

Modelamiento matemático de la dinámica marina en la región de Cartagena

Mathematical modelling of the marine dynamics in the region of Cartagena

Fecha de recepción: 2015-05-07 / Fecha de aceptación: 2015-08-06

Diego Alejandro Uribe Suárez¹, Carlos Alejandro Escobar Sierra¹, David Alejandro Ruiz Sarrázola¹

Universidad EAFIT. Departamento de Ingeniería Civil. Grupo de Investigación en Mecánica Aplicada. Carrera 49 N° 7 Sur-50, Medellín, Colombia. Tel: +57 (4) 448 95 00. Correo electrónico: duribes@eafit.edu.co¹, carloses@eafit.edu.co², druizsar@eafit.edu.co³.

Uribe Suárez, D. A., Escobar Sierra, C. A. y Ruiz Sarrázola, D. A. (2015). Modelamiento matemático de la dinámica marina en la región de Cartagena. Bol. Cient. CIOH, 33: 69-86.

RESUMEN

Se presenta un estudio de la dinámica marina de la región de Cartagena, entre el municipio de Galerazamba y Bocachica, el cual se fundamenta en modelación matemática y mediciones oceanográficas realizadas en el área de estudio. El modelo matemático $2D_H$ se construyó en la plataforma Delft3D e incluye los forzamientos externos debidos a la marea, el oleaje y la atmósfera. El desempeño de este modelo se evaluó al confrontar el oleaje y las corrientes observadas con las modeladas en las épocas climáticas características (época seca y húmeda). Las campañas de medición combinaron estaciones de medición fijas y móviles que permitieron respectivamente obtener una alta resolución temporal y espacial de la dinámica marina. Luego de verificarse un desempeño adecuado del modelo hidrodinámico se procedió a usarlo en la determinación del patrón de corrientes y oleaje en cada época climática. Una importante variabilidad estacional de las corrientes y el oleaje se pudo determinar, de tal forma que, en la época seca son características las corrientes hacia el suroeste y un fuerte oleaje del NO, N y NE; mientras que en la época húmeda, las corrientes tienden a dirigirse hacia el noreste y el este, y el oleaje se debilita significativamente.

PALABRAS CLAVES: Cartagena, modelo hidrodinámico, análisis de sensibilidad, patrones marinos.

ABSTRACT

A model for the hydrodynamics of Cartagena's sea region between the towns Galerazamba and Bocachica is presented. The mathematical model ($2D_H$) was constructed using the platform DELFT3D, which considers the effects of tides, waves and atmospheric conditions. The performance of the model was evaluated by comparing its results with measurements of directional waves and currents, for the characteristic seasons of the Caribbean (dry and wet conditions). Static and dynamic measurement probes were used in order to increase the spatial and temporal resolutions of the sea dynamics. After verifying the correct behavior of the hydrodynamic model, it was used to determine both the pattern of currents and waves for each season. Results show a considerable seasonal variability of currents and waves, which on dry season the current flow is directed to the Southwest and strong surge to the Northwest, North and Northeastern, meanwhile for wet season, the currents are directed to the Northeastern and east, and the surge weakens significantly.

KEYWORDS: Cartagena, hydrodynamic model, sensitivity analysis, marine patterns.

INTRODUCCIÓN

De acuerdo con [1], la región de Cartagena se encuentra situada en una zona tectónicamente activa, donde se presentan interacciones entre las placas del Caribe y las placas de Sudamérica. La migración estacional de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) produce entre noviembre y marzo una temporada seca; entre abril y agosto una temporada de transición, y, finalmente, entre septiembre y noviembre una temporada de lluvias. Cartagena presenta un régimen micromareal de tipo mixto, principalmente diurno, con amplitudes generalmente menores a 50 cm [2-3].

Cartagena, como todas las regiones del país no está exenta de problemáticas de índole social y económica, a las que se suman dificultades relacionadas con el uso de las tierras y con el establecimiento de comunidades humanas en territorios de poca altura sobre el nivel del mar. Esta situación se agrava con la erosión costera (una de las problemáticas más serias que aqueja la región) y la pérdida de territorios asociada. A pesar de ser éste un problema de considerable importancia, se carece aún de proyectos y estudios suficientes que busquen entenderlo, mitigarlo o controlarlo.

Se resaltan dentro de los pocos estudios existentes el realizado por [4], donde se describen los cambios de posición y configuración de la línea de costa entre Los Morros y Galerazamba (basados en materiales cartográficos y aerofotográficos) durante el período 1793-1990. También cabe mencionar el trabajo [5] realizado por el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH), donde se presentan características de la oceanografía costera, basadas en monitoreo remoto y el análisis de imágenes satelitales de la zona.

Otro estudio de relevancia sobre erosión costera fue presentado por [6], donde se recoge información para orientar la toma de decisiones relacionadas con el manejo, la prevención y la mitigación de los fenómenos erosivos en el litoral Caribe colombiano. La erosión costera en Colombia no es un proceso que tenga sus orígenes en los tiempos modernos, por el contrario es un proceso que siempre ha estado presente; pero que a partir de la década del 70 reporta aceleración en su acontecer, a la par de lo que ocurre con el tamaño de las ciudades ubicadas en las zonas costeras y en el interior del país.

En respuesta a la problemática planteada y buscando la generación de aportes adicionales a los proporcionados en los estudios existentes, se llevó a cabo la implementación de un modelo hidrodinámico de la región de Cartagena (Galerazamba-Bocachica). A través de esta herramienta se posibilitará la reproducción de la dinámica marina de la zona (tanto para condiciones pasadas como futuras), con una alta resolución espacio-temporal, lo cual sería muy costoso a través del uso exclusivo de equipos de medición. De esta forma se pretende acrecentar los conocimientos relacionados con la hidrodinámica de la región y, a través de ello, facilitar la toma de decisiones y la búsqueda de soluciones a problemas existentes de erosión costera, calidad del agua y otros asociados con la interacción mar-ciénagas.

ÁREA DE ESTUDIO

La región de Cartagena comprendida entre Galerazamba y Bocachica está situada al norte del departamento de Bolívar, en el Caribe colombiano. Es una región de gran importancia, no sólo para el departamento sino también para el país, ya que participa activamente de diferentes industrias como la turística, la pesca y la minera. De esta última se destacan las salinas ubicadas en el corregimiento de Galerazamba, norte de Bolívar. La franja litoral del área de estudio goza de una posición geográfica estratégica, que le facilita el comercio exterior a través del mar Caribe [7] (Fig. 1).

METODOLOGÍA

Se presentan a continuación algunos detalles de la construcción del modelo hidrodinámico de la región de Cartagena. Inicialmente, se describen las fuentes de información atmosférica y oceanográficas usadas, destacándose el desarrollo de campañas de medición que combinaron estaciones fijas (datos con alta resolución temporal) y móviles (alta resolución espacial). Posteriormente, se presenta brevemente la formulación matemática del modelo, el cual se basa en la plataforma DELFT3D. Mayores detalles del sistema de ecuaciones usado y su solución numérica pueden encontrarse en [8].

Luego, se determinó el valor de algunos parámetros numéricos de relevancia por medio de un análisis de sensibilidad; mientras que el valor de los parámetros físicos, de los cuales no se tiene ninguna información, se determinó

a través de un proceso de calibración. En la calibración se “entrenó” el modelo para reproducir adecuadamente las corrientes y el oleaje observados en la época húmeda.

Finalmente, se validó el desempeño del modelo en la época seca. Es decir, se verificó si había un adecuado funcionamiento del modelo para una época diferente a la cual fue “entrenado”.

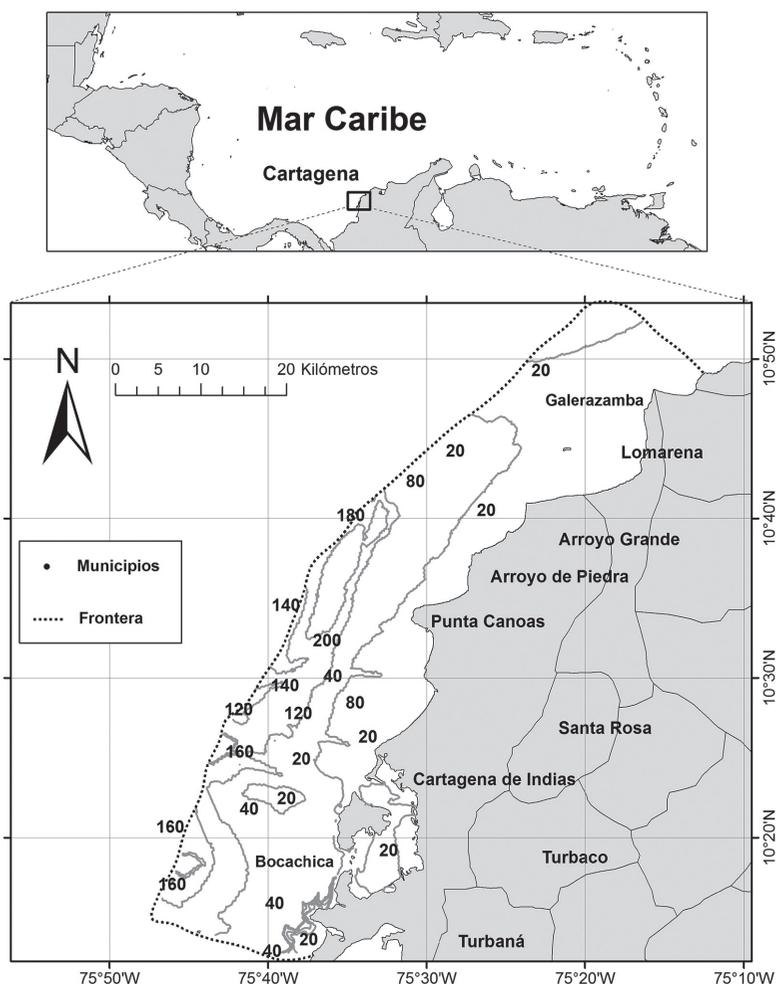


Figura 1. Localización del área de estudio-dominio de cálculo del modelo hidrodinámico y batimetría (m).

Información primaria y secundaria

Los datos utilizados para alimentar el modelo numérico fueron adquiridos de diferentes fuentes de información tales como: campañas de medición, bases de datos y modelos de cobertura global. La información primaria fue recolectada en campañas de medición llevadas a cabo entre los meses de abril, mayo y noviembre de 2012.

En estas campañas se fondearon ADCP-*Waves Workhorses*, a 10 m de profundidad, en dos locaciones ubicadas en cercanías de Galerazamba y Punta Canoas (estaciones fijas).

A través de estas estaciones se registró oleaje direccional, mareas y perfiles de velocidad con una resolución temporal entre 10 y 60 minutos. Para ampliar la cobertura espacial de

estas dos estaciones se procedió a acoplar un correntómetro acústico ADCP al casco del bote (estación móvil), con el fin de medir perfiles de velocidad a lo largo de varios transectos distribuidos en el área de estudio. Los perfiles de velocidad registrados contaron con una alta resolución espacial que osciló entre 25 y 50 m.

Por medio de fuentes secundarias se obtuvo información morfológica, oceanográfica y atmosférica. La línea de costa y la batimetría de la región de Cartagena se obtuvieron de la digitalización de las cartas náuticas 261, 408 y 409; editadas por el CIOH en los años 2011, 1999 y 2004, respectivamente. Adicional a la información batimétrica obtenida, se utilizó información topográfica proveniente del [9] en cercanías a la línea de costa, con el fin de ampliar la cobertura del modelo hasta zonas bajas sujetas a inundación durante eventos extremos.

Información oceanográfica de los niveles del mar se obtuvo del mareógrafo de Cartagena. Su información está disponible en el sitio web de la UHSLC (*University of Hawaii Sea Level Center*) [10]; las características del oleaje se

determinaron de la misión satelital JASON-2 [11] y del modelo de tercera generación WaveWatch III [12]. Finalmente, los forzamientos atmosféricos (viento y presión atmosférica) se obtuvieron del modelo de análisis y predicción climatológico NCAR (*National Center for Atmospheric Research Reanalysis Project*) [13].

Formulación matemática

El modelo fue implementado utilizando la plataforma Delft3D [8], la cual resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes para el caso de un fluido incompresible bajo los supuestos de aguas profundas y de Boussinesq, es decir las aceleraciones verticales se desprecian en la ecuación de momentum, lo cual conduce a la ecuación de presión hidrostática. Para integrar temporalmente las ecuaciones de aguas someras, se emplea un esquema de diferencias finitas y el método de dirección alterna implícita (ADI) en una malla curvilínea [14-17]. El sistema de ecuaciones en coordenadas curvilíneas utilizado es el siguiente. La ecuación de continuidad integrada en la vertical, está dada por:

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

Donde,

U y V

son las velocidades promediadas en la profundidad.

Q

representa las contribuciones por unidad de área de entrada o salida de agua.

ξ

es la longitud.

η

es la latitud.

$\sqrt{\sigma_{\xi\xi}} = R \cos(\eta)$ y $\sqrt{\sigma_{\eta\eta}} = R$ con R siendo el radio de la tierra.

La ecuación 2 corresponde a la conservación del momentum lineal en la dirección ξ , la

ecuación en la dirección η se omite ya que es análoga a ésta.

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

Donde,

- ν_v es el coeficiente de viscosidad de remolino vertical; los gradientes de densidad se desprecian excepto en los términos de presión baroclínicos.
- P_ζ representa el gradiente de presión.
- F_ζ representa el desbalance de los esfuerzos horizontales de Reynolds.
- M_ζ representa las contribuciones de fuentes externas.

El modelo resuelve el oleaje utilizando el módulo SWAN. En dicho módulo la evolución del espectro de acción está descrito por la

ecuación de balance de acción espectral, la cual es mostrada en coordenadas cartesianas en la ecuación 3.

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} c_x N + \frac{\partial}{\partial y} c_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma} c_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} c_\theta N = \frac{S}{\sigma} \quad (3)$$

El primer término de la izquierda representa la tasa de cambio local de la densidad de acción en el tiempo, el segundo y tercer término representan la propagación de la acción en el espacio geográfico (con velocidades de propagación c_x y c_y), el cuarto término representa las variaciones de las frecuencias relativas debidas a las variaciones de la profundidad y de las corrientes; el quinto término representa la refracción inducida por la profundidad y por las corrientes (con velocidad de propagación c_θ); S es el término fuente en términos de densidad de energía que representan los efectos de la generación, disipación e interacciones no lineales. El modelo considera los efectos de interacción entre oleajes y corrientes mediante una metodología de promedio en la ola.

Modelo numérico

Para llevar a cabo la modelación matemática se delimitó espacialmente el dominio de cálculo. Éste se extiende desde Bocachica hasta Galerazamba, y entre la costa y 12 km mar adentro aproximadamente, incluyendo las bahías de Cartagena, Ciénaga de la Virgen y del Totumo. A través de una malla curvilínea conformada por 34717 celdas se discretizó el dominio. La resolución de la malla varía entre 100 y 300 m en la costa y en aguas más profundas, respectivamente (Fig. 2).

El modelo numérico presenta tres tipos de forzamientos en las fronteras abiertas: corrientes,

mareas y oleaje (Fig. 3). Esta información oceanográfica en las fronteras (excepto mareas) se obtuvo mediante la realización del anidamiento de este modelo en el modelo del Caribe desarrollado por [18], haciendo uso de la funcionalidad NESTHD, proporcionada por la plataforma Delft3D.

En la Figura 4 se observan las mallas de ambos modelos (Caribe y Cartagena anidado). Mayores detalles de dicha funcionalidad se pueden encontrar en [13].

El forzamiento de la marea se determinó a través de los niveles del mar registrados en el mareógrafo situado en Cartagena [9]. De este mareógrafo se obtuvieron series de tiempo horarias que fueron impuestas en la frontera del modelo, comprendida entre los puntos 2 y 9 (Fig. 3), esto con el objetivo de asegurar la correcta reproducción de la marea.

Análisis de sensibilidad

En la primera fase de la modelación numérica se realizó un análisis de sensibilidad espacial, con el cual se buscó encontrar en qué grado los resultados del modelo fueron afectados al realizar variaciones en diversos parámetros numéricos analizados. En el análisis de sensibilidad se siguió la metodología propuesta por [19], en la cual se hacen comparaciones celda a celda entre una simulación denominada patrón y simulaciones en las cuales se alteran los parámetros de interés; las comparaciones son promediadas en el tiempo.

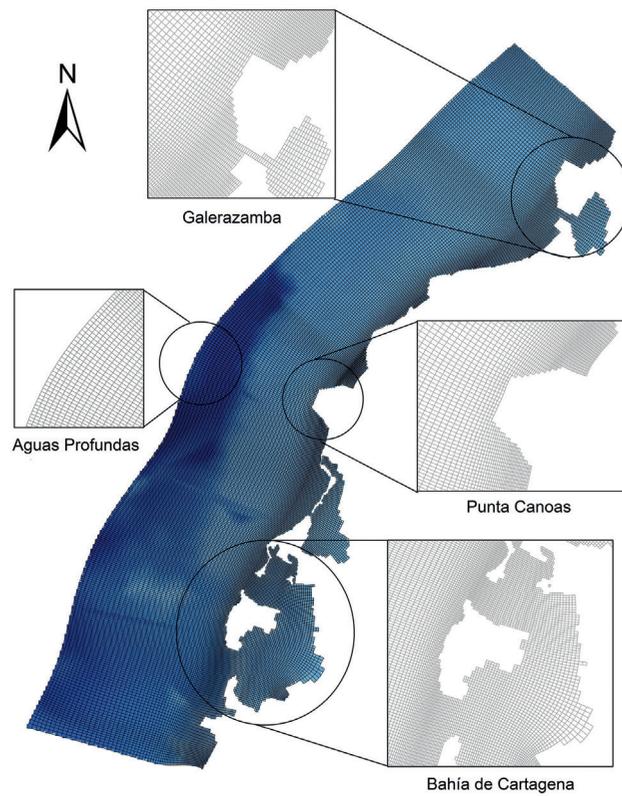


Figura 2. Dominio de cálculo, malla curvilínea y variabilidad espacial del tamaño de celdas.

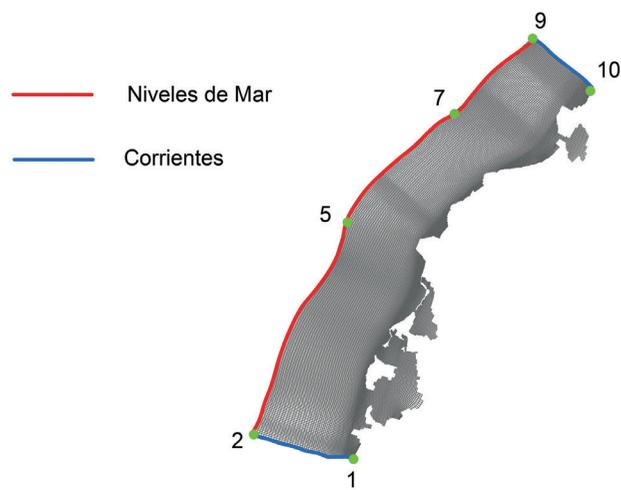


Figura 3. Fronteras abiertas del modelo de Cartagena.

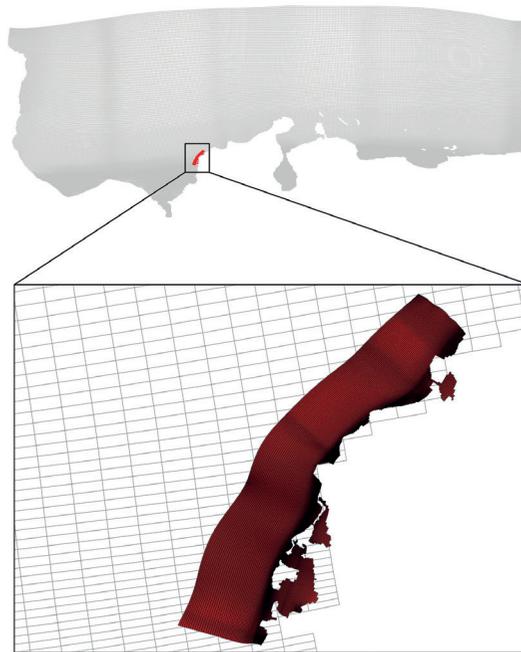


Figura 4. Malla del modelo de Cartagena anidada en malla del modelo del Caribe.

El análisis de sensibilidad se realizó para febrero de 2010, caracterizado por presentar condiciones de viento y oleaje más fuertes respecto a la época lluviosa. En la Tabla I se relacionan los rangos de variación de cada uno de los parámetros numéricos analizados; los valores de los parámetros que se encuentran en negrilla corresponden a valores utilizados en la simulación considerada patrón. Las simulaciones modificadas o alteradas fueron iguales al patrón, pero se les modificó

el parámetro numérico de interés con la intención de establecer el efecto de éste en el comportamiento de la variable que se estuviera analizando (nivel de mar, velocidad promediada y altura significativa del oleaje).

Adicional a los parámetros numéricos de la Tabla I, se determinó con la misma metodología la sensibilidad espacial del modelo al efecto del oleaje y a la discretización de la malla en la vertical (modelo 2D vs. 3D).

Tabla I. Valores de los parámetros utilizados en el análisis de sensibilidad.

Nombre del parámetro	Valor en cada simulación
Intervalo de tiempo hidrodinámico (min)	0.1 – 0.5 – 1 - 2
Intervalo de tiempo oleaje (min)	60 – 180 - 360
Número de celdas de la malla	8441- 34717- 43022- 53081

Calibración

La calibración del modelo numérico es el proceso mediante el cual se ajustan los parámetros

físicos de éste, con el objetivo de obtener la mejor reproducción posible de la realidad. La calibración del modelo fue realizada con ayuda de los datos recolectados en la campaña de medición realizada

entre el 17 y el 23 de noviembre de 2012. De igual manera se utilizó información proveniente del satélite JASON-2 para el período de tiempo comprendido entre el primero de agosto y el 27 de noviembre del mismo año. En el proceso de calibración del modelo los parámetros físicos

fueron variados uno a la vez. En la campaña de medición ya mencionada se obtuvo información de corrientes y oleaje en dos puntos geográficos distintos, Galerazamba y Punta Canoas; adicionalmente, se adquirió información del satélite JASON-2 (Fig. 5).

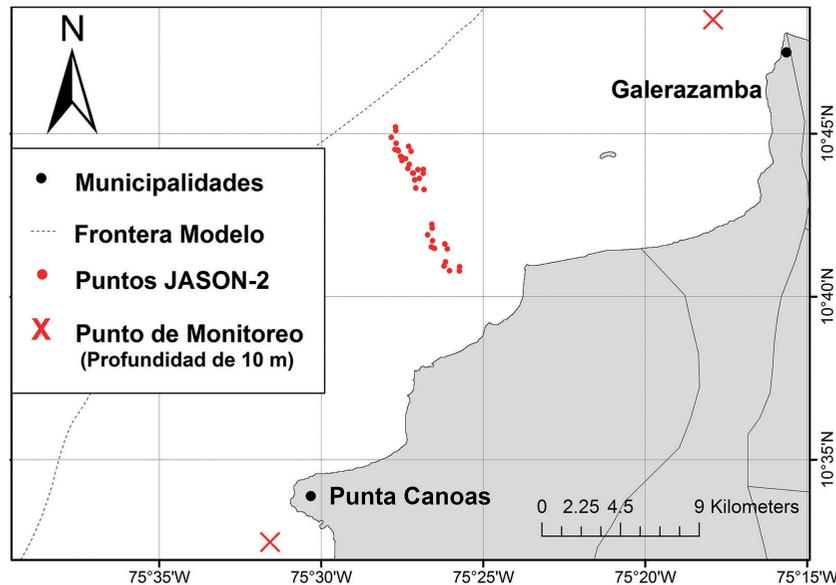


Figura 5. Ubicación fuentes de Información para calibración y validación.

En la Figura 6 se aprecian los transectos de corrientes medidos en las campañas de mediciones realizadas en 2012. Los parámetros físicos sometidos a calibración fueron el coeficiente de rugosidad de Manning, la viscosidad de remolino horizontal y el coeficiente de rozamiento del viento. Adicional al proceso de calibración realizado con los parámetros numéricos ya mencionados, se realizó una calibración de fuentes de información de oleaje para la imposición de condiciones de frontera, al igual que una calibración de fuentes de información de forzadores atmosféricos. Para la escogencia del origen adecuado de la información de oleaje que se debía utilizar como condición de frontera, se corrieron modelos utilizando información proveniente del WWIII [11], así como información proveniente del modelo del Caribe [18]. Adicionalmente, se corrieron simulaciones complementando la información de las fuentes anteriormente mencionadas con

información obtenida del satélite JASON-2 [10] en cercanías a la frontera abierta del modelo.

En el caso de la información de viento se corrieron modelos utilizando únicamente información proveniente del modelo de reanálisis NCAR [12]; así como una simulación donde la información de este modelo fue complementada con información obtenida de la estación climática ubicada en el Aeropuerto Internacional Rafael Núñez de Cartagena.

Validación

Posterior al proceso de calibración de los parámetros físicos del modelo, se llevó a cabo la validación de éste, la cual consistió en la reproducción de períodos de tiempo diferentes a los de calibración para evaluar el desempeño del modelo con sus parámetros óptimos; buscando así confirmar que el modelo correspondiera con la realidad física que se pretendía modelar.

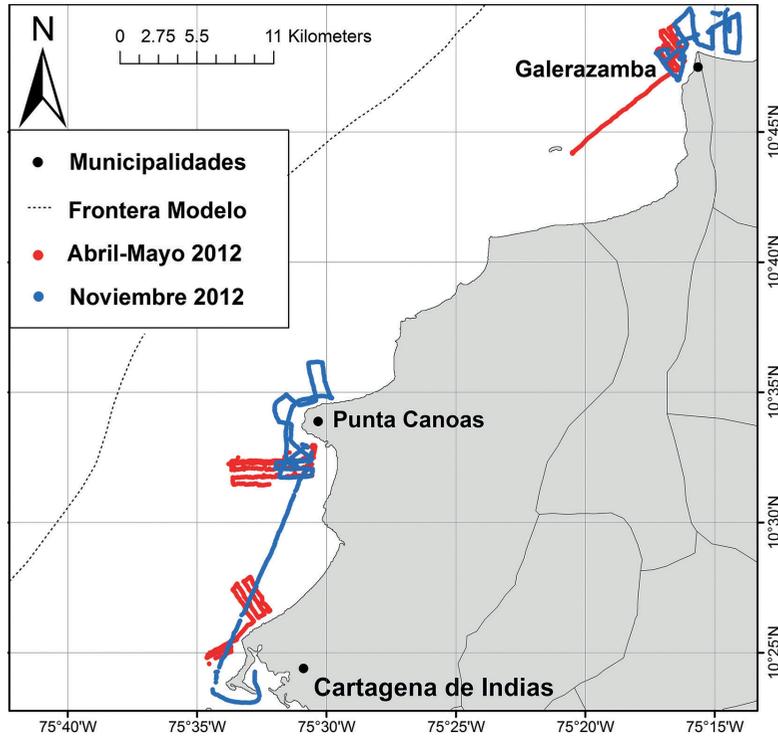


Figura 6. Ubicación de los transectos de corrientes.

La validación del modelo fue realizada con información de la campaña de campo realizada entre el 26 de abril y el 2 mayo de 2012. De igual forma, para complementar comparaciones de oleaje se utilizó información proveniente del satélite JASON-2 (Fig. 5).

Para el proceso de comparación entre el modelo numérico y las mediciones, tres estadísticos comúnmente utilizados en la evaluación de desempeño de modelos numéricos fueron tenidos en cuenta: el *Mean Absolute*

Error (MAE, por sus siglas en inglés), el *Relative Mean Absolute Error* (RMAE, por sus siglas en inglés) y el *Adjusted Relative Mean Absolute Error* (ARMAE, por sus siglas en inglés) [20], los cuales son descritos en las ecuaciones 4, 5 y 6, respectivamente.

Para el caso de análisis de sensibilidad, también se utilizaron los estadísticos ya mencionados, pero en el caso de las observaciones se tomó la información procedente del modelo tomado como patrón.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |p_i - t_i| \quad (4)$$

$$RMAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|p_i - t_i|}{|t_i|} \quad (5)$$

$$ARMAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|p_i - t_i| - OE}{|t_i|} \quad (6)$$

Donde,

p_i es el valor modelado.

t_i es el valor medido.

$|\langle t_i \rangle|$ es el promedio de los valores absolutos de las mediciones.

OE el error de las observaciones.

n es el número de datos.

Para el caso del ARMAE se tiene que valores negativos en el numerador se convierten a 0 antes de promediar.

RESULTADOS

Análisis de sensibilidad

Se analizó la sensibilidad espacial del modelo al intervalo temporal de cálculo hidrodinámico, tratando de identificar un valor adecuado para éste sin comprometer o demeritar la calidad de las simulaciones, pero que a la vez permitiese realizar simulaciones de tiempo largas en un período de tiempo aceptable. El análisis realizado mostró que el intervalo temporal de cálculo hidrodinámico adecuado es de 0.5 minutos. Para intervalos temporales de cálculo hidrodinámico mayores a 2 minutos se encontraron valores para el número de Courant mayores a 10, afectando la calidad de la solución.

Se examinó el efecto del intervalo temporal de cálculo de oleaje en las simulaciones, encontrando como valor adecuado uno de 180 minutos. Cabe destacar que los cambios en la solución al utilizar intervalos de 180 y 360 minutos fueron mínimos, pero en esta parte se optó por ser conservadores, buscando una reproducción más continua del oleaje. Se revisó el efecto del número de celdas del dominio en las simulaciones, hallando como valor adecuado un número de celdas igual a 34717.

Adicionalmente, se examinó la influencia de la inclusión o no inclusión del oleaje en la simulación, con el fin de mejorar la calidad de los resultados de ésta, evidenciándose que al simular con oleaje se presentó una mejoría significativa de los resultados del modelo. También se evaluó si la realización de simulaciones en tres dimensiones afectaba de forma significativa la calidad de los resultados, encontrándose que los resultados no fueron significativos, pero sí el costo computacional.

En la Figura 7 se presenta una imagen representativa de la metodología utilizada en el análisis de sensibilidad, en la que se aprecian las diferencias relativas obtenidas en el dominio para las variables nivel de mar y velocidad promediada (VP) al variar el intervalo de cálculo hidrodinámico entre valores iguales a 0.1 (patrón), 0.5 y 1 minutos.

Para el nivel de mar se aprecia que los errores son menores al 1 % en la mayoría del dominio, presentando algunos valores entre el 1 y el 3 % en cercanías a la línea de costa; pero, definitivamente, siendo menores con el valor de 0.5. Para la VP se aprecian errores mayores al 4 % cerca de la línea de costa y menores en aguas profundas, con un intervalo de 1 minuto, con 0.5 se observa una mejoría grande en todo el dominio, a la vez que se observa una reducción espacial de la franja cercana a la línea de costera que presentaba errores mayores al 4 %.

Comparación del modelo numérico con mediciones

De acuerdo con las campaña de medición realizadas, así como con lo reportado en la literatura [20-21], el error de observación (OE) para el oleaje fue fijado en valores de 0.1 m para los datos tomados en campañas y de 0.033 m (3 cm) para los provenientes del satélite JASON-2. En el caso de las corrientes el OE se fijó en 0.05 m/s. Para la evaluación del desempeño del modelo se compararon datos de corrientes (magnitud-dirección) y de oleaje (altura de ola-dirección) arrojados por el modelo y las mediciones. En la Tabla II se presentan tanto los parámetros numéricos como los forzamientos (atmosféricos y de oleaje) evaluados junto con sus valores y fuentes óptimas encontradas después del proceso de calibración.

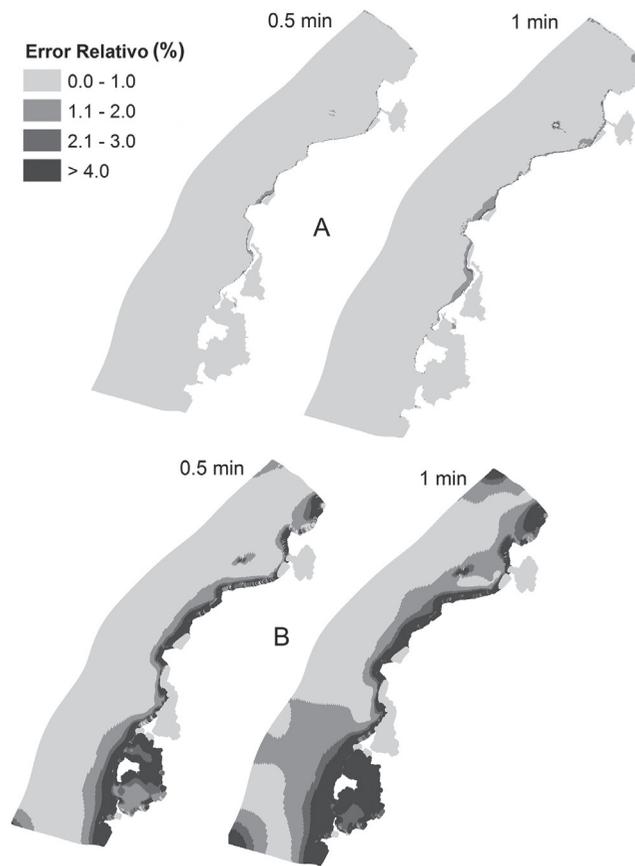


Figura 7. Variación espacial del nivel de marea **(A)** y en la velocidad promediada **(B)**.

Tabla II. Parámetros numéricos y forzamientos calibrados.

Parámetro-Proceso	Valor-Fuentes
Forzamiento atmosférico	NCAR + Información Aero. Cartagena
Forzamiento oleaje	WWIII + Información Jason-2
Coefficientes de rugosidad de Manning	0.01
Viscosidad de remolino horizontal (m ² /s)	400
Coefficiente dragado viento [0-100] (m/s)	0.00129 – 0.006881

Los errores MAE, RMAE y ARMAE finales encontrados para corrientes puntuales y para transectos se presentan en las tablas III a VI. Para el caso del oleaje los resultados del modelo se compararon con información recolectada en campañas de medición, así como con información proveniente del satélite JASON-2;

este último sólo proporciona información de altura de ola. Los errores MAE, RMAE y ARMAE finales encontrados para el oleaje se presentan en las tablas VII y VIII. En las figuras 8, 9, 10 y 11 se muestran algunas rosas de dirección, tanto para las corrientes como para el oleaje en ambas temporadas.

Tabla III. Errores de corrientes puntuales para la época lluviosa.

Galerazamba y Punta Canoas			
MAE		RMAE	ARMAE
Velocidad (m/s)	Dirección (°)	Velocidad	Velocidad
0.074	69.26	45.21 %	21.12 %

Tabla IV. Errores de corrientes en transectos para la época lluviosa.

Transectos			
MAE		RMAE	ARMAE
Velocidad (m/s)	Dirección (°)	Velocidad	Velocidad
0.078	71.03	54.50 %	26.01 %

Tabla V. Errores de corrientes puntuales para la época seca.

Galerazamba y Punta Canoas			
MAE		RMAE	ARMAE
Velocidad (m/s)	Dirección (°)	Velocidad	Velocidad
0.078	55.77	59.32 %	28.22 %

Tabla VI. Errores de corrientes en transectos para la época seca.

Transectos			
MAE		RMAE	ARMAE
Velocidad (m/s)	Dirección (°)	Velocidad	Velocidad
0.078	75.47	62.04 %	32.92 %

Tabla VII. Errores de oleaje para la época lluviosa.

JASON-2			UNINORTE			
MAE	RMAE	ARMAE	MAE	RMAE	ARMAE	MAE
Altura de Ola (m)						Dirección (°)
0.27	33.09%	29.29%	0.12	21.00 %	8.02 %	71.10

Tabla VIII. Errores de oleaje para la época seca.

JASON-2			UNINORTE			
MAE	RMAE	ARMAE	MAE	RMAE	ARMAE	MAE
Altura de Ola (m)						Dirección (°)
0.36	27.19 %	24.87 %	0.33	36.96 %	25.86 %	39.16

En la Figura 8, correspondiente a Galerazamba, se aprecia que la predominancia de las corrientes

medidas es hacia el este y en las modeladas predomina la dirección hacia el noreste.

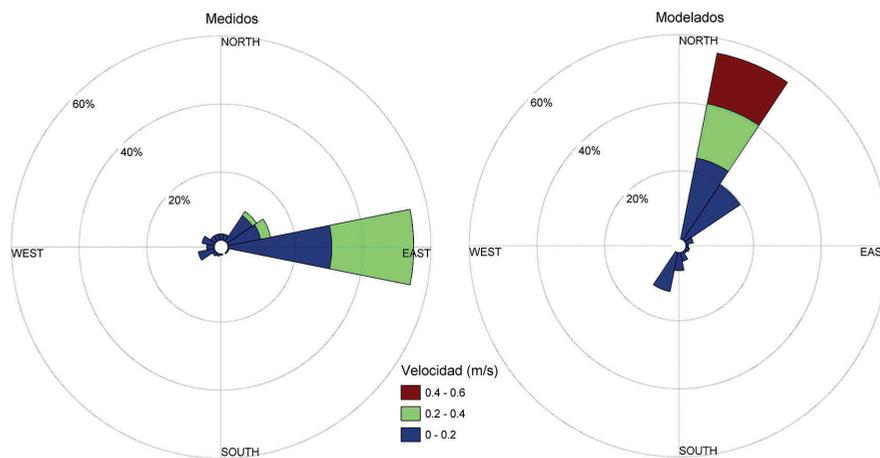


Figura 8. Rosa de dirección de corrientes para la época húmeda (Galerazamba).

La Figura 9 muestra la rosa de dirección de las corrientes en los transectos durante la época seca en todo el dominio. Se observó

que tanto las modeladas como las medidas se dirigen en su gran mayoría hacia el suroeste.

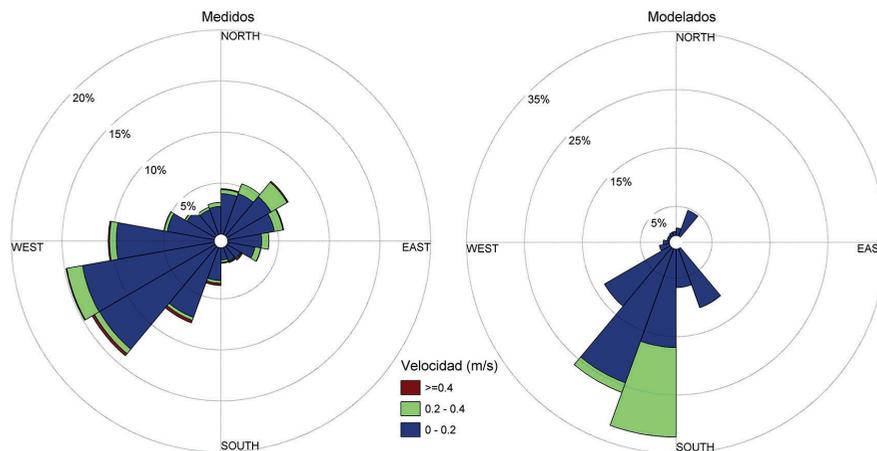


Figura 9. Rosa de dirección de corrientes para la época seca en los transectos localizados en todo el dominio.

En la Figura 10 se aprecian las rosas de dirección del oleaje para el período de validación, en éstas se evidencia que la mayoría del oleaje tanto medido como

modelado es proveniente del noroeste, norte y noreste. Es evidente la buena reproducción de la dirección del oleaje por parte de las simulaciones realizadas.

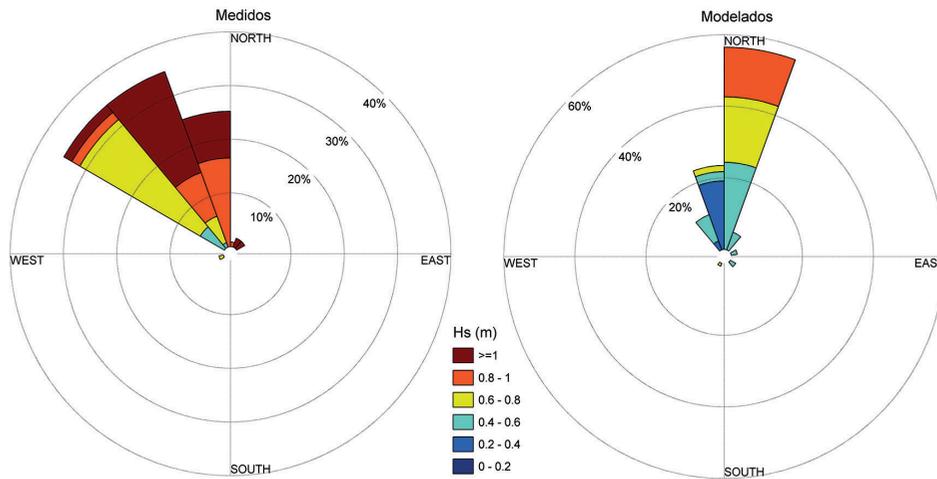


Figura 10. Rosa de oleaje para la época seca.

En la Figura 11 se aprecian las rosas de dirección del oleaje para el período de calibración, en éstas se observa que el oleaje modelado es

homogéneo y tiene dirección proveniente del norte y noreste, y el medido proviene del norte, noreste y este.

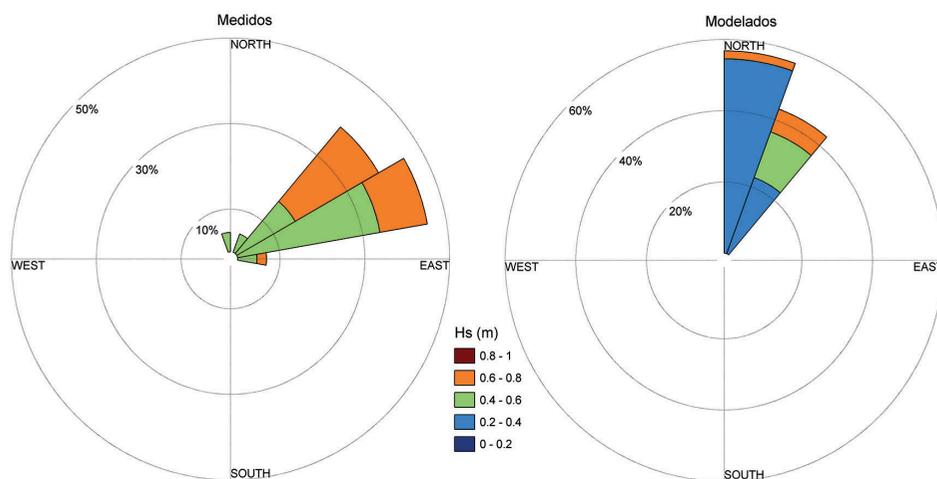


Figura 11. Rosa de oleaje para la época húmeda.

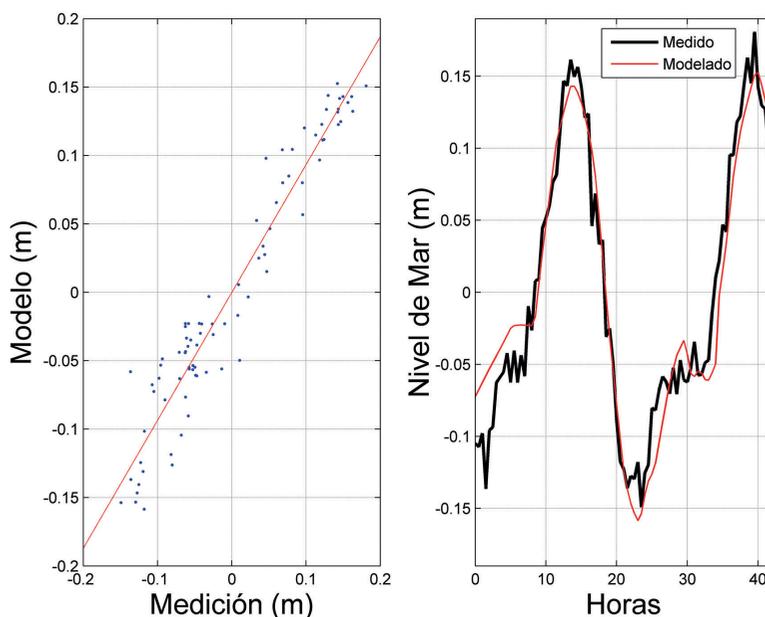


Figura 12. Nivel de marea en Punta Canoa, departamento de Bolívar.

En el caso del nivel de marea los errores MAE y RMAE son presentados en la Tabla IX.

Tabla IX. Errores de Marea.

Galerazamba y Punta Canoas	
Marea	
MAE (m)	RMAE
0.0203	24.52 %

En la parte izquierda de la Figura 12 se presenta una gráfica de dispersión para los datos de marea medidos y modelados en Punta Canoas, presentando estos un coeficiente de correlación de 0.93, lo que indica que las simulaciones siguen de forma adecuada la tendencia de los datos medidos. En la parte derecha de la misma figura, se observa una gráfica del nivel del mar contra el tiempo, mostrando ésta el ajuste del modelo con las mediciones.

DISCUSIÓN

Uno de los aspectos que pueden afectar la precisión de los resultados del modelo es la

resolución de los datos batimétricos utilizados para su construcción, los cuales presentan una resolución gruesa con respecto a la resolución de malla utilizada. Sin embargo, la fuente de batimetría utilizada (cartas náuticas) tiene la mejor resolución en comparación con las otras fuentes disponibles como el modelo GEBCO, el modelo ETOPO1 y las bases de datos de sondeos del IBCCA entre otros.

Otro aspecto importante en la precisión de los datos modelados es la calidad de las fuentes de información meteorológica, las cuales al ser métodos de reanálisis presentan un error propio al ser aproximaciones numéricas, el cual puede verse magnificado debido a la proximidad de la zona de estudio a la costa.

Por último se debe considerar que las mediciones permitieron calibrar y validar el modelo; sin embargo, éstas se encuentran limitadas temporalmente (por ejemplo, no se tienen datos medidos de un ciclo mareal completo).

CONCLUSIONES

Se llevó a cabo un análisis de sensibilidad espacial a diferentes parámetros numéricos, en el cual se encontraron los valores adecuados de

dichos parámetros para asegurar una calidad adecuada de los resultados del modelo. Se encontró que valores del intervalo de tiempo hidrodinámico mayores a 2 minutos generan inestabilidades en el modelo.

Se evidenció que el cambio en la calidad de los resultados al variar el intervalo de cálculo de oleaje es mínimo, así como el hecho que incluir el oleaje en la simulación afecta, en gran medida, la calidad de los resultados de ésta. También se encontró que al simular en tres dimensiones no se obtuvo una mejoría significativa en los resultados, pero sí se incurrió en un muy alto costo computacional.

Un modelo numérico bidimensional de la dinámica marina en la región de Cartagena fue calibrado mediante la comparación de información relativa a corrientes y oleaje, proveniente de campañas de medición-satélite, con información arrojada por el modelo. Al analizar las diferentes simulaciones realizadas utilizando diversas fuentes de información en cuanto a forzadores atmosféricos y de oleaje, se observó que los mejores resultados del modelo se obtuvieron utilizando como condición de

frontera de oleaje la información proveniente del WWIIII y complementada con información del satélite JASON-2. En el caso de los forzamientos atmosféricos se encontró que los mejores resultados arrojados por el modelo acontecieron haciendo uso de información obtenida del NCAR y complementada con la suministrada por el aeropuerto de Cartagena.

En relación con la magnitud de las corrientes, tanto en las puntuales como en los transectos, el ARMAE obtenido estuvo en el rango de 0.20 y 0.31, respectivamente, lo que de acuerdo con [21] (Tabla X) indica que se tiene un modelo que se puede calificar como bueno en la reproducción de la magnitud de las corrientes. En el caso de la dirección de las corrientes, los MAE obtenidos en las puntuales y en los transectos se encuentran rondando los 70°, lo que evidencia que tanto las corrientes medidas como modeladas se localizan en un abanico de direcciones no muy amplio; dejando ver, en pocas palabras, que tanto las corrientes medias y modeladas van para la misma dirección. Lo anterior evidencia que el modelo reproduce satisfactoriamente la dirección de las mediciones.

Tabla X. Criterios para evaluación del desempeño del modelo. (Modificado de [21]).

Calificación	Rango ARMAE Hs	Rango ARMAE Velocidad
Excelente	< 0.05	< 0.1
Bueno	0.05 - 0.1	0.1 - 0.3
Razonable/Justo	0.1 - 0.2	0.3 - 0.5
Pobre	0.2 - 0.3	0.5 - 0.7
Malo	> 0.3	> 0.7

Para el caso de la altura significativa del oleaje el ARMAE, obtenido al comparar los datos arrojados por el modelo con los obtenidos del JASON-2, se ubicó en el rango comprendido entre 0.2 y 0.3; mientras que en las mediciones puntuales se obtuvo un valor de 0.08 en el ARMAE para época húmeda y de 0.25 en seca. Para el caso del JASON-2, según [21], el modelo presenta un comportamiento pobre para la descripción del oleaje; cabe mencionar que el error de observación (OE) fue de 3 cm, ya que

éste es el error que se asegura en el manual del satélite presentan sus mediciones [11].

Al analizar el ARMAE obtenido de las mediciones puntuales y siguiendo nuevamente a [21] se encontró que se tiene un modelo de desempeño entre razonable y bueno para reproducir oleaje en zonas cercanas a la costa. En la dirección del oleaje se obtuvo un MAE de 70° para húmeda y de 39° para seca (figuras 10 y 11).

Tomando como referencia el coeficiente de correlación mostrado en la sección de resultados, cuyo valor fue de 0.93, se puede afirmar que se observó un buen ajuste entre los datos medios en campañas y los datos simulados. Esto mostró que el régimen de marea es muy constante en la región, ya que se observó que al imponer como condición de frontera la información proveniente del mareógrafo de Cartagena, se encontraron errores que evidenciaron que el régimen mareal en la región de estudio es homogéneo.

Para la verificación del buen desempeño del modelo se llevó a cabo una caracterización de los patrones de corrientes y de oleaje en la región, de acuerdo con las épocas climáticas presentes en ésta. Encontrándose una variación estacional tanto de las corrientes como en el oleaje, siendo características de la época seca corrientes con dirección predominante hacia el suroeste, acompañadas de un fuerte oleaje proveniente del noroeste (NO), norte (N) y noreste (NE), mientras que para la temporada lluviosa, las corrientes tienden a dirigirse hacia el noreste y el este de la región, con un oleaje de menor intensidad.

AGRADECIMIENTOS

Los autores ofrecen sus más sinceros agradecimientos al Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación (Colciencias), al Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH), a la Dirección General Marítima (Dimar), a la Universidad del Norte (UniNorte) y a la Universidad EAFIT por la financiación del proyecto 'Erosión Costera en la Región de Cartagena (Galerazamba-Bocachica), Costa Caribe Colombiana, Módulo Oceanografía', proyecto de investigación dentro del cual se encuentra inmerso este artículo.

LITERATURA CITADA

- [1] Martínez, J. Ignacio, Y., Yusuke Gómez, A., Delgado, A, Matsuzaki, H., y Rendón, E. Late holocene marine terraces of the cartagena region, southern caribbean: The product of neotectonism or a former high stand in sea-level. *Journal of South American Earth Sciences*, 29(2):214 - 224, 2010.
- [2] CIOH. Cartagena de Indias-Colombia. Central de Pronósticos. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas de Caribe, 1993. Consultado el 16 de Enero de 2014. < [http : //www.cioh.org.co/dev/proserv/datgenerales.htm](http://www.cioh.org.co/dev/proserv/datgenerales.htm) >.
- [3] Molares Babra, R. J. Clasificación e identificación de las componentes de marea del Caribe colombiano. *Bol. Cient. CIOH* 2004 (22):105.
- [4] Correa, I. D. Inventario de Erosión y Acreción Litoral (1793-1990) entre Los Morros y Galerazamba, departamento de Bolívar, Colombia. En: M., Hermelin, ed., Mem. I Seminario Andino de Geología Ambiental-I Conferencia Colombiana de Geología. 1990.
- [5] Molina, A., Pelgrain, A., Suzunaga, J. y Giraldo, L. Comportamiento de la dinámica marina en el sector costero entre Galerazamba y Cartagena. *Bol. Cient. CIOH* 1996 (17):73-78.
- [6] Posada, B. O. y Henao, W. Diagnóstico de la erosión en la zona costera del Caribe colombiano. *Invemar, Serie Publicaciones Especiales No. 13*, Santa Marta, 2008.
- [7] Aguilera Díaz, M., Reina Aranza, Y., Orozco Gallo, A., Yabrudy Vega, J. y Barcos Robles, R. Ensayos sobre Economía Regional: Composición de la Economía de la Región Caribe de Colombia. Banco de la República, 2013 (53).
- [8] Deltares. Delft3D-FLOW. Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. User Manual, Delft, Holanda, 2009a.
- [9] SRTM. Shuttle Radar Topography Mission. NASA Jet Propulsion Laboratory, 2014. [Http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/](http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/) , Consultado el 20 de marzo de 2014.
- [10] UHSLC. University of Hawaii Sea Level Center, 2014. [Http://uhslc.soest.hawaii.edu/data/faq](http://uhslc.soest.hawaii.edu/data/faq) , Consultado el 20 de marzo de 2014.
- [11] JASON. Ocean Surface Topography Mission. OSTM/Jason-2 Products Handbook. Centre National d'Études Spatiales (CNES) and the United States National Aeronautics and Space Administration (NASA), 2011. <<http://www.aviso.oceanobs.com/fileadmin/documents/data/tools/hdbkj2.pdf>>.

- [12] Tolman, H.L. User manual and system documentation of WaveWatch-III versión 1.5. NOAA/NWS/NCEP/OMB, 1997.
- [13] Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K.C., Ropelewski, C., Wang, J., Leetmaa, A., Reynolds, R., Jenne, R. y Joseph, D. The NCEP/NCAR 40 - Year Reanalysis Project. Bulletin of the American Meteorological Society, 1996.
- [14] Leendertse, J. J. Aspects of a Computational Model for Long-Period Water-Wave Propagation. RM-5294-PR. Rand Corporation, Santa Monica, CA, USA, 1967. Ph.D thesis.
- [15] Leendertse, J. J., Alexander, R. C. y Liu, S. A three-dimensional model for estuaries and coastal seas. Volume I: Principles of Computations. R-1417-OWRR. Rand Corporation, Santa Monica, CA, USA, 1973.
- [16] Leendertse, J. J. y Gritton, E. C. A water quality simulation model for well mixed estuaries and coastal seas: Vol. II, Computation Procedures. Tech.Rep. R-708-NYC. Rand Corporation, 1971. New York City, NY, USA.
- [17] Stelling, G. S. On the construction of computational methods for shallow water flow problems. Government Pub. Office, 1984.
- [18] Ruiz Sarrazola, D. A. Modelo de Simulación Numérica para Hidrodinámica en el Caribe. Tesis de Maestría, Departamento de Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia, 2015.
- [19] Escobar, C. A. Análisis de sensibilidad espacial de un modelo hidrodinámico del embalse Punchiná (Antioquia). Revista EIA, 1(14):97-113, 2010.
- [20] Sutherland, J., Walstra, D. J. R., Chesher, T. J., Rijnvan, L. C., y Southgate, H. N. Evaluation of coastal area modelling systems at an estuary mouth. Coastal Engineering, 51(2):119 - 142, 2004. ISSN 0378-3839. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2003.12.003>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378383903001327>.
- [21] Rijnvan, L. C., Walstra, D. J. R., Grasmeyer, B., Sutherland, J., Pan, S., y Sierra, J. P. The predictability of cross-shore bed evolution of sandy beaches at the time scale of storms and seasons using process-based profile models. Coastal Engineering, 47(3):295 - 327, 2003. ISSN 0378-3839. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0378-3839\(02\)00120-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-3839(02)00120-5). URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378383902001205>.