

Forzamientos marinos en fronteras abiertas de modelos costeros de pequeña escala, Cartagena

Marine forcings in open boundaries for small coastal models, Cartagena

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

David Alejandro Ruiz Sarrázola¹, Carlos Alejandro Escobar Sierra², Diego Alejandro Uribe Suárez³

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: druizsar@eafit.edu.co¹, carloses@eafit.edu.co², duribes@eafit.edu.co³

Ruiz Sarrázola, D. A., Escobar Sierra, C. A. y Uribe Suárez, D. A. (2015). Forzamientos marinos en fronteras abiertas de modelos costeros de pequeña escala, Cartagena. Bol. Cient. CIOH, 33: 53-68.

RESUMEN

Se presenta un grupo de metodologías para determinar las condiciones de frontera en modelos costeros de pequeña escala espacial ubicados en el mar Caribe. Frecuentemente, la escasez de estaciones de medición oceanográficas en el Caribe conlleva al uso de varias fuentes de información alternas, tales como: modelos globales (*Tide Model Driver*, *XTide*, *WaveWatch III*, etc.) y sensores remotos (*Jason*, *Imágenes satelitales* y *LiDAR*), para determinar las características de las mareas (astronómicas), el oleaje y la morfología de la costa. Sin embargo, debido a que la marea astronómica puede presentar discrepancias significativas respecto a los niveles reales del mar, los modelos operacionales de oleaje global típicamente excluyen procesos de aguas someras y la interacción entre corrientes y mareas, la resolución temporal de sensores remotos es bastante gruesa, se decidió construir un modelo matemático de la dinámica marina del mar Caribe que permita superar estos inconvenientes. Las diferentes metodologías fueron comparadas contra mediciones en la región de Cartagena. Mediante las comparaciones se determinó que el modelo tiene una buena precisión, la cual es mejor o igual que las alternativas contra las que fue comparado (oleaje – WWIII, errores del 16 % modelo WWIII y 17 % modelo presentado; mareas – TMD, errores del 57 % para el TMD y 37 % para el modelo presentado, corrientes, errores del 17 % para el modelo presentado) y brinda información más completa al incluir las variables de mareas, oleaje, corrientes, temperatura y salinidad con una buena resolución temporal y espacial.

PALABRAS CLAVES: Caribe, Cartagena, modelos numéricos, condiciones de frontera, hidrodinámica.

ABSTRACT

A group of methodologies for determining boundary conditions for small coastal models are presented. The lack of oceanographic stations in the Caribbean Sea leads to the use of different sources to determine these forcing, such as: global models for astronomic tides and directional swell (*Tide Model Driver*, *XTide*, *WaveWatch III*, etc.) and remote sensors (*Jason*). Due to the astronomic tides can present significant differences with measured tide levels, the directional swell models don't consider shallow water processes and current – wave interaction and the coarse temporal resolution of remote sensors; a new model for the hydrodynamics of the Caribbean was developed. The different methodologies were compared against measurements in the Cartagena region. Through this was determined that the model has a good accuracy, which is equal or better than the other methodologies (swell – WWIII, errors of 16% WWIII and 17% presented model; tides – TMD, errors of 57 % for TMD and 37% for presented model; currents, errors of 17% presented model) and provides more complete information because it includes tides, waves, currents, temperature and salinity with a good temporal and spatial resolution.

KEYWORDS: Caribbean, Cartagena, numerical models, boundary conditions, hydrodynamic.

INTRODUCCIÓN

El uso de modelos numéricos para simulación hidrodinámica constituye una alternativa cada vez más usada en el estudio y manejo de las zonas costeras; ya que éstas y las actividades económicas que se realizan a su alrededor como el transporte marítimo, la pesca, la construcción y funcionamiento de infraestructura para explotación de recursos son actividades muy susceptibles a las variaciones de las condiciones oceanográficas (oleaje, mareas y corrientes) y a fenómenos como la erosión costera [1-2].

Las condiciones de frontera abiertas, las cuales representan la influencia de la hidrodinámica marina que rodea el dominio de estudio, tienen un efecto crítico sobre el desempeño de los modelos, ya que la calidad de los resultados al interior del dominio depende en gran medida de la calidad de la información usada en la frontera [3-4]. Para el caso de la costa Caribe de Colombia, la falta de estaciones de medición y las dificultades de acceso a la información de las pocas estaciones existentes ha conllevado al uso de modelos numéricos de gran escala como alternativa para generar información que pueda ser usada como condiciones de frontera [4-6].

Entre los modelos existentes cuyos resultados se encuentran disponibles para uso público se mencionan el TMD [7] y el XTide, los cuales proveen información del comportamiento de las mareas astronómicas; adicionalmente, el modelo de oleaje de tercera generación Wave Watch III [8] que proporciona información de oleaje direccional, y finalmente, el modelo de

reanálisis Oscar [9], que permite estimar las corrientes superficiales del océano.

Con el fin de complementar y mejorar la información suministrada por los modelos indicados previamente, se construye un modelo hidrodinámico 3D del mar Caribe. Este modelo permite mejorar la resolución espacio-temporal de los modelos existentes e incluye otros procesos, tales como: (i) forzamientos debidos a gradientes de temperatura y salinidad; (ii) forzamientos atmosféricos, e (iii) interacción completa entre el flujo (mareas y corrientes) y el oleaje; a través de los cuales se espera mejorar la reproducción de la dinámica marina del Caribe.

En el presente trabajo se presenta la construcción de dicho modelo, su aplicación a un modelo de menor escala para la región de Cartagena –Colombia- y se comparan los resultados de éste con las otras alternativas disponibles.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio corresponde a la zona sur del mar Caribe (hasta la latitud 18.5° Norte), la cual se muestra en la Figura 1. El mar Caribe se encuentra conformado por cuencas oceánicas separadas entre sí por cadenas montañosas, siendo las dos de mayor tamaño la cuenca de Venezuela, con una profundidad media de 5000 m, y la de Colombia, con 3000 m; además cuenta con la presencia de varias cadenas de islas como las Antillas, por lo que posee batimetría poco uniforme.

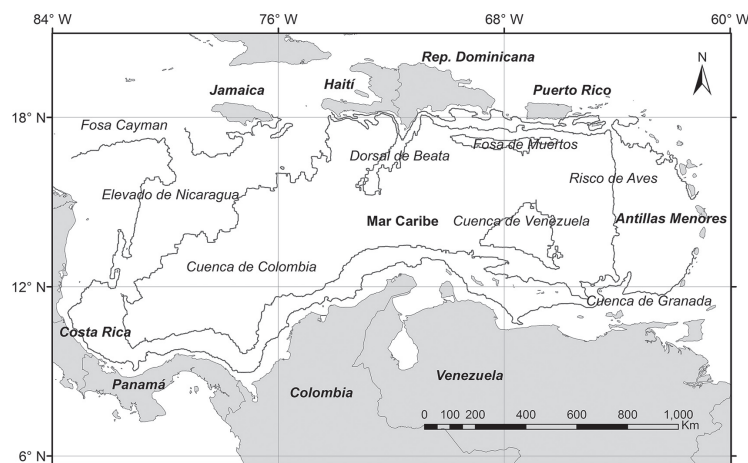


Figura 1. Área de estudio.

Debido a su posición geográfica presenta un clima tropical, el cual se encuentra afectado por el desplazamiento de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), lo que genera dos estaciones climáticas características: época húmeda y época seca, con vientos predominantes del NE [10], adicionalmente presenta una temporada de huracanes entre los meses de junio y diciembre.

A nivel oceanográfico el mar Caribe presenta un rango de mareas que se puede caracterizar como micromareal [11]; su circulación superficial se caracteriza por dos corrientes principales, la corriente del Caribe, la cual entra por las Antillas Menores, pasa por las cuencas de Venezuela y Colombia y sale por la fosa Caimán hacia el Golfo de México; y el giro de Panamá-Colombia, que es un giro anticiclónico que se presenta en las cercanías de la costas de Panamá y Colombia [12]. El mar Caribe cuenta con aguas altamente estratificadas en los primeros 1200 m, pasando a una estratificación débil hasta los 2000 m y aguas homogéneas a partir de los 2000 m [13].

METODOLOGÍA

El modelo hidrodinámico del mar Caribe se desarrolla inicialmente a través de una fase de sensibilidad por medio de la cual se determinan un grupo de parámetros numéricos relacionados con la discretización espacio-temporal del modelo. La fase de calibración del modelo se desarrolla en la época seca de 2010, donde se

contó con información simultánea de estaciones de medición de oleaje, marea, temperatura y salinidad ampliamente distribuidos en el área de estudio (Fig. 2).

El adecuado desempeño del modelo se valida a través de dos metodologías (directa e indirecta). La validación directa se llevó a cabo por medio de la comparación del oleaje y la marea calculados (directamente por el modelo) y observados (en estaciones o misiones satelitales), tanto en la época seca como la húmeda. La validación indirecta se dio a través de los resultados de un modelo de menor escala espacial ubicado en la región de Cartagena, cuyos forzamientos marinos fueron obtenidos del modelo del mar Caribe.

Finalmente, con el fin de cuantificar las bondades del modelo respecto a otras metodologías (modelos globales), se procedió a determinar el ajuste de las diferentes metodologías existentes con respecto a las observaciones oceanográficas disponibles.

Formulación matemática

El modelo fue implementado utilizando la plataforma DELFT3D [14, 15], la cual resuelve las ecuaciones de Navier Stokes, bajo los supuestos de aguas profundas y de Boussinesq, en un sistema coordenado tipo σ para la discretización vertical, el cual se muestra en la ecuación 1.

$$\sigma = \frac{z - \zeta}{d + \zeta} = \frac{z - \zeta}{H} \quad (1)$$

Donde,

z es la coordenada vertical en el espacio físico.

ζ es la altura de la superficie libre con respecto al plano de referencia.

d es la profundidad por debajo del plano de referencia.

H es la profundidad del agua.

La ecuación de continuidad se deriva mediante la integración de la ecuación de continuidad para

fluidos incompresibles sobre la profundidad total, ésta se muestra en la ecuación 2.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{\sigma_{\xi\xi}} \sqrt{\sigma_{\eta\eta}}} \frac{\partial((d + \zeta)U) \sqrt{\sigma_{\eta\eta}}}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{\sigma_{\xi\xi}} \sqrt{\sigma_{\eta\eta}}} \frac{\partial((d + \zeta)V) \sqrt{\sigma_{\xi\xi}}}{\partial \eta} = (d + \zeta)Q \quad (2)$$

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 de momento en la dirección ξ se muestra en la ecuación 3, la ecuación en la dirección η se omite ya que es análoga a ésta.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{\sigma_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{\sigma_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{w}{d+\zeta} \frac{\partial u}{\partial \sigma} - \frac{v^2}{\sqrt{\sigma_{\xi\xi}} \sqrt{\sigma_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{\sigma_{\eta\eta}}}{\partial \xi} + \frac{uv}{\sqrt{\sigma_{\xi\xi}} \sqrt{\sigma_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{\sigma_{\xi\xi}}}{\partial \eta} - fv \\ & = -\frac{1}{\rho_0 \sqrt{\sigma_{\xi\xi}}} P_\xi + F_\xi + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(v_v \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + M_\xi \end{aligned} \quad (3)$$

Donde,

v_v es el coeficiente de viscosidad de remolino vertical; los gradientes de densidad se desprecian excepto en los términos de presión baroclínicos.

P_ξ representa el gradiente de presión.

F_ξ representa el desbalance de los esfuerzos horizontales de Reynolds.

M_ξ representa las contribuciones de fuentes externas.

La ecuación de transporte se presenta en la ecuación 4:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial (d+\zeta)c}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{\sigma_{\xi\xi}} \sqrt{\sigma_{\eta\eta}}} + \left\{ \frac{\partial [\sqrt{\sigma_{\eta\eta}} (d+\zeta)uc]}{\partial \xi} + \frac{\partial [\sqrt{\sigma_{\xi\xi}} (d+\zeta)vc]}{\partial \eta} \right\} + \frac{\partial wc}{\partial \sigma} = \\ & \frac{(d+\zeta)}{\sqrt{\sigma_{\xi\xi}} \sqrt{\sigma_{\eta\eta}}} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left(D_H \frac{\sqrt{\sigma_{\eta\eta}}}{\sqrt{\sigma_{\xi\xi}}} \frac{\partial c}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(D_H \frac{\sqrt{\sigma_{\xi\xi}}}{\sqrt{\sigma_{\eta\eta}}} \frac{\partial c}{\partial \eta} \right) \right\} + \frac{1}{d+\zeta} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(D_v \frac{\partial c}{\partial \sigma} \right) - \lambda_d (d+\zeta)c + S \end{aligned} \quad (4)$$

Donde,

D_H es el coeficiente de difusividad horizontal.

D_v es el coeficiente de difusividad vertical.

λ_d representa los procesos de degradación de primer orden.

S Representa los términos de entrada y salida por unidad área debido a las descargas y/o el intercambio de calor en la superficie.

La densidad del agua está determinada por la ecuación de estado definida por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (Unesco, por su acrónimo en inglés) [16].

El modelo resuelve el oleaje utilizando el módulo SWAN, en el cual la evolución del espectro de acción está descrito por la ecuación de balance de acción espectral, la cual se muestra para coordenadas cartesianas en la ecuación 5.

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} c_x N + \frac{\partial}{\partial y} c_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma} c_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} c_\theta N = \frac{S}{\sigma} \quad (5)$$

Donde, 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 de densidad de energía que representa los efectos de la generación, disipación e interacciones no lineales. El modelo promedia las ecuaciones de continuidad y de momentum sobre el periodo de la ola, tal como se indica en la ecuación de momentum que se presenta a continuación.

$$\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} + \dots + g \frac{\partial \bar{\zeta}_j}{\partial x_j} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_i} = F_j \quad (6)$$

Donde,

Para i y j la regla de la sumatoria aplica, las cantidades promedio se indican mediante la barra horizontal.

\bar{u}_j es la velocidad promedio de la ola.

$\bar{\zeta}_j$ es la elevación promedio de la superficie libre de la ola.

$\bar{\tau}_{ij}$ son los componentes promedio del tensor de esfuerzos normal de la ola.

F_j es la fuerza inducida por la ola que queda luego de promediar la ecuación de momentum.

Esta fuerza normalmente puede ser escrita como el gradiente del tensor de esfuerzo–radiación S , ecuación 7.

$$F_i = \frac{\partial S_{ij}}{\partial x_j} \quad (7)$$

Usando métodos de propagación de oleaje, S puede expresarse en términos de los parámetros de la ola. Sin embargo, este procedimiento sólo es aplicable cuando el movimiento promedio es uniforme con la profundidad, por lo que para la mayoría de los casos es necesario separar el movimiento medio y oscilatorio mediante el promedio lagrangiano generalizado (GML) [17].

Por último, el intercambio de calor en la superficie libre es modelado tomando en cuenta

por separado los efectos de la radiación solar y atmosférica, y las pérdidas de calor debidas a evaporación y convección. En esta investigación se utilizó la formulación denominada *Ocean Heat Flux Model* [18].

El sistema de ecuaciones resultante se resuelve para una malla curvilínea, estructurada mediante un esquema de diferencias finitas que usa el método de integración ADI, descrito por Leendertse en 1967 [19].

Descripción del modelo

El dominio del modelo está constituido por una malla curvilínea, integrada por 110000 elementos. El tamaño de los elementos de la malla varía entre los 2000 y los 10000 m, presentando una mayor resolución en zonas costeras con aguas poco profundas. En la vertical el modelo se encuentra delimitado por la batimetría de la zona, la cual se obtuvo del atlas GEBCO [20]. La discretización de la malla en la dirección vertical se da a través de doce capas de espesor variable, que oscilan entre el 1 % (en la superficie) y el 15 % (en el fondo) de la profundidad total.

El modelo se encuentra delimitado por varios tipos de condiciones de frontera, las cuales corresponden a: (i) forzamientos marinos, se determinan con la marea astronómica obtenida del *Global Inverse Tidal Model* y las fuerzas resultantes de la interacción gravitacional actuando sobre el mar. El efecto del *swell* se excluye inicialmente en el cálculo de oleaje, debido a que su efecto en aguas someras alejadas de la frontera no resultó significativo; (ii) gradientes termo-halinos, se incluyen en el modelo a través de los valores medios de perfiles de temperatura y salinidad obtenidos

en el proyecto ARGO [21]; (iii) forzamientos atmosféricos, se determinan a través de proyectos de *reanalysis*, tal como el CCMP [22] de donde se obtuvo la velocidad del viento y el NCAR [23, 24] del cual se determina el porcentaje de cobertura de las nubes en la zona, la humedad relativa y la temperatura del aire a 10 m de altura, y (iv) forzamientos fluviales, las descargas de los principales afluentes que desembocan en el Caribe se obtuvieron de la base datos de GRDC (2001) [25] y el trabajo de Roldán [26].

Sensibilidad y calibración

Se realizó un análisis de sensibilidad de los principales parámetros numéricos del modelo (Tabla I). En este análisis se realizó una simulación patrón con el valor más refinado de los parámetros considerados (resaltados en la Tabla I). Luego se ejecutaron simulaciones similares al patrón, donde se modificó el valor de los parámetros numéricos, de uno en uno a la vez. Los resultados de estas simulaciones se compararon con los de la simulación patrón en cada una de las celdas del modelo, lo cual permitió determinar localmente el efecto de los parámetros considerados en las variables oceanográficas de interés.

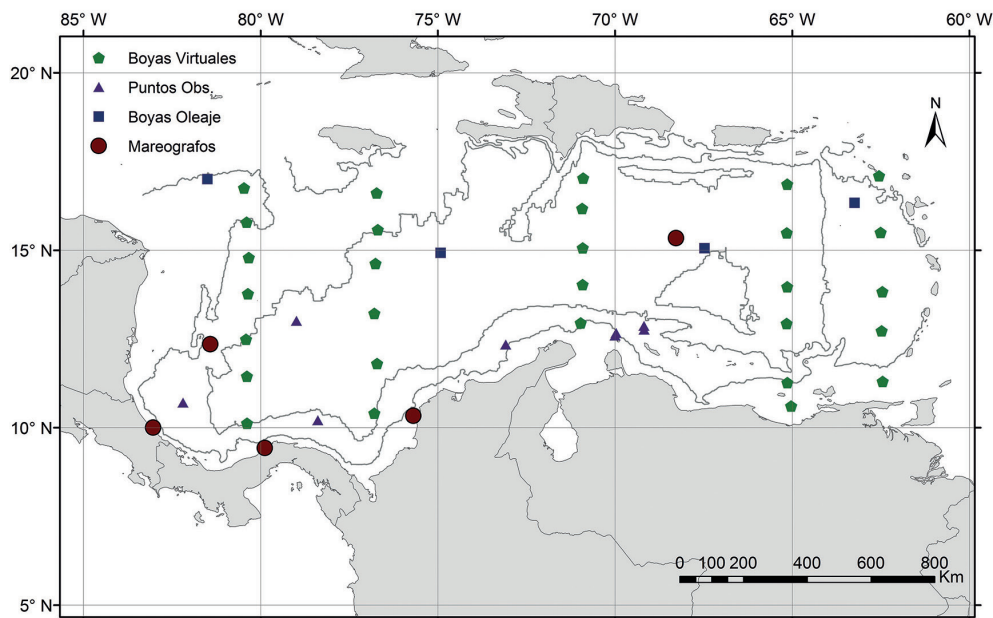


Figura 2. Estaciones de medición ubicadas en el área del modelo, usadas como referencia para el proceso de calibración.

La calibración del modelo permitió mejorar el ajuste entre los datos modelados y los medidos durante un periodo de tres meses en la época seca de 2010. En la Tabla II se presenta el rango de valores considerados y los seleccionados para cada uno de los parámetros físicos (valores resaltados). Las mediciones de marea, oleaje y perfiles de

temperatura y salinidad con respecto a las cuales se compararon los resultados del modelo se obtuvieron respectivamente del UHSLC (<http://uhslc.soest.hawaii.edu/data/faq>), la NDBC (<http://www.ndbc.noaa.gov/>), el NODC (<http://www.nodc.noaa.gov/>) y el trabajo de [12]. La Figura 2 muestra la ubicación de las estaciones de medición.

Tabla I. Parámetros considerados en el análisis de sensibilidad del modelo.

Parámetro	Valores
Número de celdas malla	110000 - 40000
Interacción oleaje-corrientes	Sí - No
Intervalo tiempo hidrodinámica	3 min - 5 min - 10 min
Intervalo tiempo oleaje	180 min - 360 min

Tabla II. Parámetros considerados en la calibración del modelo.

Parámetro	Valores
Coefficiente de rugosidad de Mannig [-]	0.028 - 0.025 - 0.021 - 0.015
Viscosidad de remolino horizontal [m ² /s]	300 - 500 - 700 - 1000
Viscosidad de remolino vertical [m ² /s]	0.000 - 0.001 - 0.01 - 0.1
Difusividad de remolino horizontal [m ² /s]	1 - 10 - 50 - 100
Difusividad de remolino vertical [m ² /s]	0.001 - 0.005 - 0.01 - 0.1
Escala de ozmidov [-]	0.00 - 0.01 - 0.10 - 0.05
Coefficiente Dragado Viento [-] (0 m)	0.001176 - 0.001752 - 0.002352 - 0.003
Profundidad de Secchi [m]	0 - 1 - 5 - 10
Número de Dalton para evaporación [m]	0.001 - 0.0013 - 0.005 - 0.01
Número de Dalton para convección [m]	0.001 - 0.0013 - 0.005 - 0.01

Anidamiento

En la región de Cartagena se aplicó el modelo del Caribe con el propósito de determinar sus forzamientos marinos. Estos forzamientos alimentaron un modelo local de pequeña cobertura espacial y alta resolución conformado por una malla de 35000 celdas, cuyos tamaños oscilaron entre 100 y 300 m. La información batimétrica para la malla de detalle se obtuvo a partir de las cartas náuticas 408 y 409 editadas por el Centro de Investigaciones Oceanográficas

e Hidrográficas del Caribe (CIOH). La Figura 3 muestra las mallas de ambos modelos.

El modelo de Cartagena presenta tres tipos de condiciones que son alimentadas mediante el anidamiento con el modelo general del Caribe, éstas son: (i) frontera de marea, (ii) fronteras de corrientes y (iii) fronteras de oleaje. Los forzamientos meteorológicos para este modelo se obtuvieron del modelo NCAR. La distribución de estas fronteras se muestra en la Figura 4.

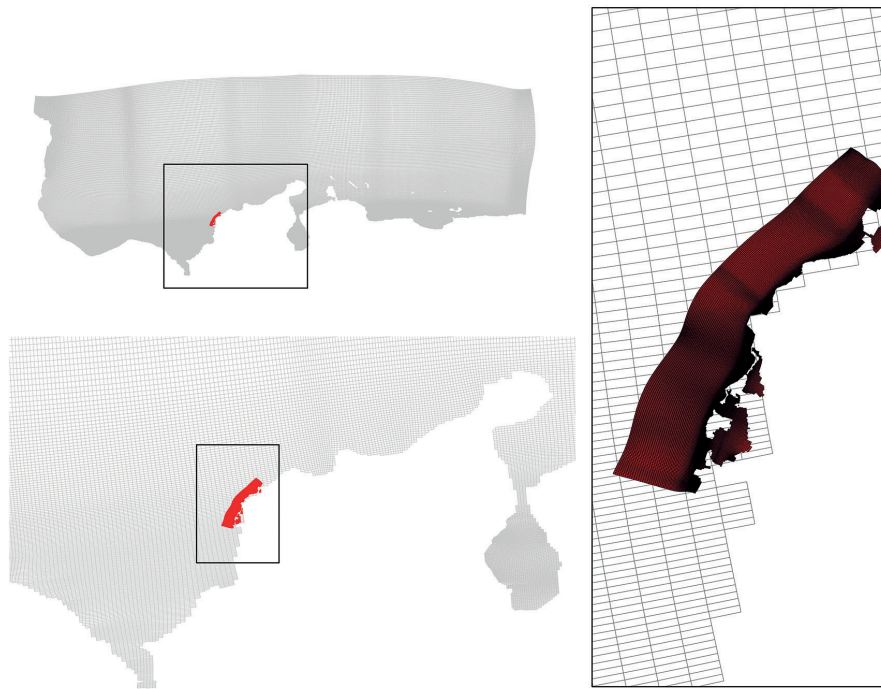


Figura 3. Malla del modelo general del Caribe y anidamiento entre el modelo general del Caribe y el modelo local de la región de Cartagena.

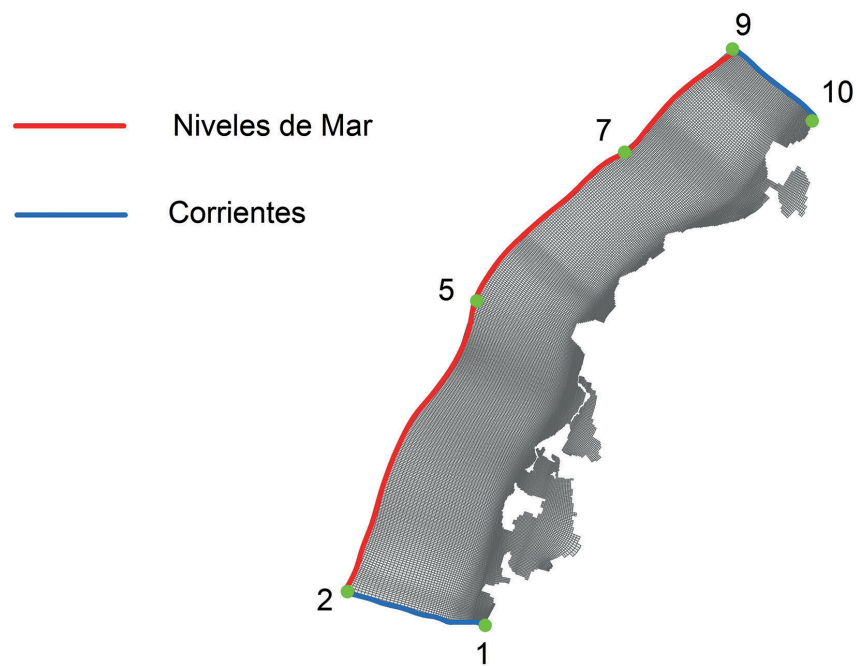


Figura 4. Tipo de condiciones de frontera generadas para el modelo anidado de Cartagena.

Validación y comparación con otros modelos

Los resultados del modelo se compararon con mediciones y con los resultados de otros modelos disponibles. Las comparaciones se

realizaron mediante el cálculo de los estadísticos *Mean Absolute Error* (MAE, por sus siglas en inglés), *Relative Mean Absolute Error* (RMAE, por sus siglas en inglés) y *Adjusted Relative Mean Absolute Error* (ARMAE, por sus siglas en inglés):

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |p_i - t_i| \quad (8)$$

$$RMAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|p_i - t_i|}{|t_i|} \quad (9)$$

$$ARMAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|p_i - t_i| - OE}{|\langle t_i \rangle|} \quad (10)$$

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.

Los resultados del modelo global se compararon con estaciones de medición ubicadas en la costa de Colombia, se realizaron las siguientes comparaciones: comparación de los resultados de marea del modelo y del modelo TMD con los datos medidos por el mareógrafo ubicado en la bahía de Cartagena, durante el periodo entre el 5 de enero y el 28 de febrero de 2011; los resultados de oleaje del modelo se compararon con mediciones realizadas por la misión satelital JASON en la región de Cartagena, para el periodo entre el primero de agosto y el 18 de noviembre de 2012 y con los datos medidos por la boya de oleaje ubicada en Barranquilla, para el periodo entre el primero de diciembre de 2008 y el primero de abril de 2009.

Adicionalmente, se compararon los resultados del modelo de menor escala Cartagena, con mediciones de corrientes y oleaje

en estaciones ubicadas a 10 m de profundidad; se realizaron las siguientes comparaciones: comparación entre las corrientes del modelo de Cartagena alimentado con datos del modelo del Caribe y datos medidos para el período entre el 16 y el 23 de noviembre de 2012. Para esta comparación se analizaron dos casos, alimentar el modelo de Cartagena con datos provenientes de simulaciones del modelo de Caribe, configuradas incluyendo procesos de transporte y sin incluir los procesos de transporte; comparación de los datos de oleaje del modelo de Cartagena y datos medidos para el período entre el 16 y el 23 de noviembre de 2012, se realizaron dos comparaciones, alimentar el modelo del Caribe con datos de oleaje del modelo del Caribe y con datos de oleaje del modelo WWIII. La Figura 5 muestra la ubicación de los puntos de medición, mencionados en esta sección.

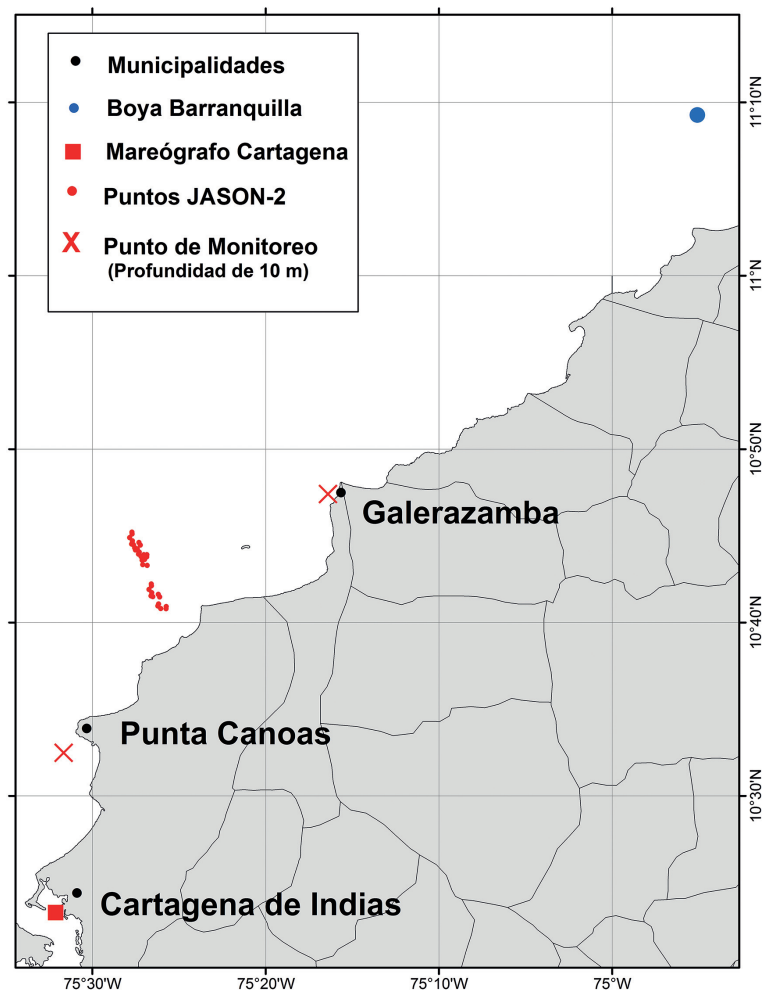


Figura 5. Ubicación de estaciones de medición usadas para evaluar la precisión del modelo y su desempeño respecto de otros modelos.

RESULTADOS

Sensibilidad

Los resultados de las comparaciones realizadas entre la simulación patrón y las simulaciones dieron como resultado que el intervalo de tiempo hidrodinámico de 5 min generó variaciones medias de 8.68 % para la marea, 7.62 % para las corrientes y 0.43 % para la altura significativa de ola; lo que indica que el valor correcto para el intervalo de tiempo hidrodinámico corresponde a 3 min, debido a que se presentaron cambios por encima del 5 % (5 % se consideró como variación máxima admisible) en los resultados de mareas y

corrientes del modelo. El intervalo de tiempo de oleaje de 360 min generó variaciones medias de 0.5 % para la marea, 0.89 % para las corrientes y 0.5 % para la altura significativa de ola; lo que indicó que el modelo puede ser ejecutado con un intervalo de tiempo de oleaje de 360 min, reduciendo el tiempo de simulación, sin generar cambios significativos en los resultados.

La disminución del número de elementos de la malla produjo variaciones medias de 19.91 % para la marea, 45.46 % para las corrientes y 5.2 % para el oleaje, indicando que no es posible disminuir el número de elementos de la malla, sin afectar de forma significativa los resultados

del modelo. Por último, no incluir la interacción ola-corriente generó variaciones medias para las corrientes promedio de 10 % y de 50 % para las corrientes en la capa superficial. La Figura 6 muestra las variaciones celda a celda en las corrientes de la capa superficial, para

la simulación patrón que incluye la interacción oleaje-corriente con respecto a la simulación que no incluye este proceso. Se observó que las variaciones son mayores en las zonas alrededor de las Antillas Menores, la costa de Colombia, la dorsal de Beata y el elevado de Nicaragua.

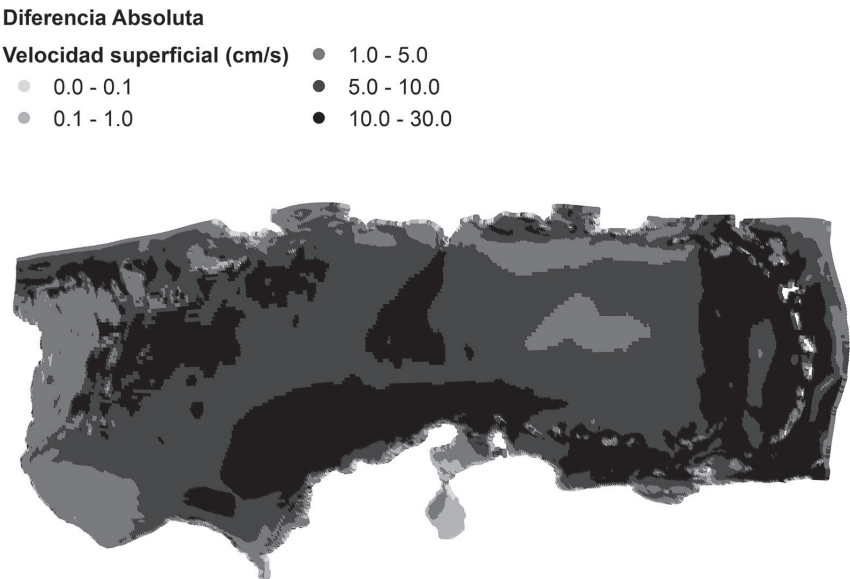


Figura 6. Cambios en las corrientes superficiales debido al efecto del oleaje.

Modelo del Caribe

Los resultados de comparar las mareas del modelo del Caribe y el modelo TMD con el mareógrafo ubicado en Cartagena se presentan en la Tabla III. Se observó que el modelo del Caribe presentó una disminución de 0.018 m en el MAE, calculado con respecto al TMD que

corresponde a una disminución del 20 % en el RMAE. Adicionalmente, la Figura 7 muestra la comparación de la serie de marea modelada con respecto a la serie de marea medida. Se observó que la serie de marea modelada se encuentra en fase con la serie de marea medida y que los errores se presentan en la amplitud de la marea baja modelada.

Tabla III. Comparación del desempeño del modelo con el modelo TMD en la región de Cartagena.

	MAE (m)	RMAE (%)
Modelo	0.033	37.83
TMD	0.051	57.88

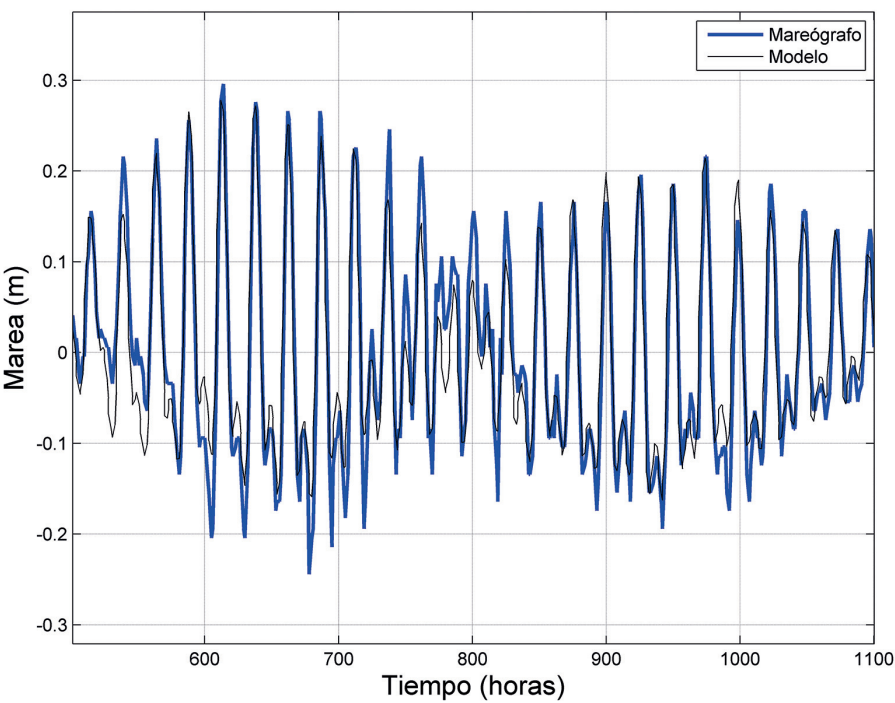


Figura 7. Comparación de la marea del modelo con los datos medidos por el mareógrafo de Cartagena.

Los resultados de comparar los datos de oleaje del modelo con las mediciones de altura significativa de la misión satelital JASON se presentan en la Tabla IV, y los resultados de la comparación con los datos de la boya de

Barranquilla se presentan en la Tabla V. Se observa el modelo presentó un RAME menor al ser comparado con los datos de la boya con respecto a la comparación con las mediciones del JASON.

Tabla IV. Comparación del oleaje del modelo con las mediciones de la misión satelital Jason

	MAE (m)	RMAE (%)	ARMAE (%)
Modelo	0.32	37.57	27.78

Tabla V. Comparación de los resultados del modelo con los datos de la boya de oleaje ubicada en Barranquilla.

dss	Hs	Tp	Dir
RMAE (%)	18.3	24.77	19.43

Modelo de Cartagena

Los resultados de comparar los datos de oleaje del modelo de Cartagena, al ser alimentado con datos provenientes del modelo del Caribe y del modelo WWIII contra los datos medidos, se muestran en la Tabla VI. Los resultados presentaron errores menores al alimentar el modelo de Cartagena con datos del modelo WWIII; sin embargo, la diferencia no es significativa con respecto a los errores obtenidos al alimentar el modelo de Cartagena con datos del modelo del Caribe.

Adicionalmente, la Figura 8 muestra las series de oleaje (altura significativa) modeladas

bajo las dos configuraciones mencionadas y los datos medidos. Se observó que los datos de la configuración del WWIII presentan valores por encima de los datos de la configuración con el modelo del Caribe.

Los resultados de comparar los datos de corrientes del modelo de Cartagena alimentado con datos del modelo del Caribe, configurado para incluir los procesos de transporte y no incluirlos, se presentan en la Tabla VII. Se observó que el modelo de Cartagena alimentado con datos simulados del modelo del Caribe que incluye los procesos de transporte, presentó resultados con un MAE 20 % menor para la dirección y un ARMAE 14 % menor para la velocidad.

Tabla VI. Resultados del modelo de Cartagena al ser alimentado por el modelo del Caribe y por el modelo WWIII comparados contra mediciones

Modelo	Puntos de Monitoreo			JASON		
	MAE	RMAE	ARMAE	MAE	RMAE	ARMAE
WWIII	0.1616	29.07 %	16.08 %	0.27115	32.13 %	28.60 %
CARIBE	0.17638	31.73 %	17.61 %	0.27695	32.82 %	29.01 %

Tabla VII. Resultados del modelo de Cartagena al ser alimentado bajo distintas configuraciones, comparado contra mediciones en la zona para las corrientes promedio.

Modelo	MAE		RMAE	ARMAE
	Velocidad	Dirección (°)	Velocidad	Velocidad
Con procesos de transporte	0.067	71.18	41.32 %	17.89 %
Sin procesos de transporte	0.092	93.29	56.73 %	31.41%

DISCUSIÓN

Entre los resultados obtenidos, la comparación de los datos de oleaje modelados mediante el modelo de Cartagena, alimentado por el modelo del Caribe y el modelo WWIII, mostró que el caso del modelo WWIII presentó errores menores. Una de las posibles causas para este comportamiento es la resolución temporal de los modelos, el modelo del Caribe presenta una resolución temporal de 6 horas y los datos del

modelo WWIII una resolución de 3 horas. Sin embargo, el análisis de sensibilidad mostró que los datos de oleaje del modelo del Caribe no se ven afectados de forma significativa, por la variación en la resolución temporal para el oleaje entre 6 y 3 horas. Adicionalmente, al observar la Figura 8 que presenta las series de oleaje del modelo de Cartagena bajo las dos configuraciones, se evidencia que la diferencia más significativa entre ambas series es la magnitud de la altura significativa.

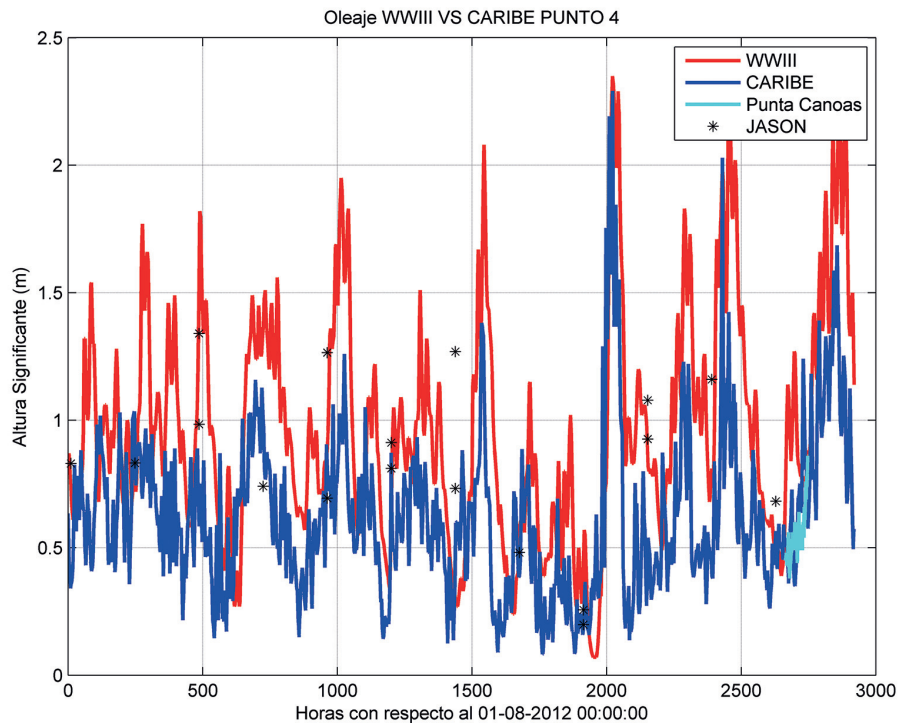


Figura 8. Resultados del modelo de Cartagena al ser alimentado por el modelo del Caribe y por el modelo WWIII comparados contra mediciones.

Los resultados del modelo de Cartagena al ser alimentado por el modelo Caribe se encuentran por debajo de la otras dos series, esto indica que los datos de altura significativa del modelo de Caribe se encuentran por debajo de los datos del modelo WWIII, lo anterior permite inferir que la causa de error está relacionada con la calidad de la información meteorológica usada para alimentar el modelo del Caribe y el modelo de Cartagena, al ser el viento el principal forzador del oleaje.

Al observar las series de oleaje y de mareas se observa que aunque los resultados para la serie de marera presentan un RMAE superior a los datos de marea, las series de marea muestran un mejor ajuste a los datos modelados, esto se encuentra relacionado con la influencia de la meteorología sobre las mareas y el oleaje. El principal forzador del oleaje es el viento, mientras que el principal forzador de las mareas son las interacciones gravitatorias y, considerando que los datos meteorológicos presentan un gran nivel de incertidumbre, su influencia sobre los

resultados puede explicar la diferencia en el ajuste observado.

Los resultados de oleaje del modelo de Cartagena mostraron diferencias significativas, entre el ARMAE calculado para los puntos de observación y el ARMAE calculado para los datos del JASON; esto se encuentra influenciado por la diferencia entre los errores de observación usados para calcular el ARMAE respectivo, 0.1 m para los puntos de observación y 0.33 m para los datos del JASON.

Los resultados al comparar las corrientes del modelo de Cartagena bajo las dos configuraciones descritas, indican que los procesos de transporte representan un factor muy importante en la circulación del Caribe y su inclusión es necesaria para lograr un mejor ajuste entre los datos modelados y los datos medidos.

Los errores calculados para las variables del modelo permiten clasificar los resultados del

modelo, como correctos de acuerdo a los criterios establecidos en [27].

Es posible mejorar los resultados obtenidos del modelo si se aumenta la resolución de la malla a 110 000 elementos y la resolución vertical; ambos valores corresponden al límite de acuerdo a la capacidad computacional disponible.

CONCLUSIONES

El trabajo presentado, al ser de índole metodológico, tiene una amplia aplicabilidad, ya que no se encuentra limitado a la plataforma específica en la que fue implementado (DELFT3D), sino que puede ser implementado en plataformas similares como la plataforma ROMS, desarrollada por ACTIMAR, y la plataforma ELCOM, desarrollada por HydroNumerics entre otras.

De igual manera, su construcción puede ser replicada ya que fue construido utilizando información de acceso público como: datos de mareas astronómicas, perfiles promedio de temperatura y salinidad obtenidos a partir de datos de perfiles de acceso público y modelos de reanálisis meteorológico también de acceso público. Adicionalmente, la información utilizada no se encuentra limitada temporalmente, lo que permite que sea aplicado para diferentes períodos.

El modelo presentado resulta una alternativa útil al problema de falta de información, al entregar información de las principales variables que constituyen la hidrodinámica del Caribe: mareas, corrientes, oleaje, temperatura, salinidad y las variables derivadas de éstas como caudales.

Los resultados del análisis de sensibilidad mostraron que el proceso de interacción entre el oleaje y las corrientes, tiene una influencia significativa en la modelación de las corrientes.

Por otra parte, de acuerdo a los resultados de corrientes del modelo de Cartagena al ser alimentado bajo las dos configuraciones descritas, se evidenció que incluir los procesos de transporte mejoró de forma significativa el ajuste entre los datos modelados y los datos medidos.

De igual manera, es importante resaltar que la utilidad del modelo no se encuentra limitada al estudio de la región de Cartagena, sino que

cubre la totalidad de la costa Caribe colombiana, la cual presenta en distintas zonas problemáticas similares a las que se dan en la región de Cartagena.

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] Bárcena, A., Prado, A., Samaniego, J. L. y Pérez, R. Efectos del cambio climático en la costa de América Latina y el Caribe. Dinámicas, tendencias y variabilidad climática. Comisión Económica para América Latina y el Caribe, Naciones Unidas, 2013.
- [2] González, A. I., Puentes, V., Jiménez, G., Rojas, P. y otros. Programa nacional de investigación para la prevención, mitigación y control de la erosión costera en Colombia. Informe técnico final, Invemar, Santa Marta D. T. C. H, Colombia, 2009.
- [3] Mayerle, R., Wilkens, J., Escobar, C. y Windupranata, W. Hydrodynamic Forcing Along the Opne Sea Boundaries of Small – Scale Coastal Models. PROMORPH, 69, 2005.
- [4] Palacio, C., García, F. y García, U. Calibración de un modelo hidrodinámico 2D para la bahía de Cartagena. Dyna, 164, 2010.
- [5] Velásquez Montoya, L. Modelación del transporte de sedimentos en el golfo de Urabá, Colombia. Tesis de Maestría, Universidad EAFIT, 2013.
- [6] Uribe Suárez, D. A. Modelación de la hidrodinámica marina en la región de Cartagena con aplicaciones al transporte de sedimentos. Tesis de maestría, Universidad EAFIT, 2015.

- [7] Padman, L. y Erofeeva, S. Tide Model Driver (TMD) Manual. Earth and Space Research, 2005.
- [8] Tolman, H. L. User manual and system documentation of WAVEWATCH -III version 1.5. NOAA/NWS/NCEP/OMB, 1997.
- [9] OSCAR. OSCAR third degree resolution ocean surface currents. 2014. http://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/OSCAR_L4_OC_third-deg/, Consultada el 20 de marzo de 2015.
- [10] Thomas, Y., Nicole-Lerma, A y Posada, B. O. Atlas Climatológico del Mar Caribe Colombiano. Instituto de investigaciones Marítimas y Costeras José Benito Vives de Andréis, 2012.
- [11] Molares, R. Clasificación e identificación de los componentes de marea del Caribe colombiano. Bol. Cient. CIOH, (22):105-114, 2004.
- [12] Richardson, P. L. Caribbean current and eddies as observed by Surface drifters. Deep Sea Research, 52:429 - 463, 2005.
- [13] Day, Trevor. Oceans, Facts on File, 2005.
- [14] Deltares. Delft3D - Flow user Manual. Deltares, 2013a.
- [15] Deltares. Delft3D - Wave user Manual. Deltares, 2013b.
- [16] UNESCO, 1981. Background papers and supporting data on the international equation of state 1980. Tech. Rep. 38, UNESCO. 198, 324.
- [17] Andrews, D. G. y McIntyre, M. E. An exact theory of nonlinear waves on a Lagrangian-mean flow. Journal of Fluid Mechanics 89 (4): 609-646, 1978.
- [18] Lane, A., 1989. The heat balance of the North Sea. Tech. Rep. 8, Proudman Oceanographic Laboratory. 243, 254.
- [19] Leendertse, J. J. Aspects of computational model for long-period water-wave propagation. Rand Corporation, Santa Monica, PHD Thesis, 1967.
- [20] GEBCO. General bathymetric chart of the ocean. 2014. URL: <http://www.gebco.net/>, Consultada el 20 de marzo de 2014.
- [21] ARGO. Argo project. 2014. [Http://www.argo.net/](http://www.argo.net/), Consultada el 20 de marzo de 2014.
- [22] CCMP. Cross calibrated multi platform ocean surface wind vector I3.0 first look analyses. 2014. [Http://podaac.jpl.nasa.gov/](http://podaac.jpl.nasa.gov/), Consultada el 20 de marzo de 2014.
- [23] 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 Metereological Society, 1996.
- [24] Kistler, R., Kalnay, E., Collins, W., Saha, S., White, G., Wolleen, J., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Kanamitsu, M., Kousky, V., Dool, H., Jenne, R. y Fiorino, M. The ncep-ncar 50-year reanalysis: Monthly means cd-rom and documentation. American Meteorologica Society, 82:247-268, 2001.
- [25] Global Runoff Data Center. Monthly discharge data for the world rivers. Research data archive at the national center for Atmospheric research, 2001.
- [26] Roldán, P. A. Modelamiento del patrón de circulación de la bahía Colombia, Golfo de Urabá, 2008.
- [27] Rijnvan, L. C., Walstra, D. J. R., Grasmeijer, 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.