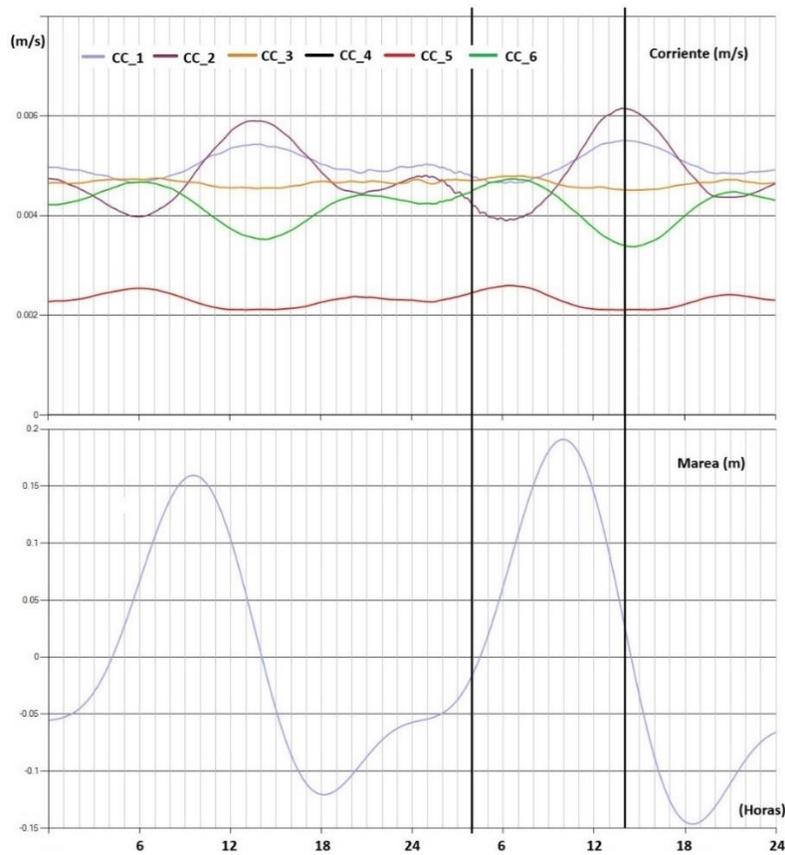
característica importante es que las corrientes de refluo (marea en descenso) presentan mayores velocidades que las de flujo (marea en ascenso) (Figura 31).



**Figura 29.** Corrientes simuladas en la parte norte de la Bahía de Cartagena (izq.) y Bahía de las Ánimas (der.), durante el ascenso (arriba) y descenso (abajo) de la marea.



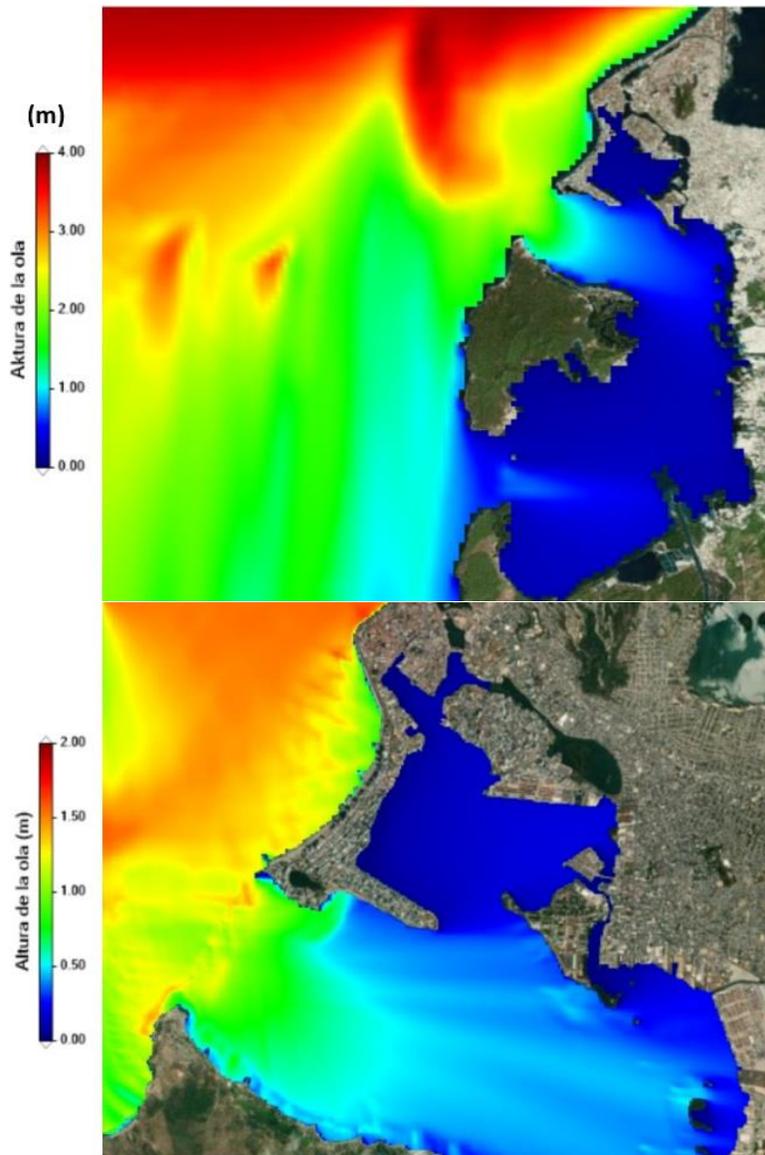
**Figura 30.** Boyas virtuales para registrar la velocidad de la corriente a lo largo del borde costero del Centro de Convenciones.



**Figura 31.** Corrientes medidas en las boyas virtuales ubicadas a lo largo del borde costero del Centro de Convenciones (arriba). En la parte baja de la figura se registra el recorrido de la marea.

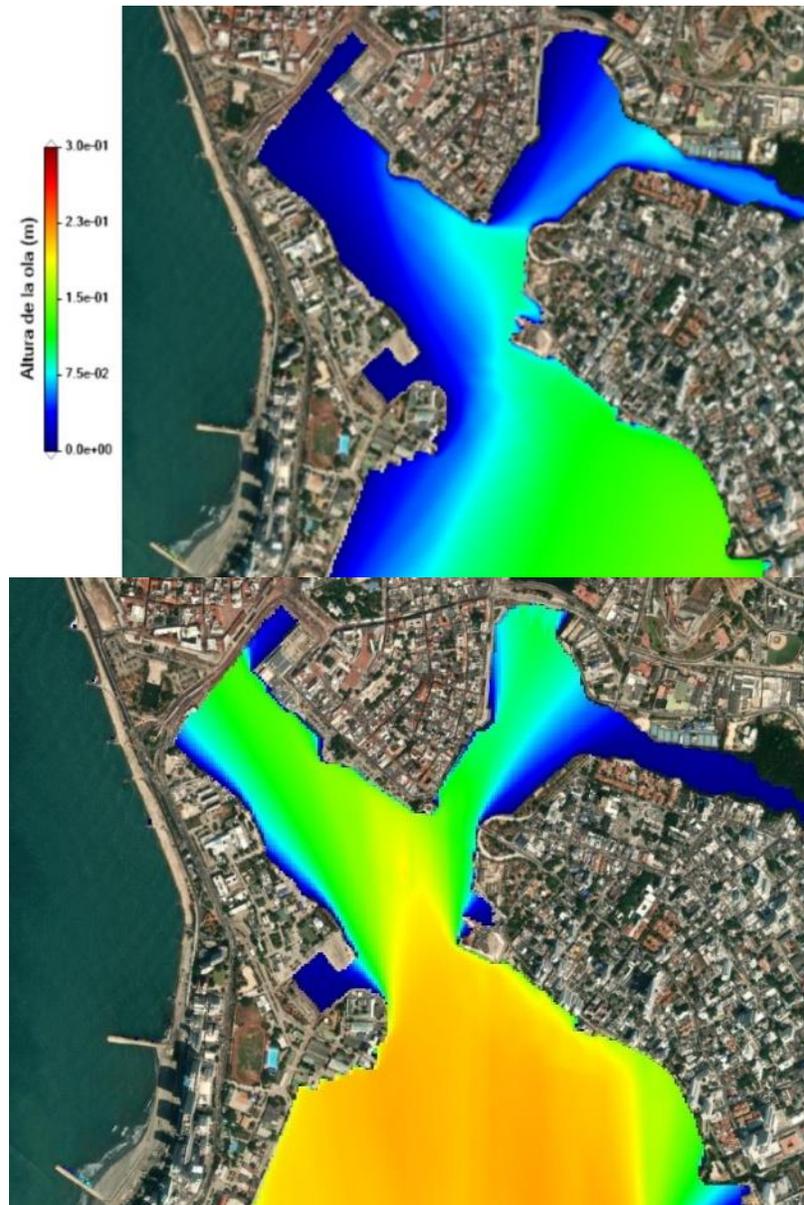
## 4.2 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE OLEAJE

El oleaje de aguas profundas, claramente identificado del noreste y sin componentes al oeste, se aprecia en mar abierto al oeste de Cartagena. En el caso extremo, olas de 4 m en aguas profundas, reduce su altura por procesos de asomeramiento. La ola ingresa a la bahía por Bocagrande, después de ser reducida drásticamente por la escollera, pasando de 1.4 m a 0.9 m de altura (Figura 32).



**Figura 32.** Altura de la ola calculada para el área general de Cartagena (arr.) y norte de la Bahía de Cartagena (abj.), con viento del noreste y oleaje hacia el suroeste en aguas profundas fuera de la bahía.

Con el propósito de entender el efecto del viento al interior de la bahía de las Ánimas, se modelaron dos escenarios considerando viento del oeste y del sur, que son los más importantes para el caso del borde costero del Centro de Convenciones. En el caso del viento oeste, el oleaje alcanza un máximo de 0.06 m, mientras que con el viento del sur la altura alcanza hasta 0.16 m (Figura 33).



**Figura 33.** Altura de la ola calculada para la Bahía de las Ánimas con viento del oeste (arr.), y con viento del sur (abj.).

Para conocer las alturas del oleaje a lo largo del borde costero del Centro de Convenciones, se definieron 10 boyas virtuales (Figura 34) donde se efectuó el registro de parámetros del oleaje para los dos escenarios modelados (Tabla 13). Esta información es necesaria para el cálculo de fuerzas de oleaje en las columnas y muros del borde costero, como se describe en la siguiente sección.



**Figura 34.** Boyas virtuales para registrar parámetros del oleaje largo del borde costero del Centro de Convenciones.

**Tabla 13.** Parámetros de la ola registrados por las boyas de oleaje virtual en las posiciones indicadas en la Figura 33, para los dos escenarios simulados. Hs: altura significativa de la ola; Ubot: velocidad orbital en el fondo; Periodo: periodo de la ola.

Ubicación	Prof (m)	Escenario 1 - viento del sur			Escenario 2 - viento del oeste		
		Hs (m)	Ubot (m/s)	Periodo (s)	Hs (m)	Ubot (m/s)	Periodo (s)
CC_1	0.73	0.0071	0.0019	0.8308	0.0063	0.0029	0.9333
CC_2	2.85	0.0055	0.0003	0.8426	0.0055	0.0006	0.9577
CC_3	0.61	0.0154	0.0005	0.8311	0.0057	0.0004	0.9527
CC_4	2.4	0.1079	0.0172	1.2504	0.0094	0.0011	0.9158
CC_5	1.51	0.0347	0.0018	0.8338	0.0194	0.0011	0.8497
CC_6	0.85	0.0711	0.0105	1.1441	0.0363	0.0019	0.8240
CC_7	0.19	0.1471	0.0294	1.4094	0.0407	0.0017	0.8210
CC_8	0.39	0.1419	0.0803	1.4547	0.0410	0.0050	0.8209
CC_9	0.75	0.1490	0.0569	1.4518	0.0486	0.0034	0.8203
CC_10	0.8	0.1606	0.0308	1.4540	0.0621	0.0023	0.8424

### 4.3 CÁLCULO DE FUERZAS EN COLUMNAS Y MUROS

A partir de los resultados de la modelación, específicamente de la altura del oleaje y velocidad de corrientes (Tabla 13), se calculó la fuerza ejercida por la ola y las

corrientes, asumiendo que, en un mismo momento, tanto la dirección de la ola como la dirección de la corriente, son perpendiculares a columnas y muros (o tablestacados). Se tomaron las mayores velocidades de la corriente y altura del oleaje hallados en la simulación, para los sectores que se identifican en la Figura 35.

Los parámetros de oleaje y corrientes considerados para los cálculos fueron los registrados por las boyas virtuales, tanto de corrientes como de oleaje.



**Figura 35.** Sectorización del borde costero del Centro de Convenciones para caracterizar

Para calcular las corrientes se empleó una ecuación de Morrison modificada para fuerzas combinadas de oleaje y corriente, mientras que para los muros se empleó un método simplificado tipo Goda + arrastre por corriente. En la Tabla 14 se

relacionan los resultados para cada uno de los sectores, en dependencia del diámetro de columna y de la presencia de muro o tablestacado. Se colocaron diferentes opciones de ancho de columna o presencia de muros, considerando que en la edificación existen diferentes tipos de estructuras y no un estándar determinado.

**Tabla 14.** Cálculo de la Fuerza (Newton) ejercida por el oleaje y la corriente sobre columnas y muros en los sectores indicados (Figura 35), de la línea de costa del Centro de Convenciones, para el caso de vientos en la bahía con dirección del oeste.

Ubicación / sector	Diámetro de columna (m)						Muro
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	
S_1	0.2321	0.9255	2.0802	3.6963	5.7736	8.3123	8.4163
S_2	0.1987	0.7857	1.7610	3.1248	4.8768	7.0173	112.3677
S_3	0.0295	0.1156	0.2583	0.4576	0.7135	1.0260	5.3772
S_4	0.2961	1.1749	2.6364	4.6807	7.3077	10.5174	135.4525
S_5	0.2063	0.8217	1.8463	3.2801	5.1230	7.3751	111.1620
S_6	0.1942	0.7753	1.7433	3.0983	4.8403	6.9692	65.8645
S_7	0.0388	0.1552	0.3491	0.6206	0.9696	1.3961	3.6941
S_8	0.2428	0.9691	2.1791	3.8726	6.0498	8.7105	15.6642
S_9	0.3178	1.2684	2.8518	5.0681	7.9172	11.3992	68.6781
S_10	0.2198	0.8770	1.9714	3.5032	5.4723	7.8787	99.8427

Esta información es relevante para el diseño de estructuras de soporte en el marco del proyecto de mantenimiento del borde costero del Centro de Convenciones de Cartagena.

#### 4.4 IMPACTO DE LA PLUMA DE SEDIMENTOS DEL CANAL DEL DIQUE

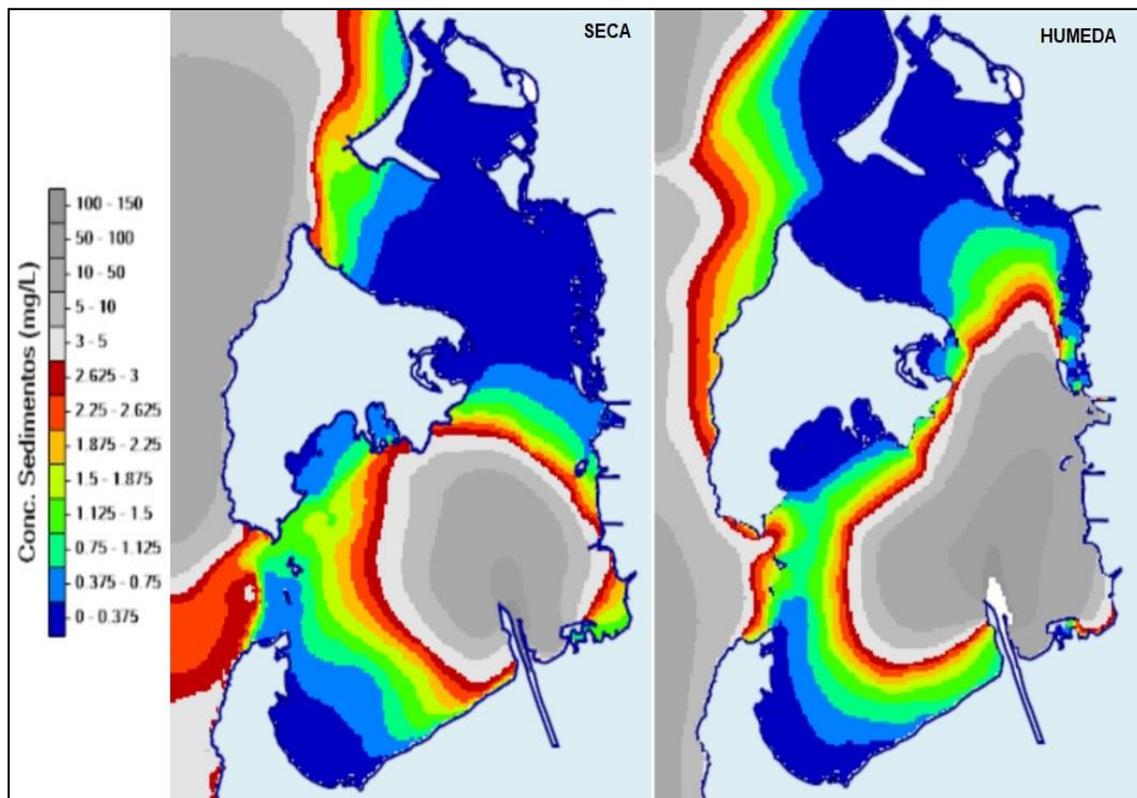
En cuanto al transporte de sedimentos en la Bahía de Cartagena, y su impacto en la Bahía de las Ánimas, se efectuó la simulación de corrientes con un modelo de sedimentos acoplado.

Se evidencian dos patrones claros, los cuales están definidos por las épocas climáticas. Durante la época seca, la pluma de sedimentos se concentra hacia el sector del Canal del Dique y tiene una influencia limitada al centro de la Bahía de Cartagena y el sector de Mamonal. Esta situación se explica con los menores valores de caudales de descarga, así como por los bajos niveles de concentración

de sedimentos en la descarga, sin embargo, es posible que el viento del noreste tengo un mayor impacto en mantener la pluma concentrada al sur de la bahía (Figura 36).

Por el contrario, durante la época húmeda, el viento del suroeste, el incremento de las lluvias y consecuentemente el incremento en los flujos de descarga del canal del Dique y de la concentración de sedimento, proyectan la pluma hacia el centro de la bahía y hacia el sector de Mamonal (Figura 36).

Es importante observar que, aunque este es un comportamiento promedio, la gran variabilidad del viento y la brisa, en cualquier época del año (principalmente en la época seca), produce comportamientos diferentes y así mismo, varía la concentración de sedimentos en el sector de Mamonal.



**Figura 36.** Concentración de sedimentos suspendidos calculados para la época seca (izq.) y húmeda (der).

Tanto en la Bahía Interna, como en la Bahía de las Ánimas, el impacto de la pluma de sedimentos es despreciable.

## Capítulo 5

# CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Mediante el empleo de modelos numéricos se calculó el régimen de corrientes y oleaje en la Bahía de las Ánimas con el propósito de calcular las fuerzas que la hidrodinámica de la Bahía de Cartagena ejerce contra las estructuras del borde costero del Centro de Convenciones de Cartagena.

Para la modelación se consideraron escenarios extremos de oleaje y viento en aguas profundas, mientras que, para las aguas interiores, más específicamente la Bahía de las Ánimas, se tuvieron en cuenta condiciones que mayormente afectarían el borde costero de esta. De esta manera se buscaban obtener resultados conservadores.

El estudio de simulación de corrientes, oleaje, fuerzas y sedimentación en la Bahía de las Ánimas, con enfoque en el borde costero del Centro de Convenciones de Cartagena, permitió obtener las siguientes conclusiones:

### Corrientes:

- Las corrientes en la Bahía de las Ánimas están predominantemente influenciadas por el viento, con velocidades máximas de 0.006 m/s bajo condiciones de viento del oeste. A diferencia de Bocagrande, donde la marea genera flujos y reflujos significativos (hasta 0.1 m/s), en esta zona el efecto de la marea es mínimo.
- Se observó un desfase en la intensidad de las corrientes entre el sur (CC\_1, CC\_2) y el norte (CC\_6) de la bahía, siendo las corrientes de reflujos (marea en descenso) más rápidas que las de flujo.

### Oleaje:

- El oleaje interno en la Bahía de las Ánimas es de baja energía, con alturas máximas de 0.16 m bajo viento del sur y 0.06 m con viento del oeste. Estas condiciones son menos intensas que las registradas en aguas abiertas, donde el oleaje puede alcanzar 4 m.

- Las boyas virtuales cerca del Centro de Convenciones registraron alturas significativas (Hs) de hasta 0.1606 m (CC\_10) con viento del sur, lo que indica variabilidad espacial en la exposición al oleaje a lo largo del borde costero.

#### **Fuerzas sobre estructuras:**

- Las fuerzas combinadas de oleaje y corrientes sobre columnas y muros son moderadas, pero requieren atención en el diseño estructural. Por ejemplo, en el sector S\_4 (con diámetro de columna de 0.6 m), la fuerza alcanzó 10.5174 N, mientras que en muros (como en S\_2) se registraron fuerzas de hasta 112.3677 N bajo viento del oeste.
- Los cálculos basados en el método Goda y ecuaciones de Morrison modificadas destacan la necesidad de considerar las condiciones locales para garantizar la estabilidad de las estructuras costeras.

#### **Sedimentación:**

- La pluma de sedimentos del Canal del Dique tiene un impacto despreciable en la Bahía de las Ánimas y el borde costero del Centro de Convenciones, tanto en épocas secas como húmedas. Los sedimentos se concentran principalmente en el sur de la Bahía de Cartagena (sector del Canal del Dique y Mamonal), sin afectar significativamente la zona de estudio.

#### **Calidad de aguas**

Aunque a lo largo del documento no se tratan aspectos de la calidad de aguas, ya que el estudio se limita a aspectos físicos, se hace un breve análisis de la calidad de aguas de la bahía de Cartagena, por el impacto que este puede suponer en la degradación del concreto en el mar. En este sentido se toma como base un estudio realizado por Tasic, et al (2019).

- Los cloruros disueltos en la Bahía de Cartagena proceden en primer lugar del intercambio con el Caribe abierto, donde la salinidad superficial alcanza hasta 36 PSU - equivalente a casi 20 g Cl<sup>-</sup>/L - y, en época de menor descarga fluvial, domina más del 90 % de la carga de cloruros. A esto se suman aportes estacionales del Canal del Dique, cuya salinidad de 15–25 PSU (≈8–14 g Cl<sup>-</sup>/L) transporta sales continentales remanentes de las labores agrícolas e industriales en la cuenca del Magdalena. Sobre esa base marina-estuarina se añaden descargas directas de la zona industrial de Mamonal (petroquímica, refinería, plantas de cemento y cloro-álcali), cuyos efluentes de procesos de enfriamiento y lavado de tanques incorporan cloruros

adicionales; aguas de sentina y lastre de embarcaciones; y, en menor medida, drenajes urbanos sin tratamiento que concentran  $\text{Cl}^-$  por uso doméstico.

- Los sulfatos en la bahía derivan principalmente del agua de mar ( $\approx 2.7 \text{ g SO}_4^{2-}/\text{L}$ ) y de los efluentes del Canal del Dique, donde la descarga pluvial remueve  $\text{SO}_4^{2-}$  procedente de la erosión de rocas evaporíticas y de vertidos agrícolas ricos en fertilizantes fosfo-sulfatados. A este trasfondo natural-estuarino se suman vertidos industriales de Mamonal —especialmente de la antigua planta de cloro-álcali y de procesos químicos de la refinería— que liberan  $\text{SO}_4^{2-}$  en concentraciones locales de  $0.5\text{--}2 \text{ g/L}$ . Una tercera contribución proviene de aguas residuales y lluvias urbanas, que arrastran sulfatos desde detergentes y productos domésticos. En conjunto, estos aportes de  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  elevan la agresividad química del agua, potenciando la corrosión del acero y la degradación de la pasta de cemento en las estructuras sumergidas.

### **Recomendación final:**

Los resultados muestran que, aunque las corrientes y el oleaje en la Bahía de las Ánimas son leves, su variabilidad espacial y las fuerzas sobre estructuras costeras requieren un diseño adaptado a las condiciones locales. La sedimentación no es riesgosa, así como tampoco la erosión (por re-suspensión), pero se recomienda monitoreo continuo ante eventos extremos o descargas inusuales del Canal del Dique.

Por otra parte, la calidad del agua en la bahía de Cartagena podría acelerar la degradación de estructuras de concreto y refuerzos de acero sumergidos o expuestos al agua de mar, lo cual debería ser considerado en la selección de materiales.

Estos hallazgos son esenciales para el mantenimiento y futuras intervenciones en el borde costero del Centro de Convenciones.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Afanador-Franco, F., Torres, R., Gomez Lopez, J. C., & Gutierrez, J. (2006). Lidar y fotografía aérea digital en la determinación del impacto del aumento en el nivel medio del mar en el sector de “La Boquilla”, Cartagena de Indias; Caribe Colombiano. *Boletín Científico CIOH*, 24, 94–106. [https://doi.org/10.26640/01200542.24.94\\_106](https://doi.org/10.26640/01200542.24.94_106)
- Alexandre, N.-L., Thomas, Y., Durand, P., Torres, R., & Andrade, C. (2008). Variabilidad del nivel del mar desde 1950 hasta el 2000 y riesgos asociados a episodios de mar de leva en las penínsulas de Bocagrande y Castillogrande, Cartagena de Indias, Colombia. *Boletín Científico CIOH*, 72–85. <https://doi.org/10.26640/22159045.186>
- Álvarez, R., Aguilera, J., Andrade, C., & Nowak, P. (1995). Caracterización general de la zona de afloramiento de la Península de la Guajira. *Revista Colombiana de la Academia de Física y Ciencias Exactas*, 19(75), 679–694.
- Andrade, C. (1993). Análisis de la velocidad del viento en el Mar Caribe. *Boletín Científico CIOH*, 13, 33–44. <https://doi.org/10.26640/22159045.53>
- Andrade, C. A. (2000). *The circulation and variability of the Colombian Basin in the Caribbean Sea* [University of Wales]. <https://www.researchgate.net/publication/323561721>
- Andrade, C. A. (2008). Cambios recientes del nivel del mar en Colombia. En: Deltas de Colombia: morfodinámica y vulnerabilidad ante el cambio global. In J. D. Restrepo (Ed.), *Deltas de Colombia morfodinámica y vulnerabilidad ante el cambio global* (1st ed., pp. 103–121). UniversidadEAFIT.
- Andrade, C. A., & Barton, E. D. (2000). Eddy development and motion in the Caribbean Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 105(C11), 26191–26201. <https://doi.org/10.1029/2000jc000300>
- Andrade, C., Barton, E. D., & Mooers, C. (2003). Evidence for a eastward flow along the Central and South American Caribbean Coast. *J. Geo. Res.*, 108. <https://doi.org/10.1029/2002JC001549>
- Andrade, C., Ferrero-Ronquillo, A., Leon, H., Mora-Paez, H., & Carvajal-Perico, H. (2017). Sobre cambios en la línea de costa entre 1735 y 2011 y la subsidencia en la Bahía de Cartagena de Indias, Colombia. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 41, 94. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.360>
- Andrade, C., Thomas, Y. F., Lonin, S., Parra, C., Kunesch, S., Menanteau, L., Andriau, A., Piñeres, C., & Velasco, S. (2004). Aspectos morfodinámicos de la bahía de Cartagena de Indias. *Boletín Científico CIOH*, 22, 90–104. [www.cioh.org.co](http://www.cioh.org.co)
- CIOH - ENSB. (2006). *Pronóstico del comportamiento de los huracanes sobre el mar Caribe para la temporada ciclónica 2006*. CIOH.
- de Pablo, H., Sobrinho, J., Garcia, M., Campuzano, F., Juliano, M., & Neves, R. (2019). Validation of the 3D-MOHID hydrodynamic model for the Tagus coastal area. *Water (Switzerland)*, 11(8). <https://doi.org/10.3390/w11081713>
- Fine, R. A., & Molinari, R. L. (1988). A continuous deep western boundary current between Abaco (26.5°N) and Barbados (13°N). *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 35(9), 1441–1450. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0198-0149\(88\)90096-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0198-0149(88)90096-9)

- Franz, G., Delpey, T. M., Brito, D., Neves, R., Leitão, P., & Pinto, L. (2017). Modelling of sediment transport and morphological evolution under the combined action of waves and currents. *Ocean Science*, 13(5), 673–690. <https://doi.org/10.5194/os-13-673-2017>
- Higgins, A., Restrepo, J. C., Ortiz, J. C., Pierini, J., & Otero, L. (2016). Suspended sediment transport in the Magdalena River (Colombia, South America): Hydrologic regime, rating parameters and effective discharge variability. *International Journal of Sediment Research*, 31(1), 25–35. <https://doi.org/10.1016/J.IJSRC.2015.04.003>
- Holcombe, T. L., & Moore, W. S. (1977). Paleocurrents in the eastern Caribbean: Geologic evidence and implications. *Marine Geology*, 23(1), 35–56. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(77\)90080-9](https://doi.org/10.1016/0025-3227(77)90080-9)
- Jouanno, J., Sheinbaum, J., Barnier, B., & Molines, J. M. (2009). The mesoscale variability in the Caribbean Sea. Part II: Energy sources. *Ocean Modelling*, 26(3–4), 226–239. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2008.10.006>
- Kjerfve, B. (1981). Tides of the Caribbean Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 86(C5), 4243–4247. <https://doi.org/10.1029/jc086ic05p04243>
- Lonin, S., Parra, C., Andrade, C., & Thomas, Y.-F. (2004). Patrones de la pluma turbia del canal del Dique en la bahía de Cartagena. *Boletín Científico CIOH, Cartagena de Indias, Colombia*, 22, 77–89. [https://doi.org/10.26640/01200542.22.77\\_89](https://doi.org/10.26640/01200542.22.77_89)
- Martins, F., Leitão, P., Silva, A., & Neves, R. (2001). *3D modelling in the Sado estuary using a new generic vertical discretization approach*.
- Molares, R. (2011). *The influence of the Dique Channel Discharge on the sea water level of Cartagena Bay* [MSc Thesis]. Tudelft.
- Molares, R. J. (2004). Clasificación e identificación de las componentes de marea del Caribe colombiano. *Boletín Científico CIOH*, 22, 105–114. <https://doi.org/10.26640/22159045.132>
- Mora-Paez, H., Carvajal, J., Ferrero-Ronquillo, A., Leon, H., & Andrade, C. (2018). *On natural gas venting and preliminary results on subsidence in Cartagena bay (Colombia)*. 37, 35–51. <https://doi.org/10.26640/22159045.448>
- Ortiz Royero, J. C. (2009). Aplicación de un modelo paramétrico de vientos y un modelo de oleaje espectral para el estudio del oleaje máximo generado por el huracán Lenny en las costas del Caribe colombiano en 1999. *Boletín Científico CIOH*, 27, 29–36. [https://doi.org/10.26640/01200542.27.29\\_36](https://doi.org/10.26640/01200542.27.29_36)
- Poveda, G., & Mesa, O. J. (1997). Feedbacks between Hydrological Processes in Tropical South America and Large-Scale Ocean–Atmospheric Phenomena. *Journal of Climate*, 10(10), 2690–2702. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1997\)010<2690:FBHPIT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1997)010<2690:FBHPIT>2.0.CO;2)
- Pujos, M., Pagliardini, J.-L., Steer, R., Vernet, G., & Weber, O. (1986). *Influencia de la contra-corriente norte colombiana para la circulación de las aguas en la plataforma continental: su acción sobre la dispersión de los efluentes en suspensión del río Magdalena*.
- Restrepo, J. D., & López, S. A. (2008). Morphodynamics of the Pacific and Caribbean deltas of Colombia, South America. *Journal of South American Earth Sciences*, 25(1), 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2007.09.002>

- Restrepo-Ángel, J. D., Mora-Páez, H., Díaz, F., Govorcín, M., Wdowinski, S., Giraldo-Londoño, L., Tosic, M., Fernández, I., Paniagua-Aroyave, J. F., & Duque-Trujillo, J. F. (2021). Coastal subsidence increases vulnerability to sea level rise over twenty first century in Cartagena, Caribbean Colombia. *Scientific Reports*, *11*(1).  
<https://doi.org/10.1038/s41598-021-98428-4>
- Ruiz-Ochoa, M., Bernal, G., & Polanía, J. (2008). Influencia del río Sinú y el mar Caribe en el sistema lagunar de Cispatá. *Bol. Invest. Mar. Cost.*, *37*(1), 31–51.
- Sutherland, M., Dare, P., & Miller, K. (2008). Monitoring Sea-Level Change In The Caribbean. *Geomatica*, *62*(4), 428–436. <https://doi.org/https://doi.org/10.5623/geomat-2008-0047>
- Vaz, N., Mateus, M., Pinto, L., Neves, R., & Dias, J. M. (2020). The tagus estuary as a numerical modeling test bed: A review. In *Geosciences (Switzerland)* (Vol. 10, Issue 1). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/geosciences10010004>
- Vaz, N., Rodrigues, J. G., Mateus, M., Franz, G., Campuzano, F., Neves, R., & Dias, J. M. (2018). Subtidal variability of the Tagus river plume in winter 2013. *Science of the Total Environment*, *627*, 1353–1362. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.325>
- Willoughby, H., & Rahn, M. (2004). Parametric Representation of the Primary Hurricane Vortex. Part I: Observations and Evaluation of the Holland (1980) Model. *Monthly Weather Review - MON WEATHER REV*, *132*. <https://doi.org/10.1175/MWR2831.1>