

Influencia de las corrientes en los campos de oleaje en el área de Bocas de Ceniza, Caribe Colombiano

Current influence on the wave fields in Bocas de Ceniza, Colombian Caribbean

Fecha de recepción: 2013-08-15 / Fecha de aceptación: 2013-12-01

Claudia Patricia Urbano Latorre¹, Luis Jesús Otero Díaz ², Serguei Lonin ³.

¹ **Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH)**. Área de Oceanografía Operacional. Barrio El Bosque, Sector Manzanillo, Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla". Tel: +57(5) 669 44 65 ext. 5132. Correo electrónico: curbano@dimar.mil.co.

² **Universidad del Norte (Uninorte)**. Barranquilla, km 5 Vía a Puerto Colombia. Tel: +57(5) 350 95 09. Correo electrónico: ljotero@uninorte.edu.co.

³ **OCEANMET Ltda.** Castillogrande, Cra 10 N. 5-68, Edificio Omega 21. Tel: (315) 728 34 62. Correo electrónico: slonin@costa.net.co.

Urbano, C.P., Otero, L.J. y Lonin, S. 2013. Influencia de las corrientes en los campos de oleaje en el área de Bocas de Ceniza. Bol. Cient. CIOH (31): 191-206.

RESUMEN

En Colombia, el río Magdalena es una importante vía hacia el puerto de Barranquilla, uno de los principales del país. Por lo cual es de vital importancia enfocar los estudios en esta zona y en la entrada al puerto para optimizar el desarrollo de actividades de navegación marítima. El área de Bocas de Ceniza, en la desembocadura del río, está afectada por procesos hidrodinámicos y morfodinámicos cambiantes. Con el fin de determinar los efectos que se generan por la influencia de las corrientes en los campos de oleaje, se simuló un trayecto de aproximadamente 2 km desde Bocas de Ceniza hacia interior del canal. Para lo anterior, se utilizó una combinación de dos modelos numéricos: Simulating Waves Nearshore, para el oleaje, y el Hidrodinámico Bidimensional, para corrientes, bajo distintos escenarios de acuerdo con las corrientes típicas y estados de mar más frecuentes. Las corrientes en el sector por fuera de los tajamares oscilan entre 0,1 y 0,2 m/s, a diferencia del tramo de 200 m contados desde la entrada de los tajamares hacia el interior, donde las velocidades de corriente varían entre 1,2 y 1,8 m/s. Por consiguiente, se genera una variación en la altura de ola dentro del canal de acceso. Asimismo, dependiendo de las condiciones de caudal, los valores de incremento de altura de ola varían de 0,24 m a 1,3 m. Este fenómeno aún no ha sido documentado en la literatura para esta región, aunque es importante para futuros pronósticos locales y para evaluar las condiciones oceanográficas del acceso al Puerto de Barranquilla, que podrían afectar la seguridad en la navegación.

Palabras claves: río Magdalena, Bocas de Ceniza, corrientes, oleaje, SWaN, H2D.

ABSTRACT

The Magdalena River, in Colombia, is the major route of access to the port of Barranquilla. Therefore, in order to optimize maritime activities in that region it is vital to focus academic studies on the river behavior, and those related to the entrance to the port. The area of Bocas de Ceniza, at the mouth of the river, is affected by the ever changing hydrodynamic, and morphodynamic processes. Thus, two numerical models: Simulating Waves Nearshore, SWAN, and Bidimensional Hydrodynamic model, H2D, simulated (at a distance of approximately 2 km from Bocas de Ceniza into the channel) effects of local currents in the wave fields. Within the access channel a variation in wave height is produced due to the difference in currents' speed between the outer and the inner part of river-mouth dikes; in the early section the speed of current is as high as 0.1 m/s up to 0.2 m/s. Meanwhile, in the inside area it ranges from 1.2 to 1.8 m/s. Moreover, the values of wave height may vary from 0.24 m to 1.3 m depending on the caudal. This has not been documented in the literature within a local context, although it is important for future regional forecasts. Additionally, it is crucial in evaluation of oceanographic conditions of access to the Port of Barranquilla, as it affects navigation safety.

Keywords: Magdalena River, Bocas de Ceniza, currents, wind waves, SWAN, H2D.

INTRODUCCIÓN

En la costa Caribe el río Magdalena cobra importancia en razón a su carácter espacial como conexión comercial entre Colombia, las Antillas y Estados Unidos, a través del puerto de Barranquilla. La zona de su desembocadura está afectada por la interacción directa de la corriente del río con oleaje, produciendo una transformación de altura y pendiente de ola; la dinámica de este proceso juega un papel importante en la seguridad de la navegación.

Para entender la dinámica de la zona es fun-

damental el estudio de batimetría, las condiciones hidrológicas y el comportamiento del oleaje en cercanías de la zona de la desembocadura, para describir parcialmente la física del fenómeno.

Bocas de Ceniza es el punto de la desembocadura del río Magdalena en el Mar Caribe, localizado en el departamento del Atlántico (figura 1). Debe su nombre al color cenizo que toman las aguas del océano al recibir los sedimentos del río. En la actualidad el río desemboca en el mar a través de dos tajamares construidos en los años treinta.

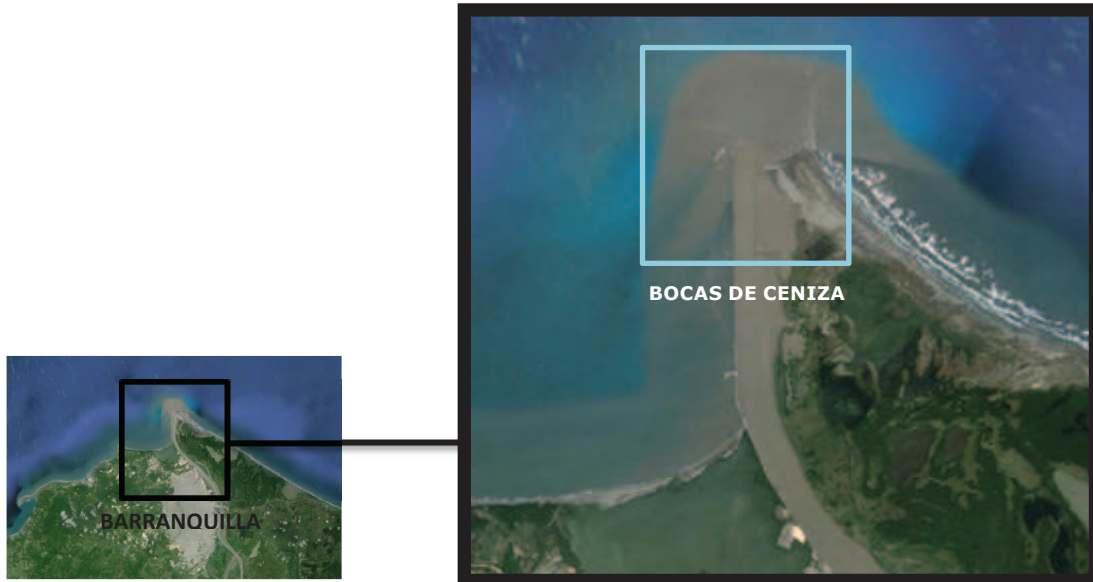


Figura 1. Área de Bocas de Ceniza y su localización en el litoral Caribe. (Fuente: www.earth.google.com).

El ancho entre tajamares del río Magdalena varía entre 500 a 1000 m, su poca profundidad ha ocasionado problemas en la navegación, el cual debe conservar un mínimo de calado de 10 m para el acceso a través del canal al Puerto de Barranquilla con 22 km de longitud. En Colombia, el 85 % de la carga de comercio exterior movilizadada en el país, se maneja por vía marítima; el puerto de Ba-

rranquilla no es el que mayor tonelaje mueve, pero sí presenta la mayor cantidad de terminales dedicados al comercio exterior [1].

La batimetría de la zona de estudio (Figura 2) muestra la existencia de una depresión al terminar los tajamares, como nacimiento del cañón submarino, que permite un depósito natural de los sedimentos aportados por el río [2].

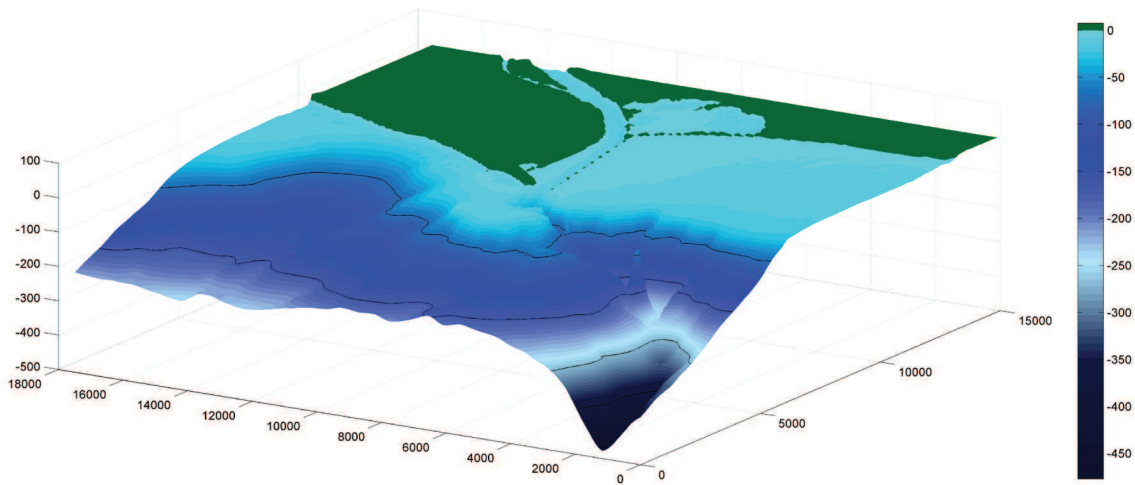


Figura 2. Relieve de fondo del sector de estudio, área de Bocas de Ceniza.

Otra característica importante para conocer la dinámica del río es el comportamiento de los caudales, el cual está unido directamente con el comportamiento de las lluvias y las características propias de la cuenca. El Instituto de Estudios Hidráulicos y Ambientales (Ideha) de la Universidad del Norte, en operación como el antiguo Laboratorio de las Flores y Comagdalena, ha realizado mediciones en el río, permitiendo precisar como varían los caudales [3]:

Caudal máximo : 13575 m³/s
 Caudal mínimo : 1520 m³/s
 Caudal medio multianual: 7236 m³/s

Las mediciones de las variaciones anuales del nivel del agua registradas en la figura 3, describen unas tendencias diferenciadas, las cuales para su identificación se nombraron como época de caudales bajos, medios y altos, como se clasifican a continuación:

Caudales bajos : enero a abril.
 Caudales Medios: mayo a septiembre.
 Caudales Altos : octubre a diciembre.

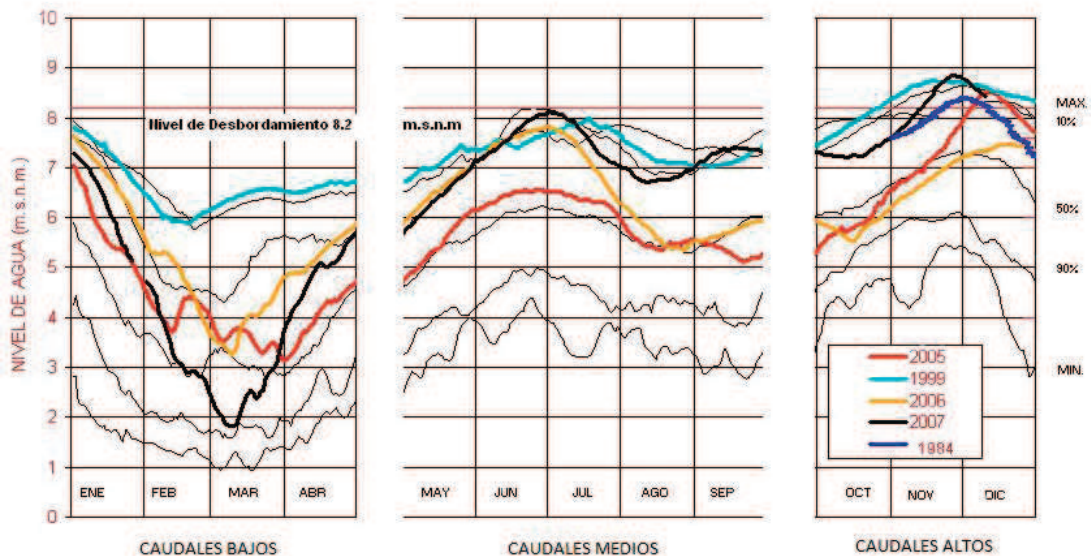


Figura 3. Río Magdalena –Estación de Calamar. Frecuencia de niveles excedidos 1967–2007 [3].

La información del comportamiento típico que tiene el río en el bajo Magdalena durante el año, tiene una correlación con los caudales a través de una recta como se identifica en la figura 4.

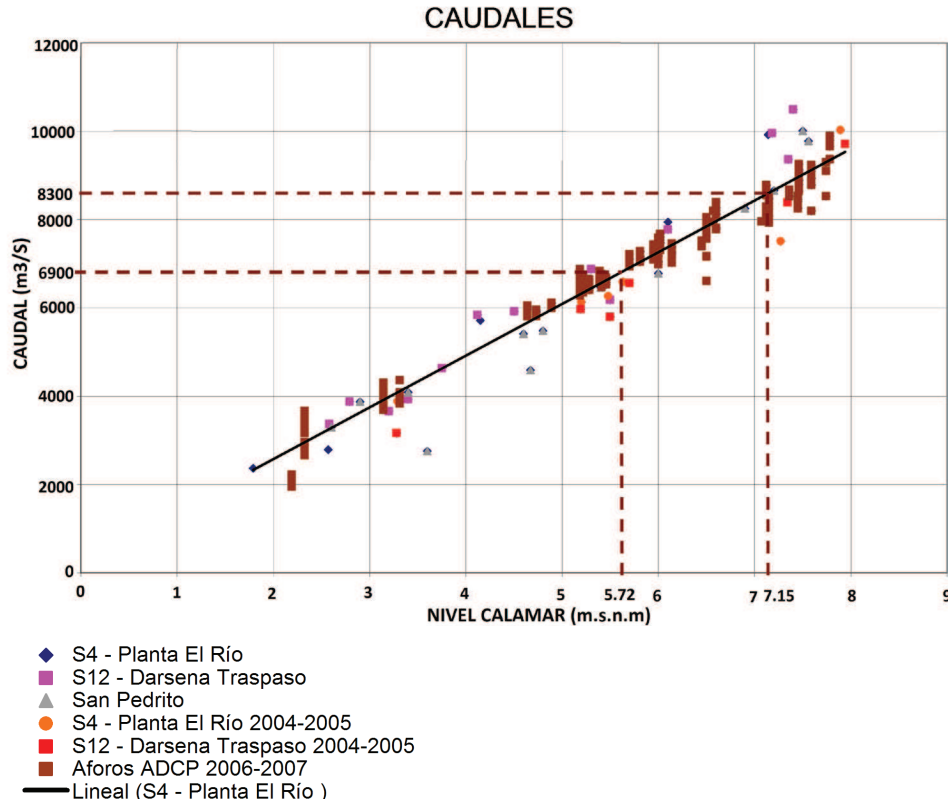


Figura 4. Correlación niveles Estación Calamar–Caudal en Las Flores [4].

La ecuación de la correlación correspondiente a la recta de la Figura 4 es:

$$y = 1168,99717x + 251,71351 \quad (1)$$

Donde,

$$y \approx \text{caudales en } m^3 / s$$

$$x \approx \text{nivel del agua en msnm}$$

Por otro lado, en la zona de la desembocadura (Bocas de Ceniza), una variable importante para comprender su dinámica es el oleaje, que en el Caribe está asociado con el comportamiento de los campos de vientos en cada una de las épocas climáticas presentes en el litoral Caribe colombiano. Para la descripción del oleaje dentro del contexto del estudio se realizó un análisis partiendo de datos

de oleaje visual, debido a que se tienen series de tiempo más largas (años–décadas) cercanas al área de Bocas de Ceniza.

Para el cálculo del régimen medio de oleaje, debido a la carencia de series de datos temporalmente continuas en las inmediaciones de la zona de estudio, se tomaron como alternativa los datos de oleaje visual, proyecciones de la base de datos *Comprehensive Ocean Atmospheric Data Set* (COADS, por sus siglas en inglés) [5], de la *National Ocean and Atmospheric Administration* (NOAA, por sus siglas en inglés) extraída del programa mundial desarrollado sobre oleaje visual por la Organización Meteorológica Mundial (OMM), con la participación de buques mercantes (Figura 5). Los datos se encuentran disponibles en el módulo informático OLAS, los cuales fueron corregidos mediante un proceso de filtración y calibración [6].

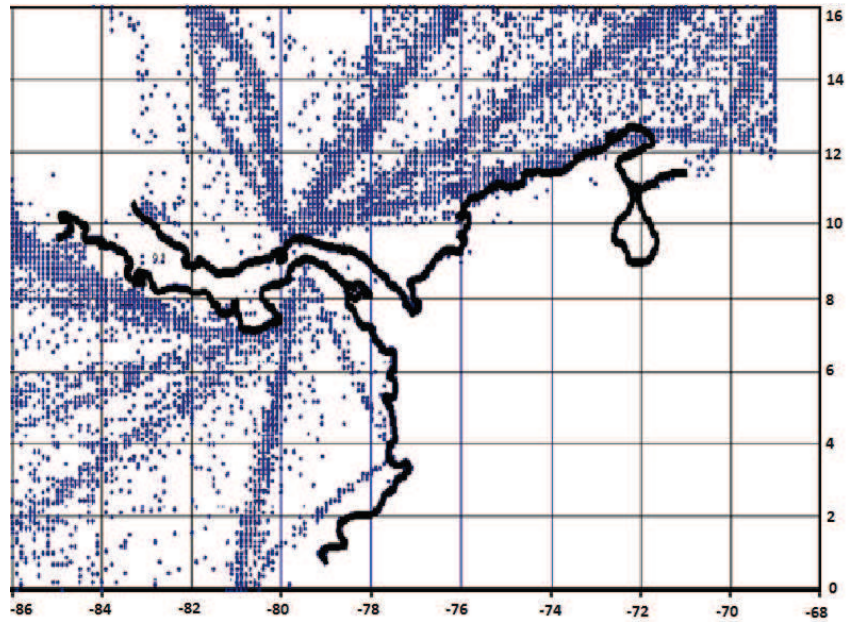


Figura 5. Localización parcial de los datos disponibles que muestran la distribución espacial de los mismos, directamente relacionada con las principales rutas de navegación (Fuente: [6]).

El régimen medio permite representar el año medio de una variable; sea altura o periodo de la ola, mostrando estadísticamente el conjunto de datos que tienen mayor probabilidad. Los datos analizados están entre las latitudes 10 y 12,9 N y entre los -75 y -73,1 de longitud W; en total 30711 datos, filtrados con el objeto de eliminar datos erróneos

de acuerdo con el procedimiento presentado en [6]. Se agruparon los datos ICOADS con la misma distribución realizada en las figuras 6 y 7, seleccionando los datos según la dirección de propagación del oleaje y a cada conjunto de datos, se le halló la probabilidad conjunta, para posteriormente obtener las rosas de oleaje y periodo pico de oleaje.

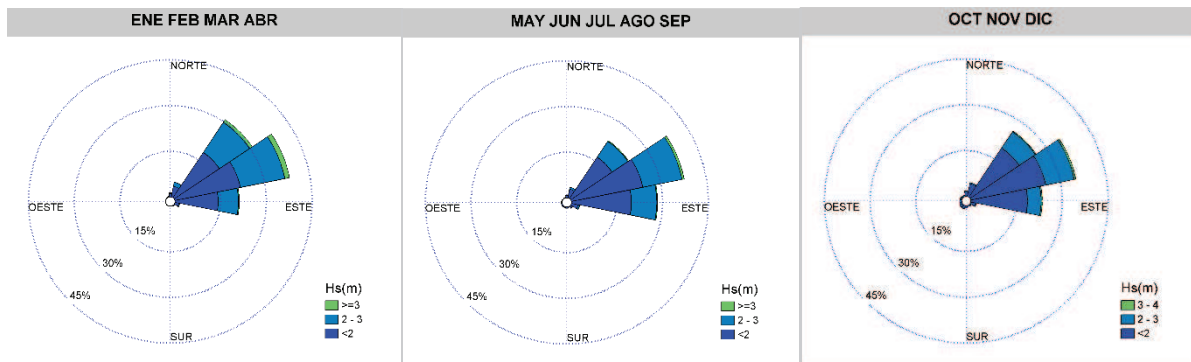


Figura 6. Rosa de oleaje medio.

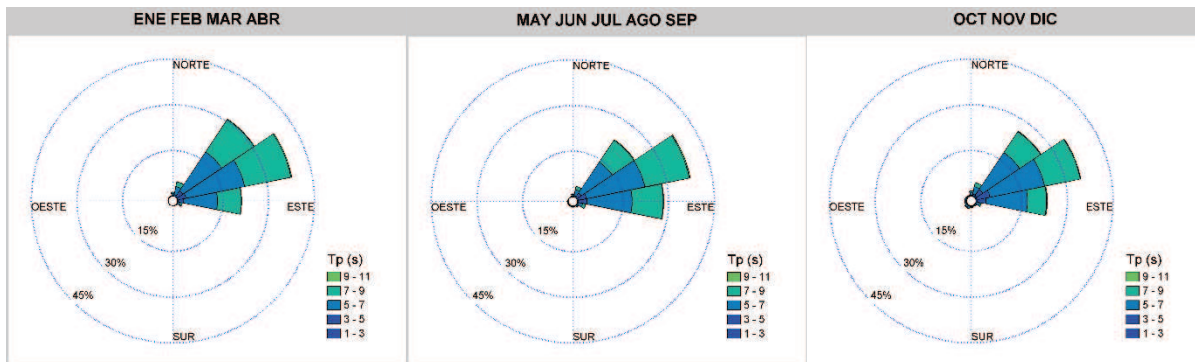


Figura 7. Rosa de periodo pico de oleaje.

Para la realización de la distribución de probabilidad conjunta en las rosas de oleaje y periodo (figuras 6 y 7, dadas en porcentaje) se suprimieron previamente los oleajes en las direcciones de los cuadrantes II y III en coordenadas náuticas, teniendo en cuenta que no afectarán la zona de estudio debido a la orientación de la desembocadura del río Magdalena.

La dirección de propagación predominante del oleaje en el área de Bocas de Ceniza es E-NE (Figura 6) para todos los meses del año, seguidos de NE y E en diferentes porcentajes según la época.

Para el cálculo de régimen extremal, los datos de oleaje visual no son aconsejables debido a que no contemplan estados de mar extremos, ya que la ruta de los barcos cambia cuando hay temporales o los barcos no zarpan, por lo tanto se utilizan otros métodos indirectos para la generación sintética de dichos oleajes. La obtención del régimen extremal se basó en los estados de mar presentados en [7], el cual se efectuó con vientos huracanados y la propagación de oleaje en el Atlántico con el modelo Simulating Wave Nearshore (SWaN, por su acrónimo en inglés) [8]. Para la formulación de los escenarios extremales en este estudio se tomaron períodos de retorno de 10, 20 y 50 años.

Interacción ola-corriente

El proceso cuando el oleaje se propaga sobre una zona en la que existe una corriente, cambia las características cinemáticas y dinámicas del oleaje, conocido como la interacción

ola-corriente. Éste es un problema complejo, ya que trata de analizar la propagación del oleaje en un medio no homogéneo, anisótropo, dispersivo, disipativo y en movimiento.

El oleaje incidente en una desembocadura sufre transformaciones a medida que se extiende a través del canal del río aguas arriba, disminuyendo su energía mientras se propaga. Por otro lado, la variabilidad espacio-temporal de las corrientes, así como las variaciones del nivel medio, hacen que el oleaje esté sometido a continuas modificaciones tales, que si la intensidad de la corriente aumenta en oposición al oleaje puede bloquearlo incrementando la pendiente de la ola hasta que rompa [9].

Esto implica que en cinemática las ecuaciones que rigen la interacción ola-corriente centren la atención en la modificación de la ecuación de dispersión. En el caso donde la corriente se asume constante, no homogénea y el campo del oleaje se propaga hacia la desembocadura, existe una transformación de la frecuencia del oleaje que sería percibida por un observador fijo en el sistema de coordenadas. Además, la velocidad de la ola es siempre tomada en dirección perpendicular del frente de ola porque cuando la componente de la velocidad de la corriente es paralela al frente de onda no contribuye a la velocidad de la ola [10].

Con el observador fijo, el cambio de la frecuencia viene dado por w :

$$w = o + UK \tag{2}$$

Donde,

- U = Vector de velocidad de la corriente.
- k = Número de onda vectorial (magnitud $k = \frac{2\pi}{L}$, perpendicular a crestas y valles, es decir, en su dirección de propagación).
- ω = Frecuencia de las olas en radianes en el marco de referencia en el que U es la velocidad de la corriente.
- σ = Frecuencia de las olas en radianes con respecto al agua en movimiento con la corriente U .

La variable ω , por lo general es llamada frecuencia absoluta y σ es la frecuencia relativa que depende del número de onda.

Con la frecuencia $\omega = \sqrt{gk}$ y la velocidad de fase $c = \sqrt{\frac{g}{k}}$ se puede escribir la relación de la ecuación (3) como:

$$k(U + C_r) = k_o C_o \quad (3)$$

Donde las variables en un medio cuando la velocidad de la corriente horizontal es cero (están identificadas por el subcero y es la velocidad de fase relativa). El resultado de la ecuación cuadrática de $\frac{C_r}{C_o}$ (4) tiene como solución [11]:

$$\frac{C_r}{C_o} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \left(1 + \frac{4U}{C_o} \right)^{1/2} = \left(\frac{K_o}{K} \right)^{1/2} \quad (4)$$

Ahora, cuando $U=0$, el signo se toma positivo para $C_r=C_o$. La relación de dispersión resulta ser la siguiente:

$$gk = \frac{w^2}{\left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} (1 + (4U w/g)^{1/2}) \right]^2} \quad (5)$$

Siendo ésta la ecuación general (5) de la relación de dispersión en la presencia de corrientes [12].

El efecto de la corriente sobre el oleaje se refleja físicamente como una refracción, produciendo en la celeridad del oleaje y de la longitud de onda una reducción.

Estos fenómenos físicos se afectan en ambos sentidos; las corrientes de igual mane-

ra se ven alteradas en la presencia del oleaje. Este efecto del oleaje sobre la corriente se manifiesta como un aumento en la rugosidad aparente del fondo, provocando que la corriente fluya hacia donde sea menor el oleaje o transversal al mismo [13].

Para que exista el aumento de la altura de la ola, debe existir un flujo de energía. El mecanismo físico responsable del cambio en la altura de la ola es el cambio de la densidad de energía local en el movimiento ondulatorio, donde la energía se mueve a lo largo del frente de onda creando un flujo de energía neto. Por lo tanto se deduce que cuando el oleaje va en dirección opuesta a la corriente, la frecuencia aumenta y por lo tanto la altura de ola varía, incrementándose para conservar el flujo de energía.

Esta investigación se basa en la recopilación de datos de caudal y oleaje existentes en la región cercana a Bocas de Ceniza, con el propósito de representar el clima marítimo en la zona de estudio y modelar numéricamente los procesos de oleaje de la manera más fiel posible, logrando mostrar a través de escenarios la variación del oleaje en presencia de corrientes.

METODOLOGÍA

Para llevar a cabo el estudio del impacto que determinada actuación pueda causar en el litoral, uno de los procesos que es necesario tomar en cuenta es el análisis de la dinámica en la zona de interés. En el caso particular se usaron dos modelos matemáticos para evaluar la influencia de las corrientes del río Magdalena en los campos de oleaje; el modelo hidrodinámico bidimensional (H2D) [14] para simular las corrientes de modo estacionario, y SWAN para programar el oleaje.

Para la aplicación de los modelos, la representación del dominio se realizó con una malla estructurada (figura 8) que se define como aquella donde cada elemento de control

tiene el mismo número de elementos vecinos [15]. La ventaja radica en su simplicidad, requiere menos memoria de cómputo y puede controlar el tamaño de cada elemento.

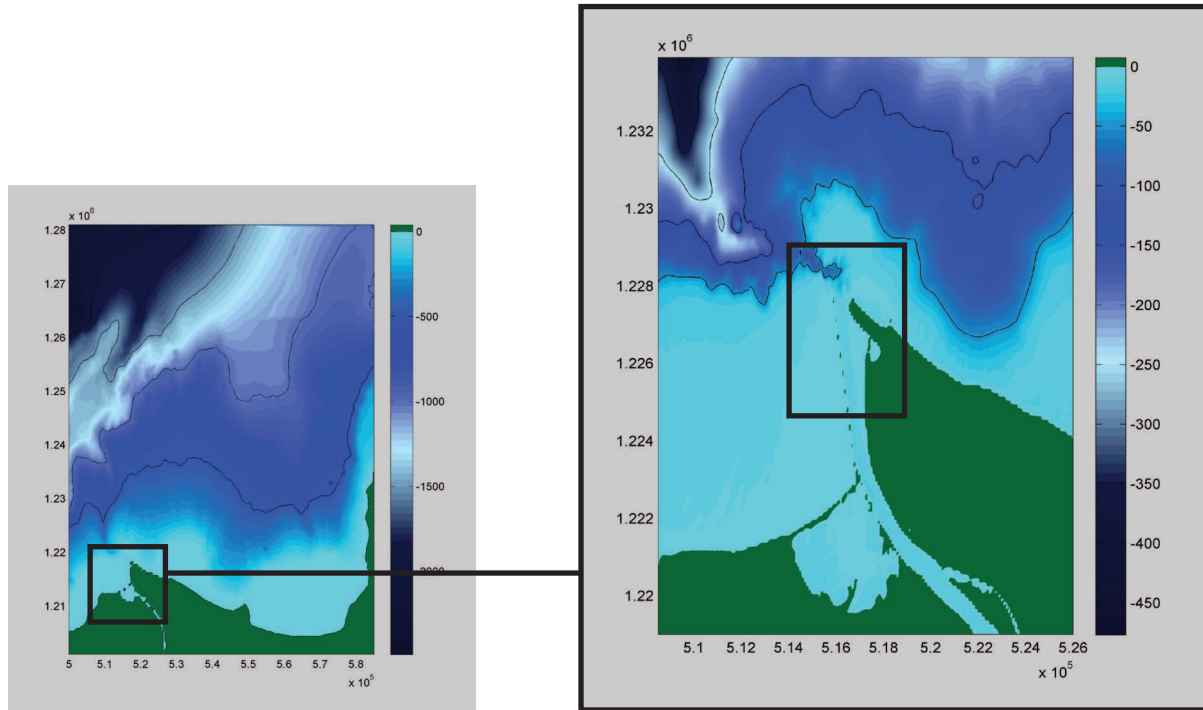


Figura 8. Malla base y de nido (nesting) elaboradas a través del método de interpolación Kriging, en el cual se delimitó el área y el tamaño de celda (Tabla I).

Tabla I. Descripción de las mallas utilizadas

Área	ID	Malla	Resolución (m)	Límites (UTM, en m)
Desembocadura del Magdalena	Base	175 x 149	100 x 100	X: 508500 – 526000 Y: 1219000 – 1233900
Bocas de Ceniza	Nido	481 x 601	10 x 10	X: 513900 – 518700 Y: 1224000 – 1230000

Escenarios de simulación

Para la definición de los escenarios es indispensable tener en cuenta dos factores de influencia en la desembocadura: el oleaje y el caudal del río Magdalena. De acuerdo con esto se analizaron los caudales típicos en la desembocadura

del río, los cuales según su tendencia se dividieron en tres épocas relacionadas con las dos épocas marcadas del Caribe: seca y húmeda, además de evaluar la relación con la energía del oleaje a través del año (figura 9), que muestra una variación consecuente con los caudales, reafirmando las tres secciones propuestas en las figuras 6 y 7.

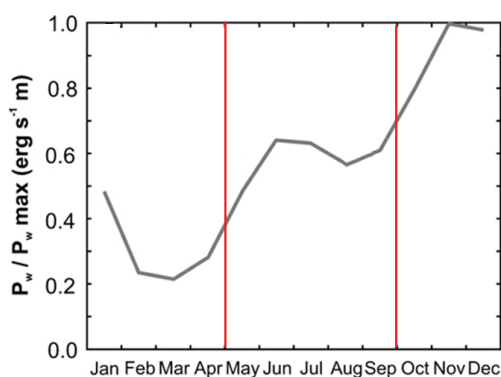


Figura 9. Energía del oleaje del río Magdalena en el año [16].

Los escenarios considerados contemplan las posibles combinaciones de los caudales típicos en los diferentes meses y las direcciones del oleaje provenientes del cuadrante I en coordenadas náuticas.

Para cada una de las direcciones, de acuerdo con su respectiva distribución de probabilidad conjunta de periodo pico y altura significativa, se seleccionaron dos estados de mar como escenarios: el de mayor probabilidad conjunta y con la mayor altura de ola probable (Tabla II).

Tabla II. Estados de mar seleccionados más representativos en cada época. El porcentaje de ocurrencia es con respecto al estado de mar en determinada dirección.

Enero a abril-Caudal Bajo (7000 m ³ /s)						
Dirección	Mayor probabilidad			Casos extremos		
	Hs	Tp	%	Hs	Tp	%
N	1-1,5	5-7	21,57	3-3,5	5-7	0,98
NNE	1-1,5	5-7	19,34	3-3,5	7-9	0,25
NE	1,5-2	5-7	16,88	3,5-4	7-9	0,37
NEE	1,5-2	5-7	18,87	3,5-4	7-9	0,07
E	1,5-2	5-7	17,07	3,5-4	7-9	0,06
Mayo a septiembre-Caudal medio (9000 m ³ /s)						
N	1-1,5	5-7	27,16	2-2,5	7-9	3,7
NNE	1-1,5	5-7	20,77	3-3,5	7-9	0,32
NE	1-1,5	5-7	17,20	3,5-4	5-7	0,10
NEE	1,5-2	5-7	18,32	3,5-4	7-9	0,03
E	1,5-2	5-7	18,41	3,5-4	7-9	0,04
Octubre a diciembre-Caudal alto (11000 m ³ /s)						
N	0,5-1	5-7	17,86	2,5-3	7-9	1,19
NNE	1-1,5	5-7	24,23	2,5-3	7-9	1,32
NE	1-1,5	5-7	18,50	3-3,5	7-9	0,86
NEE	1,5-2	5-7	16,79	3-3,5	7-9	1,08
E	1,5-2	5-7	19,55	3-3,5	7-9	0,87

El régimen extremal, según la metodología utilizada por [6], para lo cual se ajustó el régimen de altura significativa (Hs) y periodo pico (Tp) de temporales en profundidades indefinidas a papel probabi- lístico Gumbel de máximos, se obtuvo con los periodos de retorno consignados en la Tabla III.

Tabla III. Periodos de retorno en régimen extremal.

Periodo de retorno (años)	Estado de mar en régimen extremal		
	Hs (m)	Tp (s)	Dirección
10	5,75	9,09	Norte
20	6,25	9,3	Norte
50	6,85	9,6	Norte

Con el fin de seleccionar los escenarios de mayor incidencia, la dirección optada es el resultado de las simulaciones de [17], que indican que las olas procedentes del Norte producen mayores alturas significativas de ola dentro del canal en Bocas de Ceniza.

RESULTADOS

Régimen medio

Los escenarios modelados a los que se hará referencia sólo se consideraron para las

direcciones más probables NE, NEE, y E, según las rosas de oleaje (Figura 7). Éstas son frecuentes en todos los meses del año, con porcentajes que varían entre 41,6 y 19,64 % como se ilustra en la Tabla IV.

Tabla IV. Probabilidad de ocurrencia de estados de mar, de acuerdo con los meses del año en términos de porcentaje, con el respectivo caudal propuesto como típico en la variabilidad mensual.

Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun
Caudal	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Medio	Medio
NE	27,40 %	31,42 %	32,93 %	31,26 %	26,15 %	19,64 %
NEE	41,35 %	36,52 %	37,13 %	38,54 %	36,63 %	39,56 %
E	22,11%	21,02 %	20,87 %	20,52 %	26,32 %	32,04 %
Meses	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
Caudal	Medio	Medio	Medio	Alto	Alto	Alto
NE	21,75 %	24,91 %	21,96 %	22,60 %	24,93 %	30,08 %
NEE	41,60 %	36,91 %	33,51 %	29,77 %	33,51 %	41,28 %
E	27,02 %	27,43 %	29,46 %	27,06 %	24,16 %	19,52 %

Para visualizar la variación de altura de ola se elaboraron gráficas de diferencia entre las alturas de ola significativa (Hs), de acuerdo con la simulación de la propagación de oleaje con la corriente del río Magdalena y luego sin esta influencia, descrito en los siguientes parámetros:

Hs_c = Altura de ola significativa, simulada con corrientes.

Hs_{sc} = Altura de ola significativa, simulada sin corrientes.

$$\Delta Hs = Hs_c - Hs_{sc}$$

La diferencia de altura de ola obtenida de las modelaciones en los escenarios propuestos para cada condición de dirección y caudal correspondiente a los meses seleccionados se presenta en las figuras 10 y 11. Donde los valores positivos de la diferencia indican un oleaje mayor en presencia de corrientes y negativos en el caso contrario.

Para tener elementos de comparación cuantificables se relacionó el máximo incremento de la diferencia de altura de ola (ΔHs) de cada estado de mar respecto a su dirección en la Tabla V.

Tabla V. Valores de incremento máximo en la altura de ola significativa ΔH_s (m) en la dirección NE, NEE y E.

Dirección	NE		NEE		E	
	Más probable	Mayor Altura ola	Más probable	Mayor Altura ola	Más probable	Mayor Altura ola
Caudal bajo	0,8	1,14	0,43	0,62	0,24	0,32
Caudal medio	0,93	1,35	0,64	0,93	0,39	0,46
Caudal alto	1,1	1,55	0,8	1,2	0,53	0,65

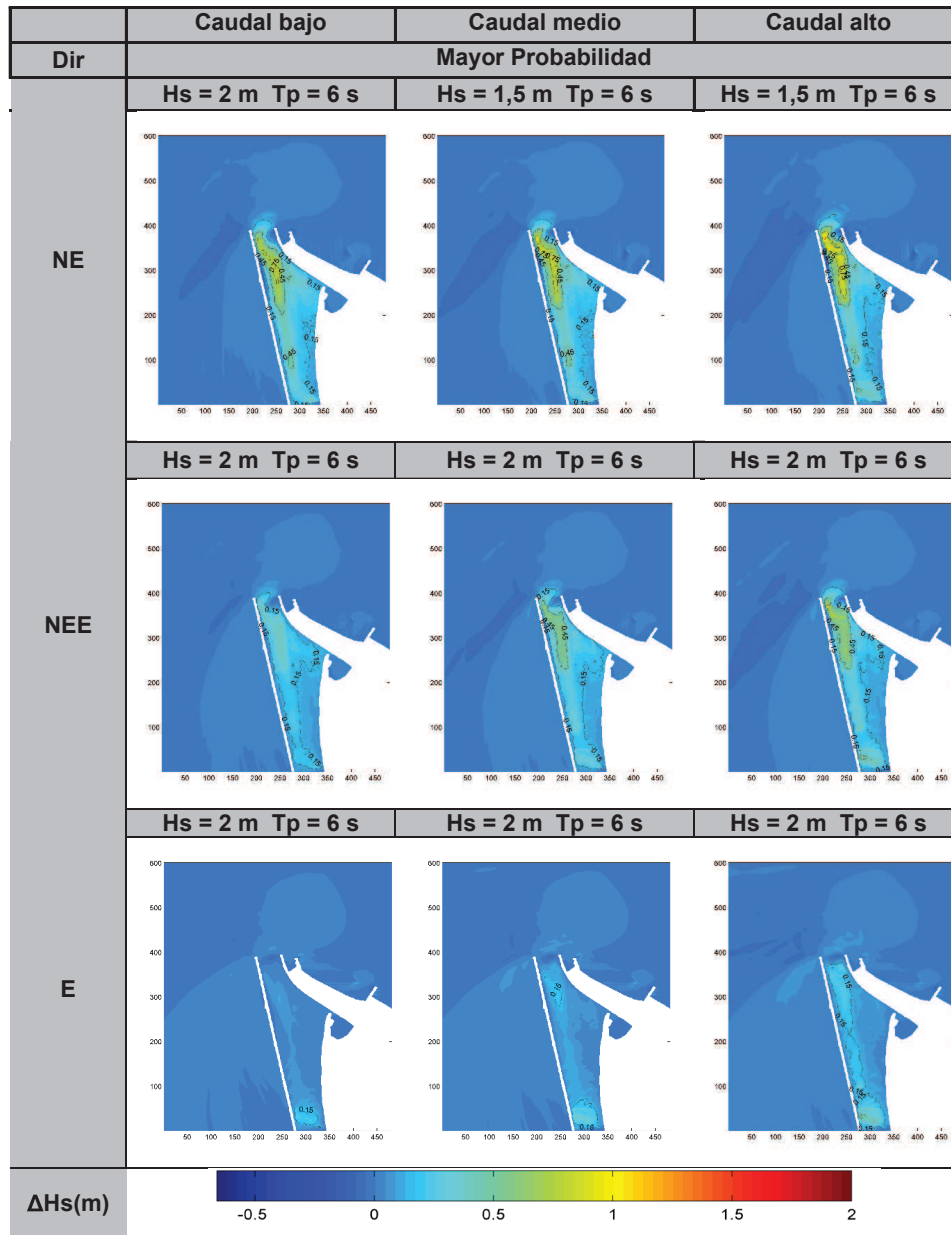


Figura 10. Diferencias de altura de oleaje para diferentes estados de mar y caudales con mayor probabilidad.

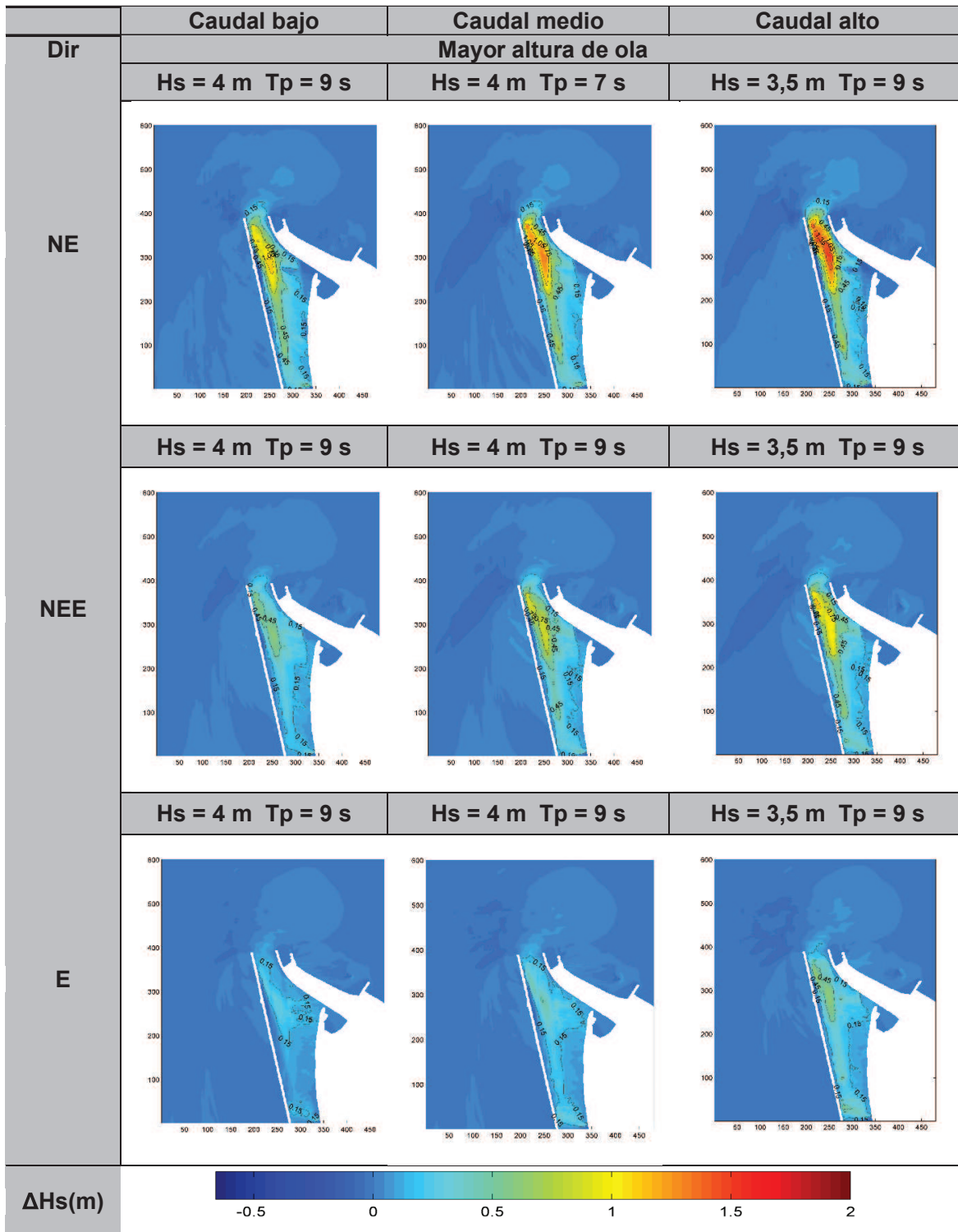


Figura 11. Diferencias de altura de oleaje para diferentes estados de mar y caudales con mayor altura de ola.

Régimen extremal

El régimen extremal muestra eventos que pueden pasar con una frecuencia de 10, 20 y 50 años, pero las transformaciones que puede producir en la costa son de mayor peligro que las del

régimen medio. El observar el efecto de las corrientes bajo estas circunstancias es de vital importancia para la toma de decisiones en construcciones marítimas. Los estados de mar fueron definidos en la Tabla III y se representan en la figura 12; los valores de incremento se resumen en la Tabla VI.

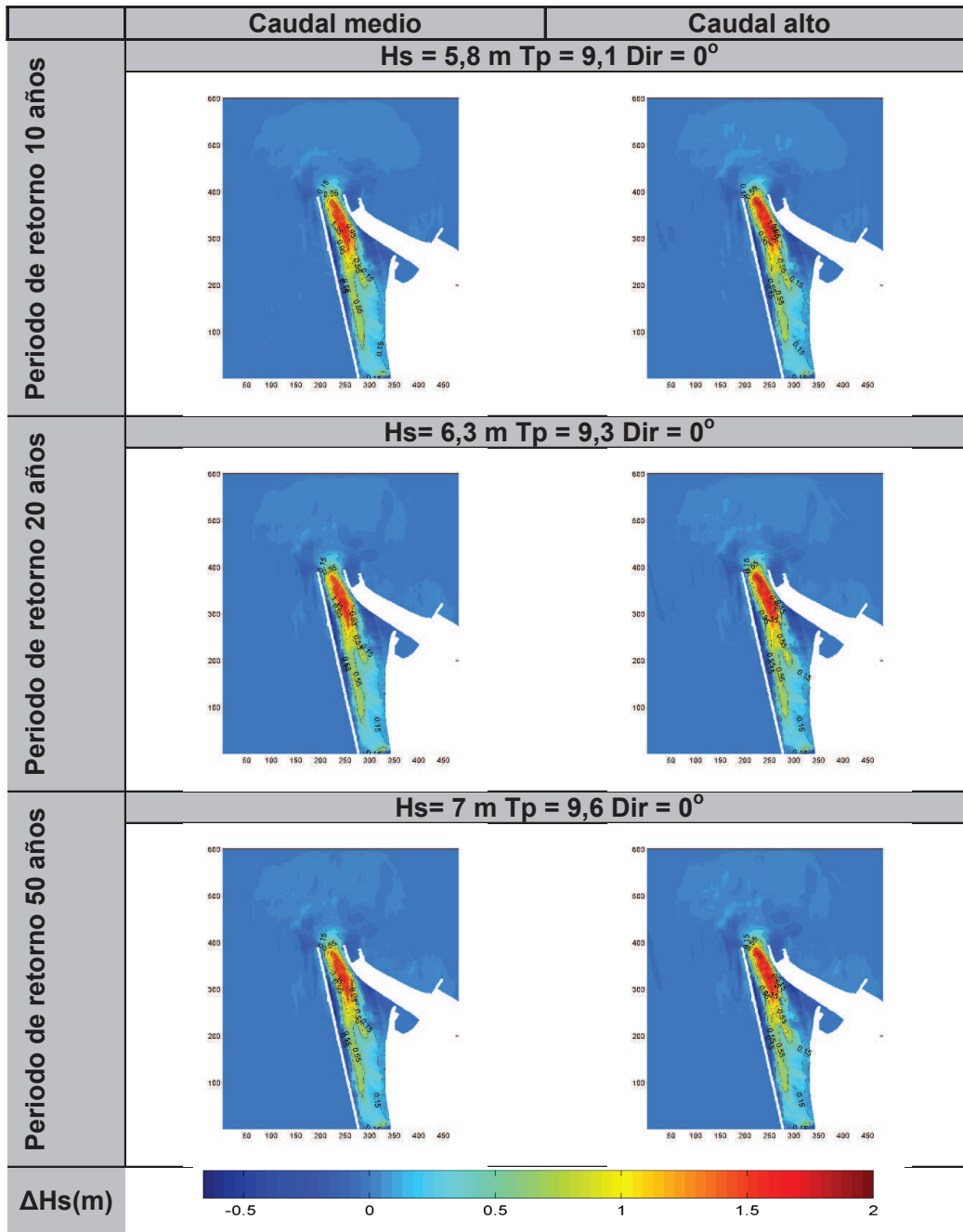


Figura 12. Diferencias de altura de oleaje para los estados de mar del régimen extremal.

Tabla VI. Valores de incremento máximo en la altura de ola significativa en la régimen extremal.

Periodo de retorno (años)	Caudal medio	Caudal alto
10	1,67 m	1,83 m
20	1,66 m	1,83 m
50	1,65 m	1,84 m

DISCUSIÓN

Fue necesario construir los diferentes escenarios de simulación para evaluar el comportamiento del oleaje sin la influencia de las corrientes y con la influencia de ella. Se observa que por el cambio de la profundidad, cuando el oleaje se acerca a la desembocadura del río empieza a incrementarse su altura y a reducirse su longitud de onda, debido a la

disminución de la profundidad evidenciada en las tablas de valores de incremento máximo de altura de ola significativa (tablas V y VI). Aunque este proceso se manifiesta independientemente de las corrientes, se intensifica con la influencia de éstas.

Al realizar un corte de perfil longitudinal en la zona de la salida del tajamar es posible observar el incremento de altura de la ola como se muestra en la figura 13.

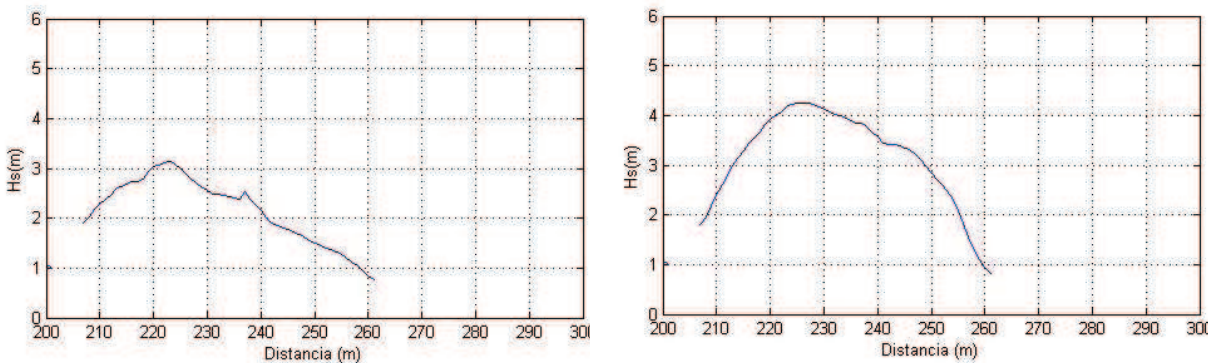


Figura 13. Perfil longitudinal de la altura de la ola significativa en la salida de los tajamares sin la influencia de la corriente (izquierda) y con la influencia de la corriente (derecha).

Entonces se confirma cómo la interacción ola-corriente, descrita anteriormente, se refleja en el oleaje produciendo variación en la altura de ola, la cual se incrementa para conservar el flujo de energía, hecho que de igual forma fue documentado por [18] con un sistema operativo de pronóstico para la región de *off Sand Heads en Pacific Weather Centre*; donde los campos de oleaje cambian por la proximidad con la desembocadura del río, afectando la navegabilidad de la zona.

Se recomienda para futuros trabajos realizar la calibración del modelo, como lo

describe [19], donde se confirma la sobreesitimación del modelo SWaN en presencia de corrientes, siendo corregida a través de la formulación del *whitecapping*.

CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta que el fenómeno es anisotrópico, se realizó el análisis por direcciones empleando los diferentes caudales y según su variabilidad mensual. De los resultados de las simulaciones numéricas se obtuvieron las siguientes conclusiones:

-Los caudales altos inducen una mayor altura de ola en Bocas de Ceniza. La corriente del río que viaja en sentido contrario al oleaje produce un cambio en la longitud de la onda, aumentando la altura de ola y reduciendo el período.

-Las simulaciones con el modelo SWAN indican que las olas procedentes del norte penetran más en Bocas de Ceniza, por lo tanto representan la condición más desfavorable para las estructuras costeras en esta zona y la seguridad marítima.

-La concentración de las mayores diferencias de altura de ola, están localizadas en el canal de acceso en un tramo de 200 m aproximadamente desde la entrada en los tajamares, donde la velocidad de la corriente en este tramo oscila entre 1,2 y 1,8 m/s, en tanto que afuera oscila entre 0,1 y 0,2 m/s.

-Para los oleajes provenientes del NE se acentúa mayor concentración de energía que en el NEE y E. Esto se debe de la orientación de la corriente respecto de la dirección del oleaje que tiene mayor incidencia sobre la desembocadura, asociado también al incremento del caudal del río Magdalena.

-Para el oleaje proveniente del NEE, el más frecuente en todo el año, el incremento de altura es menor NE y mayor que del E. Prácticamente se reduce en un 30 % el incremento de altura de ola respecto de la dirección NE.

-El oleaje proveniente del E, es la dirección de menor altura de ola entre todas las direcciones de propagación simuladas. Con el aumento de caudal de bajo a alto se intensifica el incremento de la altura de oleaje en un rango de 0,15 m, entre caudales. En la entrada de la desembocadura no presenta incremento.

-En los escenarios de condiciones extremas, el oleaje correspondiente para cada periodo de retorno con el cual se propagó desde aguas profundas, no se disipa de manera significativa hasta la desembocadura, por lo cual llega en condiciones muy similares de altura de ola. En consecuencia, para las tres condiciones de periodo de retorno escogidas con el mismo caudal, la diferencia de altura de ola no se incrementa representativamente.

AGRADECIMIENTOS

Al CIOH por el apoyo en el desarrollo del estudio, además del uso de los datos de batimetría para las modelaciones y a todo el personal que estuvo presente en el proceso en especial del Área de Oceanografía Operacional; a Madys Zayas, por la ayuda en la logística administrativa; a Wilderman Cerén Prens, en la instalación del modelo; a Claudia Janeth Dagua y al Capitán de Corbeta Leonardo Marriaga Rocha, por sus aportes conceptuales, y a mis maestros los doctores Luis Otero y Serguei Lonin por su orientación y revisión del tema.

REFERENCIAS

- [1] Ministerio de Transporte. 2004. Inversiones estratégicas prioritarias en zonas portuarias de Colombia. Documento CONPES 3315.
- [2] Ercilla G., Alonso, B., Estrada, F., Ghiocc, F., Baraza, J. y Farán, M. 2002. The Magdalena turbidite system (Caribbean Sea): present-day morphology and architecture model. *Marine Geology*. Vol. 185:303-318.
- [3] Restrepo Ángel, J.D. 2005. Los sedimentos del río Magdalena: reflejo de la crisis ambiental. Medellín: Universidad EAFIT. 9:221.
- [4] Condiciones generales del puerto de Barranquilla durante abril de 2006. E-004-046-06 [Internet]. Cormagdalena. Universidad del Norte. Ideha. [Citado el 8 de agosto de 2009]. Disponible en: <http://fs03eja1.cormagdalena.com.co/nuevaweb/Puertos/E-004-046%20Sexto%20Inf.%20Mensual%20%20C%20de%20A-Abr%202006.pdf>.
- [5] Slutz, R.J., Lubker, S.J., Hiscox, J.D., Woodruff, S.D., Jenne, R.L., Joseph, D.H., Steurer, P.M. & Elms, J.D. 1985. Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set; Release 1. NOAA Environmental Research Laboratories, Climate Research Program, Boulder, CO, 268 pp. (NTIS PB86-105723)

- [6] Tejada, C. y González, M. 2003. Desarrollo de un módulo informático para el manejo de datos de oleaje visual para las aguas jurisdiccionales colombianas. Boletín Científico CCCP No. 9:88-98
- [7] Agudelo, P., Restrepo, J., Molares, R., Tejada, Torres, R., Osorio, A. 2005. Determinación del clima de oleaje medio y extremal en el Caribe colombiano. Boletín Científico CIOH No. 23: 41-55.
- [8] Booij, N., Haagsma, I.J., Holthuijsen, L., Kieftenburg, A., Ris, R., van der Westhuysen, A. & Zijlema, M. 2007. SWaN User Manual, Cycle III Version 40.51. Delft University of Technology, Netherlands, 115 pp.
- [9] Olabarrieta, M., Medina, R. y Lomóco, P. 2005. Efecto de la interacción ola-corriente en la propagación de la marea en estuarios. Ingeniería del agua, Vol. 12, No. 4:329-344.
- [10] Rusu, L. & Guedes, C. 2011. Modelling the wave-current interactions in an offshore basin using the SWaN model. Ocean Engineering, Vol. 38: 63-67.
- [11] Phillips, O.M. 1977. The Dynamics of Upper Ocean. Cambridge University Press, Cambridge.
- [12] Peregrine, D.H. Interaction of water waves and currents. Adv Appl Mech 1976; Vol. 16:9-117
- [13] Comisión Económica para América Latina y el Caribe (Cepal). 2012. Efectos del cambio climático en la costa de América Latina y el Caribe. Efectos Teóricos. España: Naciones Unidas, 86 pp.
- [14] Grupo de Ingeniería Oceanográfica y Costas (GIOC). 1990. The H2D long wave propagation model. Universidad de Cantabria. Santander, España.
- [15] García, F., Palacio, C. y García, U. 2008. Generación de mallas no estructuradas para la implementación de modelos numéricos. Dyna. Año 76, No. 157: 17-25. Medellín.
- [16] Restrepo, J. & López, S. 2007. Morphodynamics of the Pacific and Caribbean deltas of Colombia, South America. Journal of South American Earth Sciences.
- [17] Moffat and Nichol International. 2006. Obras de profundización del canal de acceso al Puerto de Barranquilla, Colombia. Modelo de propagación de oleaje.
- [18] Stronach, J., Zaremba, L., Wuong, M., Neil, L. & McLennan, N. 2006. Wave and current forecast system for the mouth of the Fraser River. Hay and Company Consultants, Vancouver, 15 p.
- [19] van der Westhuysen, A. J. 2011. Improved Modelling of Wave-Current Interaction in SWaN. Coastal Engineering Proceedings,1(32), waves-45.