

Calibración y validación de un modelo 3D para el área costera de Santa Marta (Colombia)

Calibration and validation a 3D in the Santa Marta coastal area (Colombia)

Francisco Fernando García^{1}, Gustavo Chang¹, Carlos Alberto Palacio²*

¹Grupo de Control de la Contaminación Ambiental. Universidad del Magdalena. Carrera 32 No 22 – 08. A.A. 2-1-21630. Santa Marta, Colombia.

²Grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental. Universidad de Antioquia. Cra 53 N.º 61- 30. Medellín, Colombia.

(Recibido el 16 de mayo de 2011. Aceptado el 17 de febrero de 2012)

Resumen

Se presenta el proceso de calibración y validación de un modelo hidrodinámico para simular las mareas, corrientes y condiciones de salinidad y temperatura en el área costera de la bahía de Santa Marta. Se desarrolla una metodología que incluye la implementación numérica del modelo y el desarrollo de mediciones de campo que se comparan con las simulaciones. Se estima el error entre las mediciones y las simulaciones para determinar cuantitativamente la confiabilidad del modelo.

----- *Palabras clave:* Modelo 3D; modelación numérica, calibración, validación, hidrodinámico

Abstract

This paper presents the calibration and validation of a hydrodynamic model to simulate the tides, currents and salinity and temperature conditions in the coastal area of Santa Marta Bay. The methodology used includes the numeric implementation of the model, the development of field measurements, and measurements data compared with simulations data. The error between measurements and simulations data was estimated to determine the quantitative reliability of the model.

----- *Keywords:* 3D model, numerical modeling, calibration, validation, hydrodynamic

* Autor de correspondencia: teléfono: 057 + 5 + 421 79 40, 430 12 92, correo electrónico: fcofdogarcia@yahoo.com (F. García)

Introducción

Los patrones de circulación y corrientes del Mar Caribe, incluyendo la Cuenca Colombia, han sido bien estudiados y documentados por diferentes autores para el periodo 1960 – 2000 [1-4]. Sin embargo, a escala local, como es el caso del Área Costera de Santa Marta (ACSM) - Bahías de Santa Marta y Taganga (BSMyT) - las condiciones hidrodinámicas de los últimos 50 años son desconocidas, debido principalmente a la falta de equipos de medición y modelos numéricos. En este artículo se presenta el proceso de calibración y validación de un modelo hidrodinámico 3D para simular la circulación de esta zona costera, donde se ha reportado la ocurrencia de un fenómeno de surgencia durante la época seca y de estratificación de la columna de agua en época de lluvias [5]. Para representar las condiciones de las masas de agua en cualquier época del año, el modelo se debe calibrar y validar para ambos periodos, seco y de lluvias.

Experimentación

Área de estudio

El ACSM se encuentra localizado entre los 11,21 y 11,31 de latitud Norte y -74,18 y -74,24 de longitud Oeste, dentro de la Cuenca Colombia (Mar Caribe). La ubicación de la misma se puede apreciar en la figura 1. Su conformación es abierta, con una línea costera limitada al Norte y al Sur por formaciones rocosas, predominando las playas arenosas en su parte central. En esta área la topografía de la costa es heterogénea debido a las estribaciones de la Sierra Nevada de Santa Marta, lo que genera acantilados formados por las Filitas de Taganga, bahías, puntas e islotes, cuyos costados occidentales están más expuestos a la acción de los vientos y el oleaje [6].

El régimen climático está caracterizado por una época seca (diciembre-abril) en la cual la presencia de los vientos Alisios del Nororiente producen una surgencia local, por lo cual desciende la temperatura del agua (20 - 25°C), aumenta la salinidad (hasta 38 UPS) y se eleva

la altura de olas hasta 2,5 metros. En la época de lluvias (mayo-noviembre) no hay surgencia, el agua es más cálida (27°-29°C), disminuye la salinidad hasta 34 UPS [6, 7] y la altura de olas es de 0,30 metros. La ubicación de la estación de medición oceanográfica (11,23 Lat., -74,22 Lon.) usada en este estudio se muestra en la figura 1, referenciada con el símbolo★, este punto corresponde a la descarga de emisario submarino de Santa Marta.

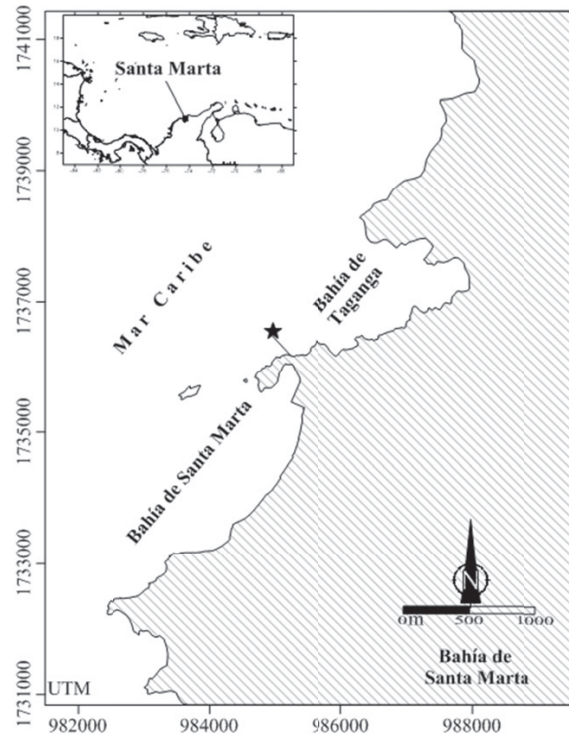


Figura 1 Localización del ACSM y de la estación oceanográfica

Descripción del modelo numérico

Se usó el modelo RMA10 desarrollado por Resource Management Associates [8, 9], el cual predice variables de estado, presión y velocidad en tres dimensiones (3D), resolviendo un grupo de ecuaciones basadas en las de ecuaciones de Navier Stokes, conservación de masa, advección-difusión y de estado que relaciona densidad, salinidad, temperatura y sedimentos suspendidos. La fricción del fondo, el efecto de

coriolis y el esfuerzo inducido por el viento en la superficie libre, también son incluidos en el modelo. Las ecuaciones básicas con límites y condiciones iniciales apropiadas, son integradas numéricamente usando el método de elementos

finitos [8]. Este modelo calcula los niveles de la superficie libre y las componentes de la velocidad para flujo subcrítico. Las ecuaciones de gobierno en su forma diferencial en coordenadas cartesianas se presentan en las ecuaciones (1) a (6).

Ecuaciones de movimiento:

$$\rho \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon_{xx} \frac{\partial u}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon_{xy} \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\epsilon_{xz} \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial p}{\partial x} - \Gamma_x = 0, \quad (1)$$

$$\rho \cdot \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon_{yx} \frac{\partial v}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon_{yy} \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\epsilon_{yz} \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{\partial p}{\partial y} - \Gamma_y = 0, \quad (2)$$

$$\rho \cdot \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon_{zx} \frac{\partial w}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon_{zy} \frac{\partial w}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\epsilon_{zz} \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{\partial p}{\partial z} + \rho \cdot g - \Gamma_z = 0, \quad (3)$$

Ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (4)$$

Ecuación de advección-difusión:

$$\frac{\partial s}{\partial t} + u \frac{\partial s}{\partial x} + v \frac{\partial s}{\partial y} + w \frac{\partial s}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial s}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial s}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial s}{\partial z} \right) - \theta s = 0, \quad (5)$$

Y la ecuación de estado:

$$\rho = F(s), \quad (6)$$

Donde x, y, z = coordenadas del sistema cartesiano; u, v, w = velocidades en las direcciones del sistema cartesiano; t = tiempo; p = presión del agua; D_x, D_y, D_z = coeficientes de difusión de Eddy; $\epsilon_{xx}, \epsilon_{xy}, \epsilon_{xz}, \epsilon_{yx}, \epsilon_{yy}, \epsilon_{yz}, \epsilon_{zx}, \epsilon_{zy}, \epsilon_{zz}$ = coeficientes de turbulencia de Eddy, g = aceleración de la gravedad; ρ = densidad del agua; $\Gamma_x, \Gamma_y, \Gamma_z$ = forzantes externos; S = salinidad, y ϕ_s = fuente/sumidero de salinidad.

El modelo RMA10 ha sido usado ampliamente para simular las condiciones hidrodinámicas, de salinidad y temperatura en ambientes costeros [8,

10-12]. Una descripción detalla y su resolución numérica puede ser consultada en la referencia [8].

Batimetría numérica y malla computacional

Una apropiada representación de la batimetría, así como unas adecuadas condiciones de fronteras, son un requerimiento fundamental para la implementación exitosa de modelos de simulación de patrones oceánicos [13]. Para el ACSM en particular, la batimetría es muy compleja y la representación de la misma fue tomada de las cartas náuticas COL406 y COL244 del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (CIOH). Para determinar la resolución espacial de la malla computacional se siguió el procedimiento

sugerido en la referencia [14], la discretización espacial resultante fue adaptada en pro de lograr una buena representación de la batimetría y la línea costera en el ACSM. La malla usada constó de 1576 elementos triangulares entre 10 y 160 metros, 3378 puntos de interpolación y 8 capas con espesores que varían hasta los 15 metros en

las zonas más profundas. La malla es circular en su parte exterior, para usar una única línea continua, lo que permite ahorros en los costos computacionales de las corridas implementadas; la conformación de la misma y la batimetría interpolada en el dominio de simulación se muestran en la figura 2.

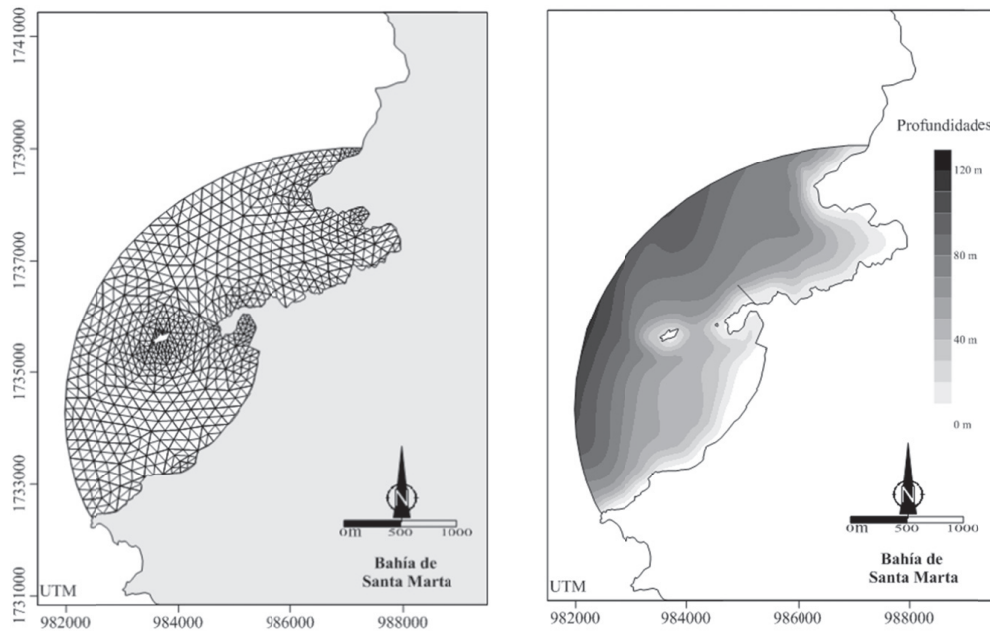


Figura 2 Malla computacional (izquierda) y batimetría interpolada (derecha) en el dominio de simulación

Mediciones de campo

La disponibilidad de datos de campo en esta investigación fue realizada en cuatro campañas de mediciones. Dos de estas se usaron para calibrar el modelo (entre enero 7 a febrero 7 y de octubre 13 al 14 noviembre de 2009), las dos restantes se emplearon para la validación (de febrero 11 a marzo 12 y de noviembre 16 a diciembre 16 de 2009). Los períodos de medición de datos cubrieron la época seca (diciembre a abril) donde se produce una circulación termohalina debido al fenómeno de surgencia y la época lluviosa (mayo a noviembre) caracterizada por una estratificación vertical de la columna de agua [5]. Para determinar la dirección y magnitud de las corrientes, se utilizó un correntómetro RCM9 LW de la familia Aanderaa, ubicado a 10 metros

del fondo y suspendido por boyas. El RCM9 fue equipado además con sensores de temperatura (-4 a $36^{\circ}\text{C} \pm 0,001^{\circ}\text{C}$), conductividad ($0 - 7,5 \text{ S/m} \pm 0,0002 \text{ S/m}$) y presión ($0 - 4000 \text{ kPa} \pm 0,0001 \text{ kPa}$). Estas mediciones se promediaron en intervalos de 10 minutos a 40 metros de profundidad. Al inicio y final de cada período de medición se tomaron datos de la columna de agua con intervalos de tiempo de 15 segundos para registrar los perfiles de salinidad y temperatura, bajando lentamente el equipo RCM9 LW desde la superficie hasta el fondo.

Calibración del modelo

La calibración del modelo RMA10 fue llevada a cabo usando las mediciones de niveles de agua y corrientes de 30 días para dos períodos diferentes

del año, tal como se explicó anteriormente. El intervalo de paso del tiempo usado en las corridas del modelo fue de 300 segundos. En este proceso se compararon los resultados de las simulaciones y las mediciones de campo para mareas, corrientes, salinidad y temperatura. Los parámetros usados en el ajuste durante la calibración fueron, la fricción de fondo (0,008 – 0,015) y los coeficientes de turbulencia de Eddy (-2 – 7 m²/s). Estos se modificaron hasta que se encontró un ajuste aceptable entre las simulaciones y las mediciones. Para determinar este ajuste, se utilizaron los estimadores del error de la raíz media cuadrática (RMS por sus iniciales en inglés) [15, 16] y la habilidad predictiva (Skill) [16]. La expresión del RMS se muestra en la ecuación (7), mientras que la cuantificación de Skill se realizó de acuerdo a la ecuación (8).

$$RMS = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\zeta_m - \zeta_d]^2 \right\}^{1/2} \quad (7)$$

$$Skill = 1 - \frac{\sum [\zeta_m - \zeta_d]^2}{\sum (|\zeta_m - \bar{\zeta}_d| - |\zeta_d - \bar{\zeta}_d|)} \quad (8)$$

$$C_a = \begin{cases} 1 \times 10^{-3} & \text{si } \sqrt{U^2 + V^2} < 5 \text{ ms}^{-1} \\ \left(1.1 + \frac{2.1}{35} \sqrt{U^2 + V^2}\right) * 1 \times 10^{-3}, & \text{si } \sqrt{U^2 + V^2} \geq 5 \text{ ms}^{-1} \end{cases} \quad (10)$$

donde, son los coeficientes de esfuerzo cortante de viento en las direcciones x y y respectivamente; C_a es el coeficiente de arrastre del viento, ρ_a es la densidad del aire; U , V son los componentes de la velocidad del viento en las direcciones x y y respectivamente. El modelo resultó no sensible a los datos de vientos, en el análisis realizó para determinar los efectos de la variación de parámetros físicos y numéricos. Por esta razón los datos de vientos usados se consideraron adecuados. La información de marea para las fronteras abiertas fue obtenida de un modelo regional para el Mar Caribe, en un esquema de acoplamiento de una vía. Los detalles del proceso de acoplamiento pueden ser revisados en la referencia [17]. Las fronteras abiertas

donde ζ_m y ζ_d son los niveles de agua medidos con el equipo y obtenidos en las simulaciones respectivamente; N es el número de datos en las series de tiempo y $\bar{\zeta}_d$ corresponde a la media temporal de los niveles de agua predichos. Si el RMS es menor a un 5%, el ajuste entre los datos medidos y simulados se considera excelente y bueno para valores entre el 5 y el 10%. Por otro lado una concordancia perfecta genera un Skill de uno y un desajuste completo es cero. De acuerdo con la referencia [16], valores superiores a 0,95 para este parámetro, pueden ser considerados representativos de un excelente ajuste de las predicciones a los datos medidos en campo.

Los campos de vientos actuantes sobre la superficie del agua fueron generados a partir de los datos de la estación meteorológica del aeropuerto Simón Bolívar de Santa Marta. Los componentes meridional y zonal del viento fueron transformados en esfuerzo cortante de viento mediante las ecuaciones (9) y (10)

$$(\tau_x; \tau_y) = C_a \rho_a (U, V) \sqrt{U^2 + V^2} \quad (9)$$

tuvieron datos de salinidad y temperatura, extraídos del sistema de pronóstico del océano en tiempo real (RTOFS por sus siglas en inglés) para el Atlántico Norte, el cual es un sistema de predicción basado en el modelo oceánico de coordenadas híbridas (HYCOM por su siglas en inglés); una mayor descripción del sistema y el modelo pueden ser encontrados en la referencia [18].

Validación del modelo

La validación es definida como un procedimiento de comparación de los resultados del modelo y las mediciones de campo, para probar la eficiencia del mismo. Las mediciones usadas

para la validación deben ser independientes de los datos usados en la calibración [13]. El modelo 3D aplicado al ACSM fue validado mediante la simulación de las condiciones de niveles de elevación de la superficie del mar y corrientes, sin cambiar los valores de los parámetros físicos y numéricos determinados en la calibración. Se efectuaron simulaciones de 30 días, para determinar el ajuste del modelo en mareas vivas y muertas para dos períodos diferentes del año, en una época seca (entre febrero 11 y marzo 12 de 2009) y una época lluviosa (de noviembre 16 a diciembre 16 de 2009). Para estimar el ajuste del modelo en el proceso de validación se usaron los estimadores RSM y Skill [15, 16].

Resultados y discusión

Mediciones de campo

Las mediciones del nivel de marea mostraron un rango máximo de 48 cm, calculado como la diferencia en altura entre la pleamar más alta y la bajamar más baja no consecutivas. La variación de estas mediciones se presenta en la figura 3. Del análisis armónico realizado con el software T-TIDE [19], se obtuvieron 37 constituyentes; los componentes diurnos resultaron ser más representativos con el 58,3 % de la amplitud de la marea, frente al 36,1 % de los componentes semidiurnos, resultando mareas mixtas principalmente diurnas [20].

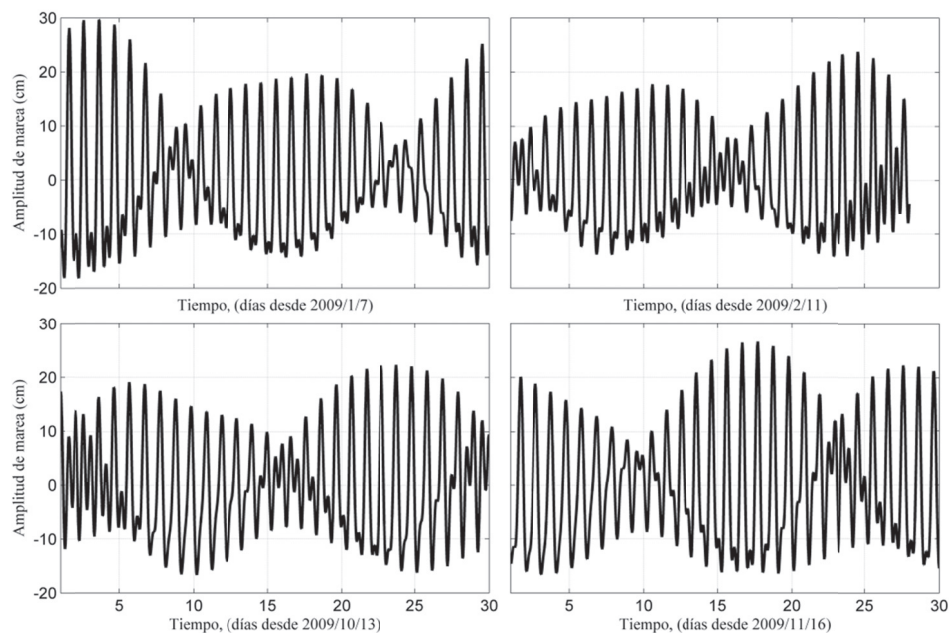


Figura 3 Variación de la marea en el ACSM

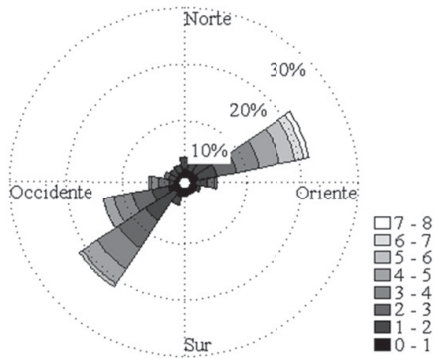
El ACSM muestra una corriente dominante que va hacia el ENE a 40 metros de profundidad. En enero el 23 % de las corrientes fue en esta dirección, mientras que para febrero, octubre y noviembre, los porcentajes fueron de 22,8, 24,2 y 23,1 %, respectivamente. Las corrientes que se dirigen hacia el SW y WSW también presentaron un porcentaje alto, frente a otras direcciones; juntas llegan a representar hasta el 38% de la

distribución (ver figura 4). En lo referente a la magnitud, las mediciones tomadas a 40 metros de profundidad con el RCM9 muestran velocidades hasta de 8 cm/s, siendo más frecuentes las magnitudes entre 3 y 5 cm/s.

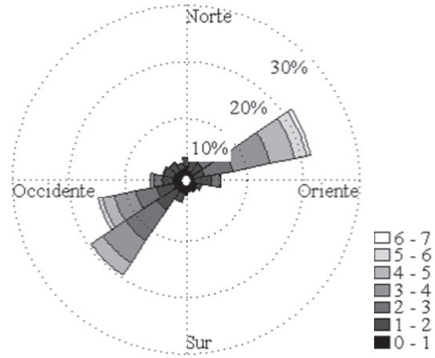
Los perfiles de temperatura tomados en dos épocas diferentes del año, seca y lluviosa, se muestran en las figuras 5 y 6 respectivamente. Las mediciones entre enero y mediados de marzo re-

velan una columna de agua bien mezclada, en la que los perfiles verticales de la temperatura, son casi uniformes. La temperatura no supera los 25 °C. Entre octubre y mediados de diciembre ocu-

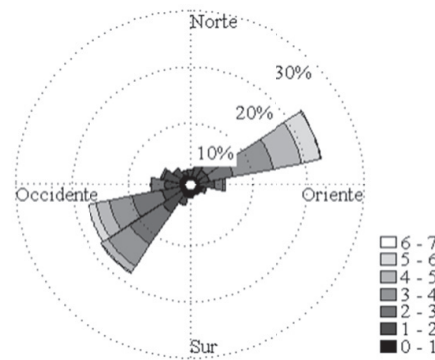
rrer un período de estratificación, observándose una marcada diferencia entre los valores de temperatura en la superficie y el fondo. Las temperaturas registradas van entre 22 y 28 °C.



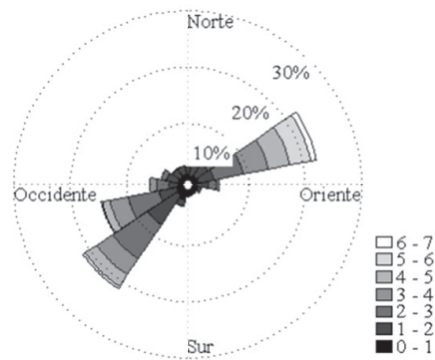
a). Rosa corrientes ene., 7 – feb., 7 de 2009



b). Rosa corrientes feb., 11 – mar., 12 de 2009



c). Rosa corrientes oct., 13 – nov., 14 de 2009



d). Rosa corrientes nov., 16 - dic., 16 de 2009

Figura 4 Rosa de corrientes en el ACSM

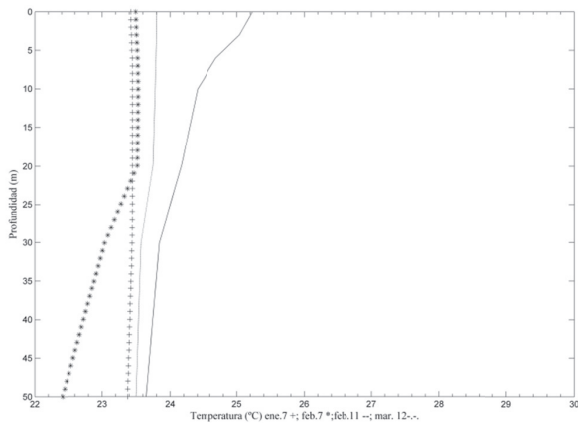


Figura 5 Perfiles de temperatura (°C) en el ACSM período seco

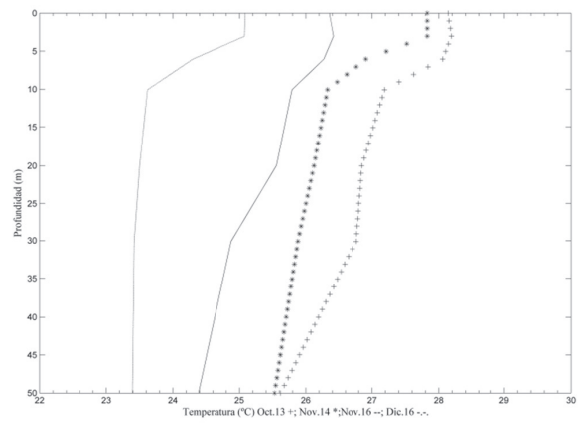


Figura 6 Perfiles de temperatura (°C) en el ACSM período de lluvias

Calibración

Se observa un buen ajuste entre los niveles de la marea del modelo y las mediciones, tanto para la época seca (figura 7), como la lluviosa (figura 8). El estimador del error RMS fue cuantificado en 1,95 cm (época seca) y 2,15 cm (época lluviosa).

En ambos casos, el RMS fue menor al 5% de la amplitud de la marea, lo que muestra un buen proceso de calibración, confirmado además por la habilidad predictiva del estimador Skill, cuyo valor fue 0,992 y 0,987 para las épocas seca y lluviosa, respectivamente.

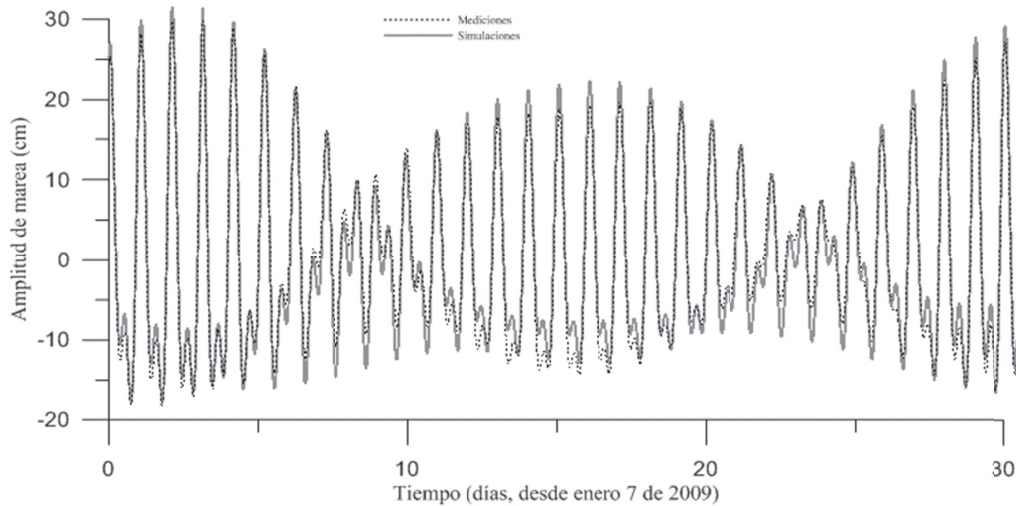


Figura 7 Comparación mediciones y simulaciones para la calibración del modelo con datos de marea en período seco

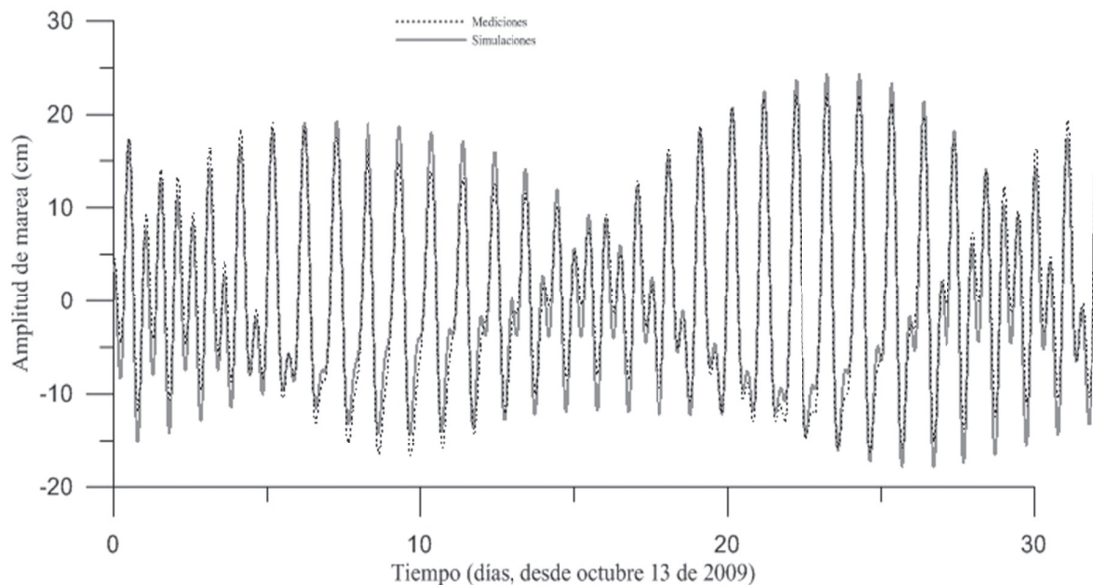


Figura 8 Comparación mediciones y simulaciones para la calibración del modelo con datos de marea en período de lluvias

Al igual que el análisis de las mareas, la comparación de datos de velocidades de la corriente medidos y simulados, mostró un buen nivel de concordancia entre estos. El RMS fue de 0,69 y 0,70 cm/s para las comparaciones en período seco (figura 9) y lluvioso (figura 10), respectivamente, mientras que la habilidad predictiva fue de 0,947 para ambos períodos. En la figura 11 se muestra el ajuste de los resultados del modelo a las mediciones de perfiles de

temperatura en la columna de agua para ambos el período seco (enero 7 de 2009) y de lluvias (noviembre 14 de 2009); la habilidad predictiva del modelo fue excelente (Skill = 0,999), mientras que el RMS reportado fue de 0,25 °C en el período seco y 0,27 °C en el de lluvias. Estos mismos estimadores de error y habilidad predictiva, confirman un buen ajuste entre las mediciones y las simulaciones por parte del modelo para la salinidad (ver figura 12).

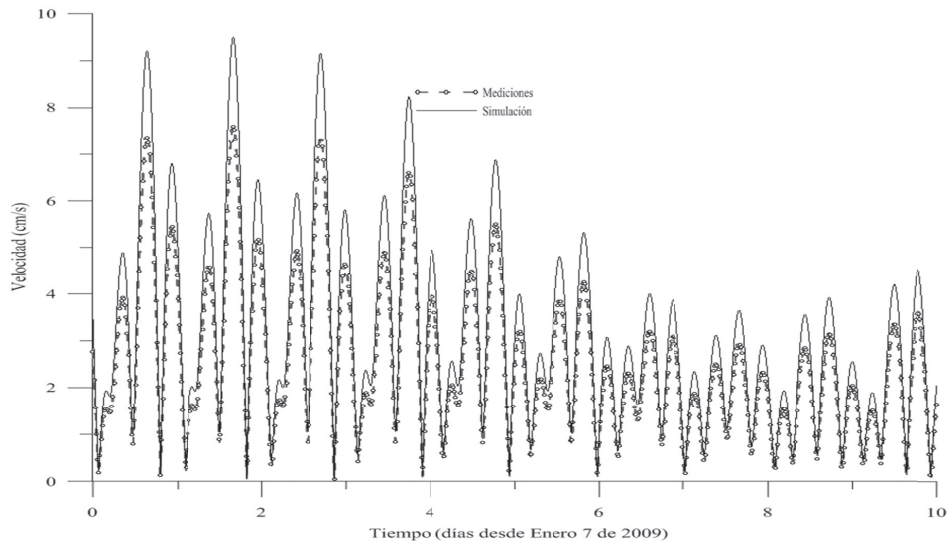


Figura 9 Comparación mediciones y simulaciones de velocidad en período seco

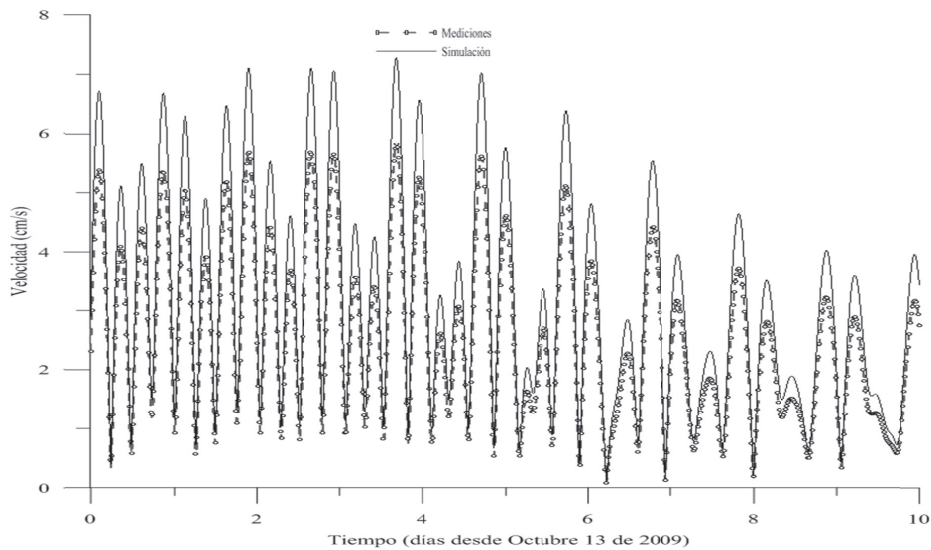


Figura 10 Comparación mediciones y simulaciones de velocidad en período de lluvia

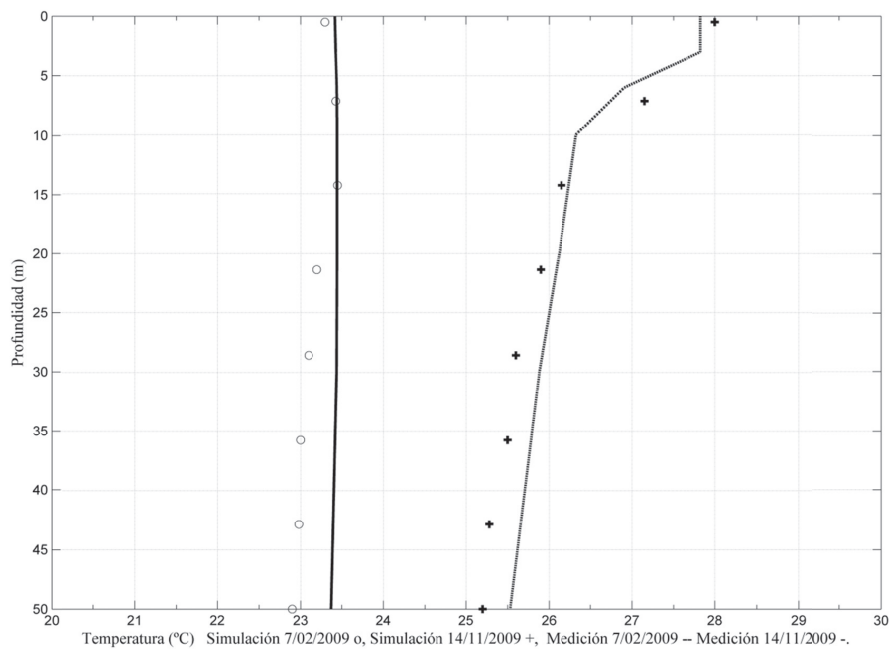


Figura 11 Comparación mediciones y simulaciones para la calibración del modelo con datos de temperatura en la columna de agua

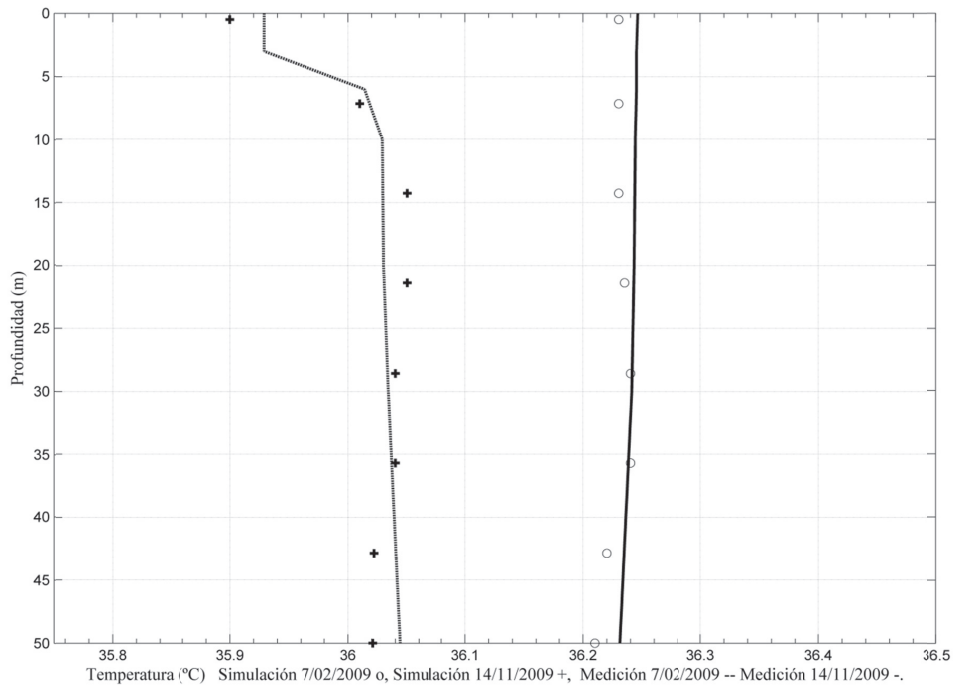


Figura 12 Comparación mediciones y simulaciones para la calibración del modelo con datos de salinidad en la columna de agua

Validación

La validación sugiere que los errores entre los resultados de las simulaciones y las mediciones, son pequeños. En la tabla 1 se presenta la información del estimador de error RMS y de habilidad predictiva Skill, encontrados en la comparación de los datos de las mediciones y las simulaciones. Tanto el RMS como la habilidad predictiva (Skill), confirman la capacidad del modelo para representar de manera adecuada las condiciones

hidrodinámicas, de temperatura y salinidad registradas en el ACSM. Los resultados obtenidos, están en el mismo rango que los valores reportados por otros investigadores, quienes aplicaron la misma metodología de calibración de modelos para simular las condiciones hidrodinámicas en la Ria de Aveiro [13], Laguna Patos [21], Estuario Guadiana [22] y la Ria Formosa [16]. Estos autores reportaron valores de RMS menores al 10% de la amplitud de la marea local y habilidades predictivas en el rango de 0,90 a 1.

Tabla 1 Valores de RMS y Skill determinados en la comparación de mediciones y simulaciones en el proceso de validación del modelo

<i>Estimador</i>	<i>Periodo seco</i>				<i>Periodo de lluvias</i>			
	<i>Mareas</i>	<i>Corriente</i>	<i>Salinidad</i>	<i>Temperatura</i>	<i>Mareas</i>	<i>Corriente</i>	<i>Salinidad</i>	<i>Temperatura</i>
RMS	2,1	0,72	0,011	0,21	2,0	0,78	0,080	0,17
Skill	0,991	0,941	0,994	0,981	0,986	0,941	0,994	0,987

Conclusiones

Este artículo presenta el proceso de calibración y validación de un modelo hidrodinámico en tres dimensiones para el ACSM, aplicado al estudio de las condiciones hidrodinámicas, de temperatura y salinidad, cuyas características en esta zona costera cambian drásticamente de acuerdo con la ocurrencia de las lluvias y régimen de vientos. En el período seco hay un fenómeno de surgencia caracterizado por aguas más frías y densas, mientras que en época de lluvias las masas de agua son más cálidas, permitiendo la estratificación de la columna de agua. Atendiendo a estas condiciones, el modelo fue calibrado y validado tanto para un periodo seco, como para una época de lluvias, probando su capacidad para simular ambos escenarios. El proceso de calibración y validación del modelo hidrodinámico, fue llevado a cabo mediante

la comparación de mediciones de campo con los resultados del mismo. Los estimadores usados, el RMS y Skill, además de ser de fácil de aplicación, permiten una rápida y confiable determinación de la capacidad del modelo para reproducir datos medidos. Dado el resultado del proceso de calibración y validación del modelo hidrodinámico, este puede ser usado para estimar las condiciones hidrodinámicas, de temperatura y salinidad en el ACSM.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación (COLCIENCIAS), a la Universidad del Magdalena y a la Universidad de Antioquia por la financiación brindada para la ejecución de este estudio.

Referencias

1. A. Gordon. "Circulation of the Caribbean Sea". *J. Geophys. Res.* Vol. 72. 1967. pp. 6207-6223.
2. S. Murphy, H. Hurlburt, J. O'Brien. "The connectivity of eddy variability in the Caribbean Sea, the Gulf of Mexico, and the Atlantic Ocean". *J. Geophys. Res.* Vol. 104. 1999. pp. 1431-1453.
3. C. Andrade, E. Barton. "Eddy development and motion in the Caribbean Sea". *J. Geophys. Res.* Vol. 105. 2000. pp. 26191-26201.
4. W. Johns, T. Lee, F. Schott, R. Zantopp, R. Evans. "The North Brazil Current retroflection: Seasonal structure and eddy variability". *J. Geophys. Res.* Vol. 95. 1990. pp. 22103-22119.
5. D. Arévalo, A. Franco. "Características oceanográficas de la surgencia frente a la ensenada de Gaira, departamento de Magdalena, época seca menor de 2006". *Bol. Invest. Mar. Cost.* Vol. 37. 2008. pp. 131-162.
6. J. Vega, A. Rodríguez, M. Reyes, R. Navas. "Formaciones coralinas del área de Santa Marta: Estado y patrones de distribución espacial de la comunidad bentónica". *Bol. Invest. Mar. Cost.* Vol. 37. 2008. pp.87-105.
7. J. Garzón, J. Díaz. The Caribbean coral reefs of Colombia. *Latin American Coral Reefs*. Ed. Elsevier Science. Amsterdam. 2003. pp. 301.
8. M. Fossati, I. Piedra. "Numerical modelling of residual flow and salinity in the Rio de la Plata". *Appl. Math. Model.* Vol. 32. 2008. pp. 1066-1086.
9. C. Palacio, F. García, U. García. "Calibración de un modelo hidrodinámico 2D para la bahía de Cartagena". *Dyna*. N.º. 164. 2010. pp. 152-166.
10. B. Miller, W. Peirson, Y. Wang, R. Cox. "An overview of numerical modelling of the Sydney deepwater outfall plumes". *Mar. Pollut. Bull.* Vol. 33. 1996. pp. 147-159.
11. C. Cook, G. Orlob, D. Huston. "Simulation of wind-driven circulation in the Salton Sea: Implications for indigenous ecosystems". *Hydrobiologia*. Vol. 473. 2002. pp. 59-75.
12. A. Teeter, B. Johnson, C. Berger, G. Stelling, N. Scheffner, M. Garcia, T. Parchure. "Hydrodynamic and sediment transport modeling with emphasis on shallow-water, vegetated areas (lakes, reservoirs, estuaries and lagoons)". *Hydrobiologia*. Vol. 444. 2001. pp. 1-23.
13. J. Dias, J. Lopes. "Implementation and assessment of hydrodynamic, salt and heat transport models: The case of Ria de Aveiro Lagoon (Portugal)". *Environ. Modell. Softw.* Vol. 21. 2006. pp.1-15.
14. F. García, C. Palacio, U. García. "Generación de mallas no estructuradas para la implementación de modelos numéricos". *Dyna*. N. 157. 2009. pp. 17-25.
15. M. Li, L. Zhong, W. Boicourt. "Simulations of Chesapeake Bay estuary: Sensitivity to turbulence mixing parameterizations and comparison with observations". *J. Geophys. Res.* Vol. 110. 2005. pp. 27-36.
16. J. Dias, M. Sousa, X. Bertin, A. Fortunato, A. Ooliveira. "Numerical modeling of the impact of the Ancão Inlet relocation (Ria Formosa, Portugal)". *Environ. Modell. Softw.* Vol. 24. 2009. pp. 711-725.
17. F. Garcia, C. Palacio, U. García. "Uso de un modelo regional para el mar Caribe para obtener condiciones fronteras abiertas en un modelo local para la bahía de Santa Marta – Colombia". *Bol. Cient. CIOH*. Vol. 26. 2008. pp. 33-46.
18. A. Mehra, I. Rivin. "A real time ocean forecast system for the North Atlantic Ocean". *Terr. Atmos. Ocean. Sci.* Vol. 21. 2010. pp. 211-228.
19. R. Pawlowicz, B. Beardsley, S. Lentz. "Classical tidal harmonic analysis including error in MATLAB using T-TIDE". *Comput. Geosci.* Vol. 28. 2002. pp. 929-937.
20. F. Garcia, C. Palacio, U. García. "Constituyentes de marea en la bahía de Santa Marta". *Dyna*. N.º. 167. 2011. pp. 142-150.
21. I. Martins, J. Dias, E. Fernandes, J. Muelbert. "Numerical modelling of fish eggs dispersion at the Patos Lagoon estuary – Brazil". *J. Marine Syst.* Vol. 68. 2007. pp. 537-555.
22. A. Oliveira, A. Fortunato, L. Pinto. "Modelling the hydrodynamics and the fate of passive organisms in the Guadiana estuary". *Estuar. Coast. Shelf Sci.* Vol. 70. 2006. pp. 76-84.