



Lámpsakos

ISSN: 2145-4086

Universidad Católica Luis Amigó

Alvarez Carval, Jessica Patricia; Tovio Gracia, Cesar Augusto
Análisis de los efectos de la descarga del canal del dique sobre la
estratificación salina de su desembocadura a la bahía de Cartagena
Lámpsakos, núm. 21, 2019, Enero-Junio, pp. 51-64
Universidad Católica Luis Amigó

DOI: <https://doi.org/10.21501/21454086.2950>

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=613964508006>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

UAEM redalyc.org

Sistema de Información Científica Redalyc
Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso
abierto



Análisis de los efectos de la descarga del canal del dique sobre la estratificación salina de su desembocadura a la bahía de cartagena

Analysis of the effects of the channel release from the dam on the saline stratification of its movement to the cartagena bay

Jessica Patricia Álvarez Carval*
Cesar Augusto Tovio Gracia**

(Recibido el 10-08-25. Aprobado el 03-12-2018)

Estilo de citación de artículo:

J. P. Álvarez Carval, y C. A. Tovio Gracia, "Análisis de los efectos de la descarga del canal del Dique sobre la estratificación salina de su desembocadura a la Bahía de Cartagena", *Lámpsakos*, (21), pp. 51-64. (enero-junio, 2019). DOI: <https://doi.org/10.21501/21454086.2950>

Resumen.

Los estuarios son cuerpos de agua que representan la transición del río al mar, poseen por lo tanto características de ambos, un ejemplo de este tipo de ecosistemas es la desembocadura del canal del Dique a la Bahía de Cartagena, esto originó cambios en el régimen natural de la bahía modificando la hidrodinámica (los patrones de salinidad, corriente y densidad). A pesar de que en la zona ya se han realizado investigaciones, estas no han estudiado detalladamente los patrones de salinidad y densidad, por lo que es el objeto de este trabajo de investigación, a través de la simulación y validación de parámetros que influyen sobre la estratificación salina de la zona, por medio del modelo numérico Delft3D, el cual se centra en este tipo de entornos; con lo que se caracteriza el tipo de estratificación de la intrusión salina en la zona en las condiciones simuladas.

Palabras clave: Canal del Dique; Estuario; Hidrodinámica; Modelación numérica; Salinidad; Densidad; Delft3D; Estratificación; Simulación; Bahía de Cartagena.

* Tecnóloga en Gestión Ambiental Industrial. Estudiante, Fundación Universitaria Tecnológico Comfenalco, Cartagena de Indias-Colombia. Correo electrónico: jalvarez2047@tecnocomfenalco.edu.co

** Magíster en Física aplicada. Docente, Universidad del Norte, Barrquilla-Colombia. Correo electrónico: ctovio@uninorte.edu.co

Abstract.

Estuaries are water creations that represent the transition from the river to the sea, therefore, they have characteristics of both from the river and the sea as well, an example of this type of ecosystem is the channel's outlet from the dam to the Bay of Cartagena, this caused changes in the environment of the bay modifying the hydrodynamics (salinity, flowing and density patterns). Despite the research that has already been carried out in the area, those specific researches have not studied the salinity and density patterns in detail. That is why these elements, salinity and density are the object of this research work, through the simulation and validation of parameters that influence the saline stratification of the area, through the Delft3D numerical model, which focuses on this type of environment; that at the same time, characterizes the type of stratification of the saline interference in the area under the simulated conditions.

Keywords: Dam; Estuary; Hydrodynamics; Numerical modeling; Salinity; Density; Delft3D; Stratification; Simulation; Cartagena Bay

1. INTRODUCCIÓN

Los estuarios son “cuerpos de agua semi-cerrados, con conexión libre y abierta hacia el mar, y en el cual la dilución del agua del mar y el agua fresca del río, es medible” [p. 3]. Estos ecosistemas tienen características del río y del mar; entre las características de río está el flujo de agua, transporte de sedimentos, inundaciones ocasionales, y agua fresca en la superficie; las características típicas marinas son la marea, corrientes marinas, oleaje y agua salada [2], [3]. Determinar y predecir la descarga del río, la altura de marea, temperatura, salinidad, densidad, velocidad de corriente, y otros aspectos, en determinados instantes de tiempo y en un punto espacial o un conjunto de estos, es de importancia para comprender la hidrodinámica del ecosistema [4].

Los estuarios se pueden clasificar dependiendo de su forma, la influencia de la marea y del río, la geología, y la salinidad; esta última clasificación es de interés para el objetivo de esta investigación, según la cual los estuarios se clasifican en: i) estratificado, que ocurre cuando la descarga del río es mayor comparada con el flujo de la marea; ii) bien mezclado, cuando el flujo de la marea es mayor que la descarga del río; y iii) parcialmente mezclado, cuando ambas descargas son relativamente iguales, como se muestra en la Fig. 1 [4]. La determinación de la estratificación del ecosistema puede conllevar al desarrollo de nuevas tecnologías de generación de energía, como la *energía a partir de gradiente salino* (EGS), que puede ser obtenida de la mezcla de agua dulce del río y agua salada del mar en un ciclo hidrológico natural [1].

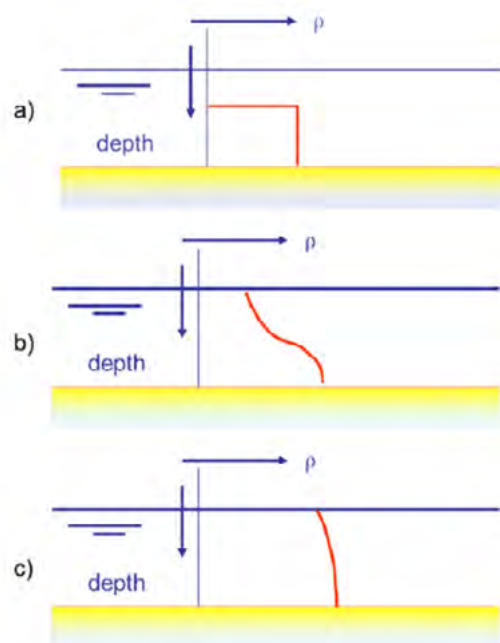


Fig. 1: Variación de la salinidad con respecto a la profundidad en un estuario; Estratificado (a), Parcialmente mezclado (b) y Bien mezclado (c). Fuente: (Savenije, 2005).

En la desembocadura del canal del Dique a la Bahía de Cartagena se han realizado algunas investigaciones con el fin de analizar sus características hidrodinámicas y sedimentológicas, a partir de una caracterización de variables meteomarinas como temperatura y salinidad en los procesos costeros circundantes [6], lo que despertó el interés de diversos actores en este cuerpo de agua y conllevó a los primeros estudios de circulación y transporte de contaminantes [7], considerando además la dependencia de los patrones de circulación dependientes de la temperatura [8]. Uno de los primeros modelos numéricos desarrollados y usados fue CODEGO; se usó para simular la circulación del canal El Zapatero. En el 2009 se realizó la primera simulación de la hidrodinámica de toda la Bahía de Cartagena, usando un modelo 2D [9]. Entre los estudios más recientes se encuentra la caracterización de las corrientes superficiales de la bahía de Cartagena, por medio de la calibración de un modelo hidrodinámico en el 2013 [10].

En la mayoría de los estudios se han analizado los patrones de dispersión del sedimento en la bahía, en uno de estos se determinó la relación que hay entre la

dispersión de la turbidez en el agua y la distribución de la salinidad [11]. Sin embargo, este estudio se basa únicamente en la caracterización de la estratificación salina en la desembocadura del canal a la bahía, lo que se puede realizar mediante modelos numéricos que consisten en una solución, en espacio y tiempo, de ecuaciones hidrodinámicas y/o de transporte de materia, a partir de información sobre variables ya conocidas [2].

El software de modelación numérica usado para analizar el comportamiento de la estructura salina fue Delft3D, el cual se centra en la modelación de entornos fluviales y costeros. Desarrollado por el Instituto Holandés de Asuntos Deltaicos Nacionales e Internacionales (Deltares) en el 2008, este simula flujos en dos y tres dimensiones, aplicando flujos no-estacionarios e integrando efectos de marea, viento, presión atmosférica, densidades que se dan por diferencia de temperatura y salinidad, oleaje y turbulencias. Este modelo numérico hidrodinámico resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes en una malla curvilínea adaptada a la forma del ecosistema [12].

Área de estudio

La zona de estudio se encuentra ubicada en el municipio de Pasacaballos, al sur de la ciudad de Cartagena, entre las coordenadas $10^{\circ}16'57,50''$ y $10^{\circ}18'23,93''$ latitud norte y $75^{\circ}31'16,59''$ y $75^{\circ}32'11,11''$ longitud oeste, en el punto de la desembocadura del canal a la bahía de Cartagena, como se ve en la Fig. 2.

El canal del Dique fue creado artificialmente en 1952, tiene longitud de 115 km desde su desviación en el río Magdalena [13], [14], cuenta con un caudal máximo aproximado de $540 \text{ m}^3/\text{s}$, el cual desemboca en la bahía de Cartagena, y su profundidad oscila entre 0,6 y 2,1 m [15]. Además, en la zona las condiciones de marea presentan amplitud de 16,76 cm en la bahía, con un periodo de aproximadamente 12 horas a un rango promedio de 33,5 cm [10], lo que la clasifica como un

régimen de marea micromareal. La dinámica de flujo en la bahía se presenta de la siguiente forma: el flujo de ingreso es a través del estrecho de Bocachica, y el flujo de salida por Bocagrande [2]. Desde el inicio, la influencia de las aguas del canal del Dique a la Bahía de Cartagena han causado cambios en el régimen natural del cuerpo de agua, convirtiéndola de un ecosistema coralino a un estuario y con una alta concentración de sólidos en suspensión, los que puede llegar a ser de 1.000 mg/L en la desembocadura del canal [11], [16].

2. METODOLOGÍA

La caracterización de la estratificación salina en la desembocadura del canal del Dique a la Bahía de Cartagena se realizó a través de la simulación numérica en el software Delft3D, en la que se modelaron los parámetros hidrodinámicos más influyentes sobre la estratificación salina como son: marea, caudal, temperatura, salinidad y viento. El modelo numérico se validó con información recolectada en campo por un punto de control instalado en el área de turbidez máxima, la cual es producida por la mezcla de los dos cuerpos de agua, en las coordenadas $10^{\circ}18'30,49''$ latitud norte y $75^{\circ}32'3,13''$ longitud oeste (Fig. 3, a).

En el punto de control se ubicaron dos sensores para recolectar datos de salinidad y de profundidad del agua, ambos instalados a 0,8 m de la superficie; un sensor HOB0 U24-002-C para captar los datos de salinidad a una frecuencia de 30 segundos (Fig. 3, c); y para recolectar los datos de profundidad, un sensor DCX-25 PVDF con una frecuencia de 1 segundo (Fig. 3, b).

Para la aplicación del modelo numérico se determinaron actividades, entre las que están la determinación de las condiciones iniciales del área de estudio, la configuración del modelo teniendo en cuenta los datos recolectados en la primera etapa, la aplicación del modelo numérico, la obtención de los resultados y su validación; la Fig. 4 describe las actividades mencionadas anteriormente.

DOI: <https://doi.org/10.21501/21454086.2950>

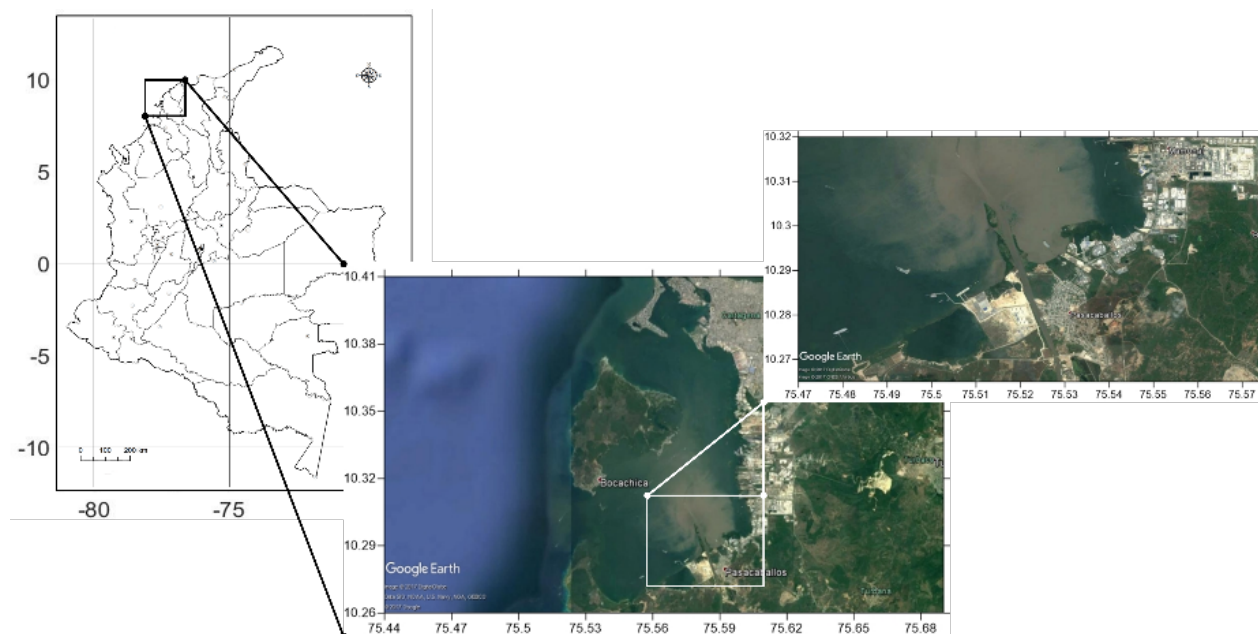


Fig. 2: Ubicación del área de estudio. Fuente: Google earth, modificado por los autores.

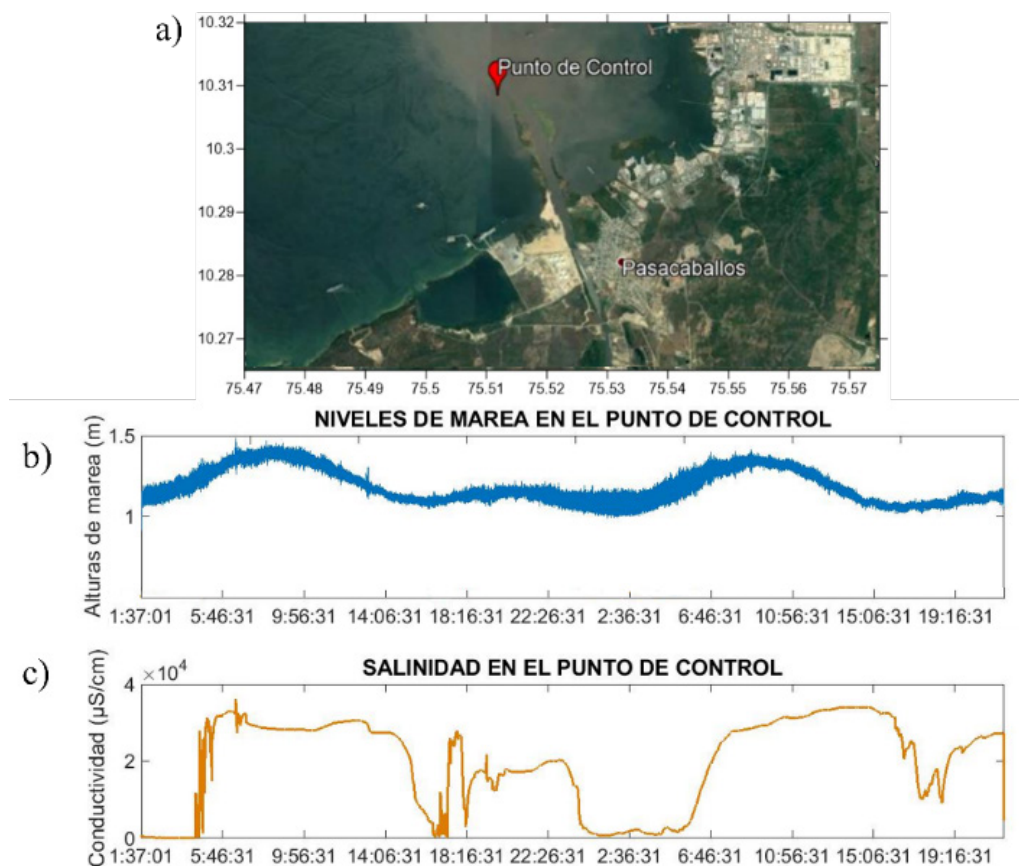


Fig. 3: a) Ubicación del punto de control en el área. b) Niveles de marea medidos. c) Salinidad medida. Fuente: a) Google Earth modificado por los autores.

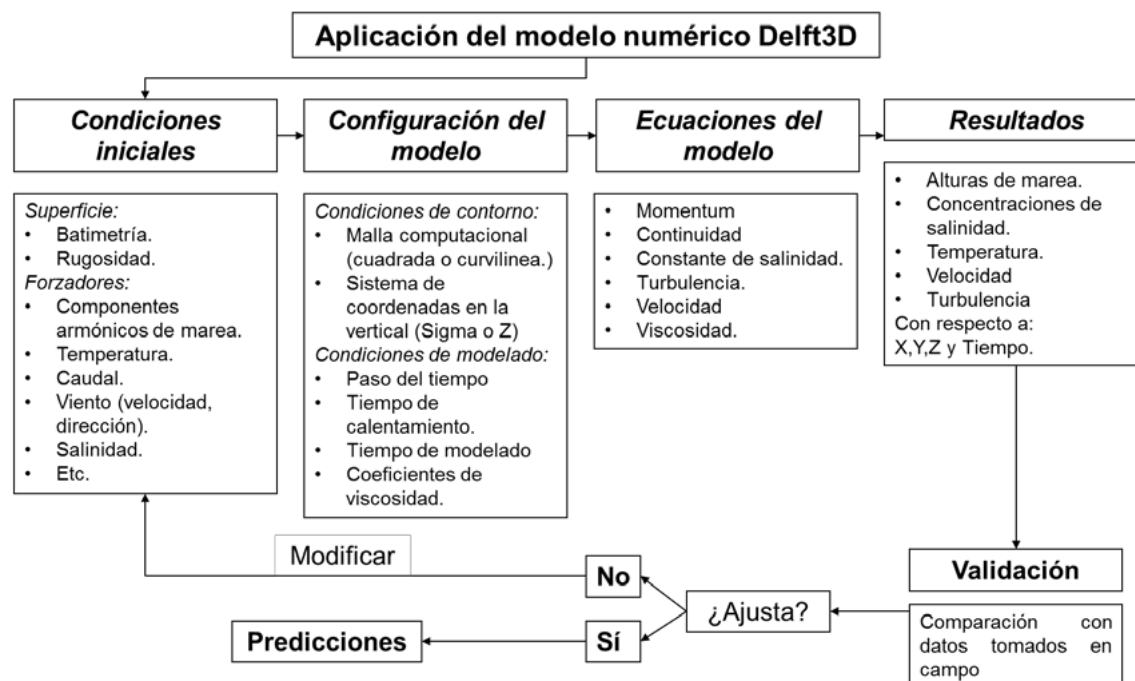


Fig. 4: Esquema de la aplicación del modelo numérico Delft3D.

Ecuaciones del modelo

Para la presión barotrópica de aguas poco profundas, las ecuaciones 3D se resuelven mediante una factorización tipo ADI [17]. La ecuación de la continuidad (1) linealizada por los flujos del paso del tiempo, para términos que contienen la velocidad en el plano vertical. En la ecuación, ξ representa el componente en el plano horizontal, $\sqrt{G_{\eta\eta}}$ es el coeficiente de transformación de las coordenadas curvilíneas, y ξ representa el índice de fracción de sedimento.

$$\frac{\partial}{\partial \xi} \left(\sqrt{G_{\eta\eta}} H U \right)^{\ell+\frac{1}{2}} \approx \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\sqrt{G_{\eta\eta}} H^{\ell} U^{\ell+\frac{1}{2}} \right) \approx \frac{\left(\sqrt{G_{\eta\eta}} H^{\ell} U^{\ell+\frac{1}{2}} \right)_{m+\frac{1}{2},n} - \left(\sqrt{G_{\eta\eta}} H^{\ell} U^{\ell+\frac{1}{2}} \right)_{m-\frac{1}{2},n}}{\Delta \xi} \quad (1)$$

Los términos del momentum en el plano horizontal en una malla tipo Z están aproximados por diferentes métodos. Las discretizaciones de Explicit Multi-Directional Upwind (MDUE) y Implicit Multi-Directional Upwind (MDUI) [3]. La discretización del flujo con un componente U y V (que son velocidades horizontales promediadas en la vertical) positivos viene dada por

las ecuaciones (2) y (3), donde $\sqrt{G_{\eta\eta}}$ y $\sqrt{G_{\xi\xi}}$, son los coeficientes de transformación de coordenadas curvilíneas, y m , n , y k representan los tres ejes (x, y, z).

$$\frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \xi} \bigg|_{m,n,k} = \begin{cases} \frac{u_{m,n,k}}{(\sqrt{G_{\eta\eta}})_{m,n}} \left(\frac{u_{m,n-1,k} - u_{m-1,n-1,k}}{\Delta \xi} \right) \bar{v}_{m,n,k}^{\xi\eta} > u_{m,n,k} > 0 \\ \frac{u_{m,n,k}}{(\sqrt{G_{\eta\eta}})_{m,n}} \left(\frac{u_{m,n,k} - u_{m-1,n,k}}{\Delta \xi} \right) u_{m,n,k} > \bar{v}_{m,n,k}^{\xi\eta} > 0 \end{cases} \quad (2)$$

Y:

$$\frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} \bigg|_{m,n,k} = \begin{cases} \frac{\bar{v}_{m,n,k}^{\xi\eta}}{(\sqrt{G_{\eta\eta}})_{m,n}} \left(\frac{u_{m,n,k} - u_{m,n-1,k}}{\Delta \xi} \right) \bar{v}_{m,n,k}^{\xi\eta} > u_{m,n,k} > 0 \\ \frac{\bar{v}_{m,n,k}^{\xi\eta}}{(\sqrt{G_{\eta\eta}})_{m,n}} \left(\frac{u_{m-1,n,k} - u_{m-1,n-1,k}}{\Delta \eta} \right) u_{m,n,k} > \bar{v}_{m,n,k}^{\xi\eta} > 0 \end{cases} \quad (3)$$

En plano vertical, las capas adyacentes están acopladas por la advección vertical y el término de viscosidad vertical. En la dirección vertical, el término *eddy viscosity* en flujos estratificados la advección puede ser dominante porque el intercambio turbulento se reduce. Para esta se usa una diferencia central de segundo orden (4).

$$w \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{m,n,k} = \bar{w}_{m,n,k} \left[\frac{u_{m,n,k+1} - u_{m,n,k-1}}{\frac{1}{2} h_{m,n,k-1} + h_{m,n,k} + \frac{1}{2} h_{m,n,k+1}} \right] \quad (4)$$

Donde $h_{m,n,k}$ denota el espesor de la capa con el índice k definido por $h_{m,n,k} = z_k - z_{k-1}$.

Los términos de viscosidad vertical están discretizados por la ecuación (5).

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_v \frac{\partial u}{\partial z} \right) \Big|_{m,n,k} = \frac{\nu_v|_{m,n,k+1}}{h_{m,n,k}} \left(\frac{u_{m,n,k+1} - u_{m,n,k}}{\frac{1}{2} (h_{m,n,k+1} + h_{m,n,k})} \right) \pm \frac{\nu_v|_{m,n,k}}{h_{m,n,k}} \left(\frac{u_{m,n,k} - u_{m,n,k-1}}{\frac{1}{2} (h_{m,n,k} + h_{m,n,k-1})} \right) \quad (5)$$

Donde el eddy viscosiy vertical se calcula en la interfaz de la capa.

Condiciones iniciales

Se tuvo en cuenta la descarga promedio del canal del Dique en épocas: húmeda y seca, que tuvo una variación de caudales de 125 m³/s hasta 150 m³/s [16], respectivamente. En cuanto al forzador de marea, se localizaron tres fronteras abiertas con 10 componentes armónicos micromareales, correspondientes a la bahía de Cartagena (K1, M2, O1, P1, SSA, N2, S2, MF, Q1, NO1) [19], entre otros forzadores como la salinidad en 35 partes por mil (ppt) y temperatura en 27 °C en la bahía de Cartagena [4]. Por otra parte, se tomó la velocidad y dirección del viento promedio de 3.017 m/s y en dirección suroeste [10]. El tiempo de simulación se configuró de 65 días; de estos, los cinco primeros días son de estabilización del sistema, en los cuales los errores que se deben a aproximaciones se aminoran hasta lograr la estabilidad natural.

Dominios de cálculos

La bahía de Cartagena, en promedio, tiene una profundidad de 16 m, con profundidades máximas hasta de 30 m y mínimas de hasta más o menos 1 m, cerca de las orillas y en el sector de la desembocadura del canal del Dique, que cuenta con un ancho aproxima-

mente de 100 metros, y con profundidades que varían entre 1 a 3 m dentro del canal. En la Fig. 5 se muestra una batimetría de la zona.

Se construyó una malla de cálculo curvilínea en la horizontal, que se ajusta a la forma y los requerimientos para la simulación, la malla se conforma por un total de 122 por 102 celdas, con celdas de hasta 50 m en la desembocadura del canal (Fig. 6, a). En la vertical se usaron coordenadas Z ; se discretizó en 40 capas distribuidas en porcentajes diferentes con respecto a la distancia en la vertical, con el fin de lograr el mayor número de capas en la desembocadura del canal, obteniendo una distribución de 0,20 m en las capas más superficiales y 25 m en las más profundas; sin embargo, en la desembocadura, la última capa es de 1.7 m, consiguiendo así un nivel de resolución óptimo en la vertical para la descripción de la estratificación (Fig. 6, b).

3. RESULTADOS

Validación

Para la validación del modelo hidrodinámico se tuvo presente la frecuencia de salida de los datos de la simulación, que es cada hora, por lo que se hizo necesario promediar los datos de salinidad y niveles del agua originales. En los resultados de profundidad se obtuvo una correlación de 97%, como se muestra en la Fig. 7, a pesar de que los datos simulados son con datos promedios. En general, los resultados de la simulación en la bahía obtuvieron niveles entre 0.01 a 0.28 m.

De modo similar, para las mediciones de salinidad en el punto de control en el canal del Dique se tiene una variación de 0 a 17 ppt, mientras que en la simulación se obtuvo una variación entre 3.25 y 17.34 ppt; sin embargo, se observa en la Fig. 8 una similitud en la variación de los datos. Debido a que las unidades de salinidad del sensor y de la simulación son diferentes, los datos fueron normalizados para su comparación.

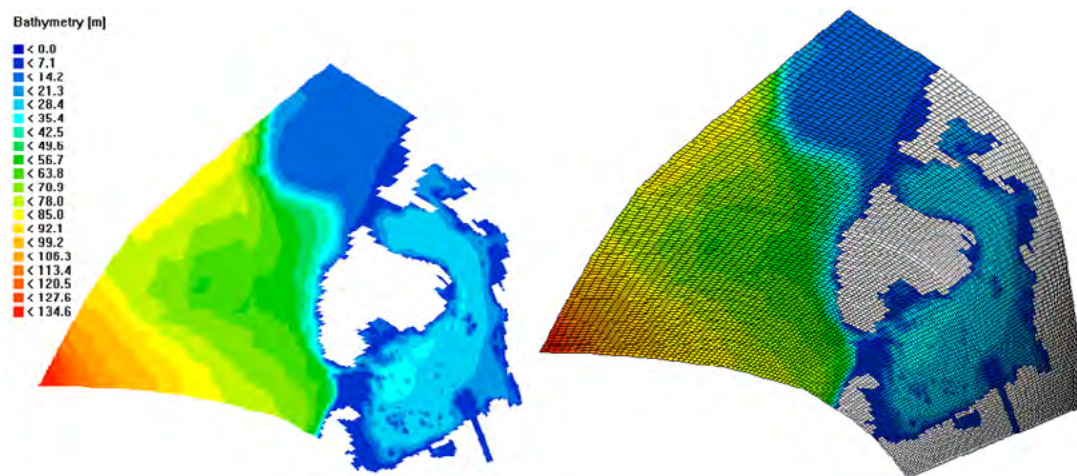


Fig. 5: Batimetría de la zona de simulación.

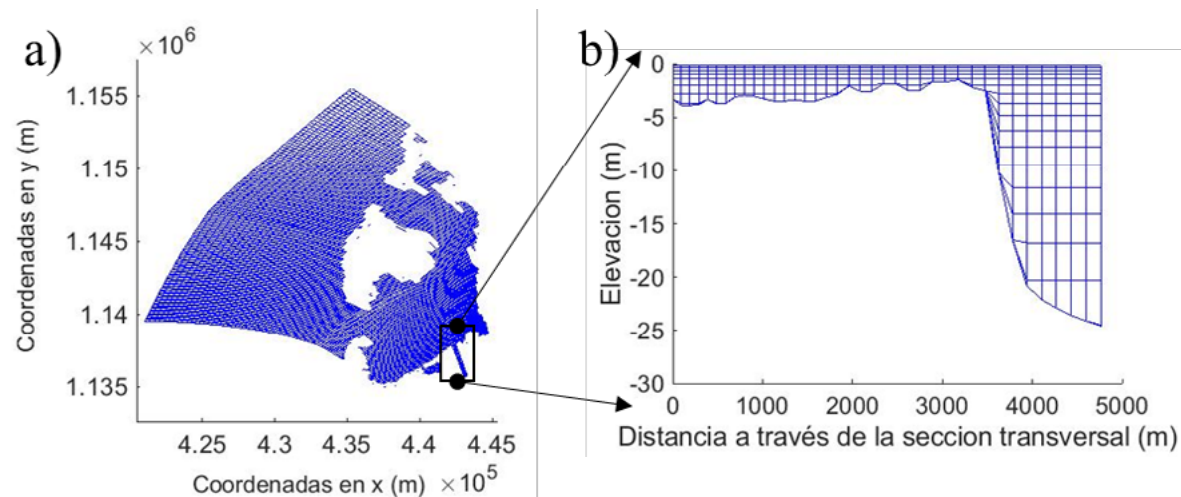


Fig. 6: a) Malla hidrodinámica en la horizontal. b) Malla hidrodinámica en la vertical.

Simulación

La simulación se realizó durante 65 días, en este periodo de tiempo la estabilidad del modelo se logra cuando la variación en la turbulencia es mínima; dicho estado se alcanza durante los 2 a 5 primeros días de simulación del modelo, como se observa en la Fig. 9. Las variaciones u oscilaciones que se observan corresponden a lo generado por los cambios inducidos por el régimen de la marea.

En la Fig. 10a se observa la distribución de la salinidad en la bahía de Cartagena, teniendo en cuenta las condiciones de viento y caudal promedio correspondiente a la época húmeda. La Fig. 10b es una vista de las capas inferiores de aproximadamente un metro de profundidad, que demuestra que el agua proveniente del canal del Dique se encuentra mayormente en las capas más superficiales. El flujo del canal, entre otras cosas, determina la dispersión de la salinidad en la bahía, pero esta también se ve influenciada por el viento, notando como la salinidad se distribuye en mayor parte hacia la salida por Bocagrande, como se muestra en la Fig. 10a.

DOI: <https://doi.org/10.21501/21454086.2950>

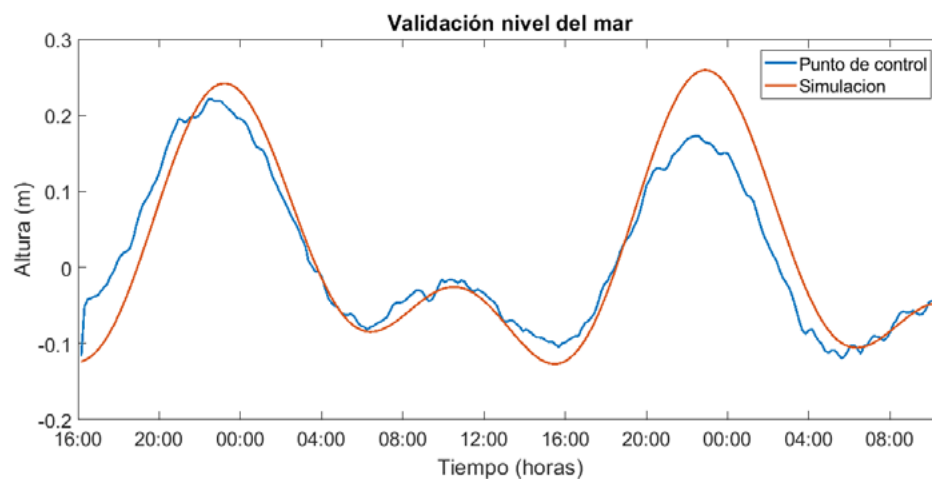


Fig. 7: Validación de marea con el punto de control.

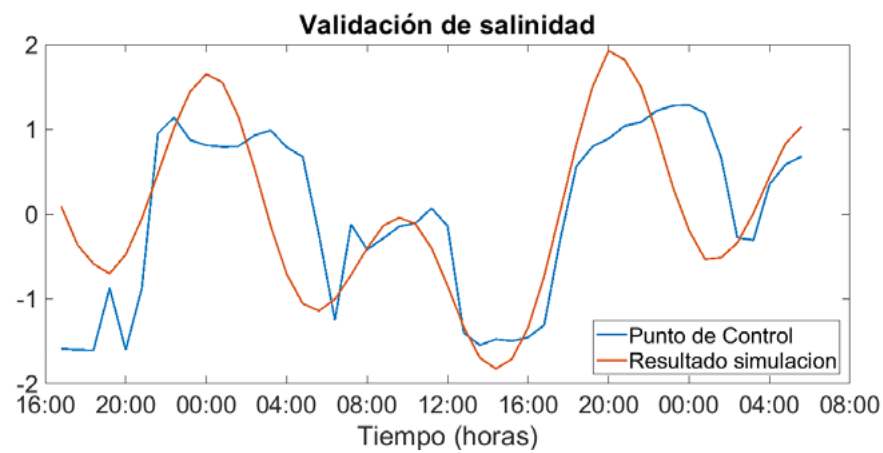


Fig. 8: Validación de salinidad con el punto de control.

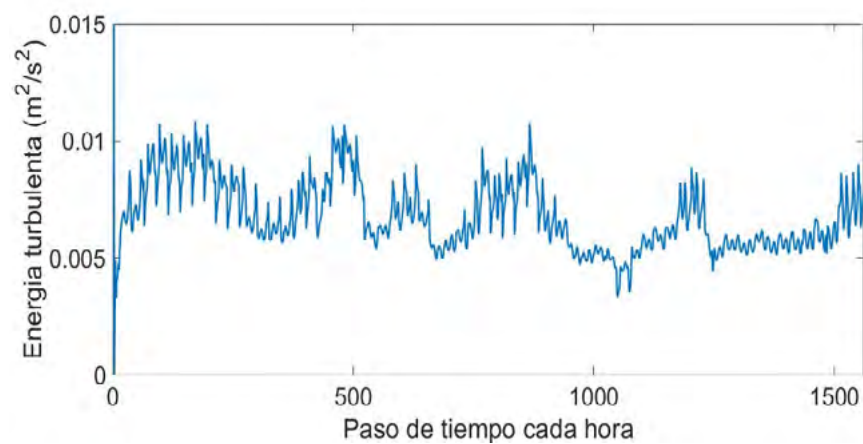


Fig. 9: Variación de la turbulencia.

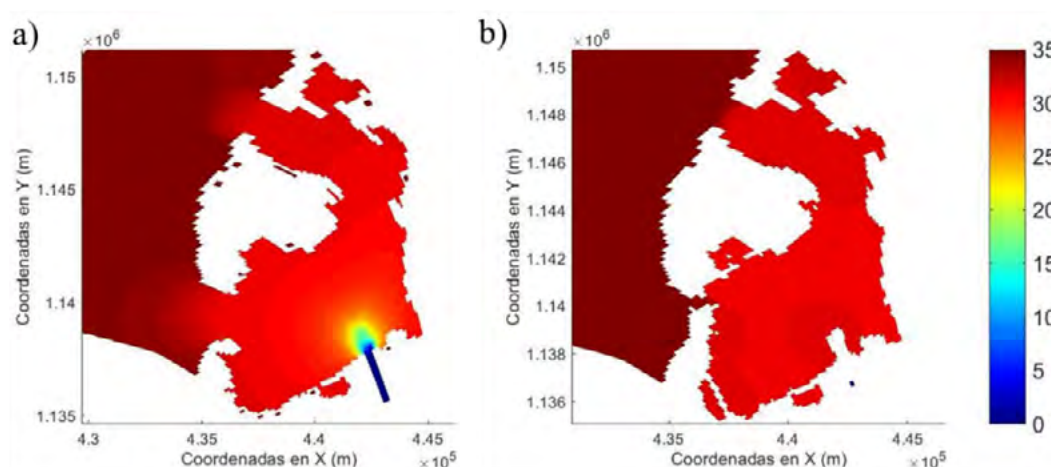


Fig. 10: a) Distribución de salinidad en la superficie. b) Distribución de salinidad a un metro de profundidad.

En cuanto a la salinidad en la desembocadura del canal del Dique, aunque en la superficie se encuentren las salinidades más bajas, debajo de esta se ve la intrusión del agua proveniente de la bahía, aproximadamente 1.2 km hacia dentro del canal, en las condiciones de simulación, evidenciando la estratificación de los flujos con diferente densidad dadas por la salinidad.

Los resultados de la Fig. 11b, que corresponden específicamente al punto de la desembocadura del canal a la bahía, muestran que la dispersión de la salinidad en la vertical es estratificada, esto se da por la diferencia de densidades entre el agua dulce y el agua salada, lo que causa que el agua dulce menos densa se encuentre en la capa superior. También se podría afirmar, de acuerdo con [11, p. 85], que la pluma turbia está asociada a la distribución de la salinidad debido a las mediciones realizadas, que mostraron una alta correlación entre estos parámetros [11, p. 85], y que la concentración del agua dulce en la desembocadura del canal determina la dinámica de la sedimentación en este punto.

La estratificación en la desembocadura puede presentar variaciones que se atribuyen, principalmente, al aporte de agua dulce del canal del Dique, en las épocas seca, de transición y húmeda que se presentan en la

región. Con respecto a los datos simulados en este trabajo, la dinámica de la estratificación se presenta en la Fig. 12, donde se muestran las isohalinas de 20 ppt con respecto a los caudales bajos, promedio y máximos en la simulación.

4. DISCUSIÓN

El modelo hidrodinámico Delft3D ha sido ampliamente usado en el ámbito mundial para el estudio de estos tipos de sistemas [20], [21], [22], [23], [24], [25], [26], mostrando su robustez desde condiciones promedio o típicas, hasta eventos extremos, lo que se confirma con los resultados del presente trabajo, que muestran un porcentaje de correlación alto 97% con respecto a las variables de salinidad y niveles de marea. Entre los estudios internacionales en los que se ha usado este software, se encuentra [27] en el estuario de Yangtsé en China, en donde se analizó la interacción flujo-sedimento en los perfiles verticales dentro de la zona de máxima turbidez (TMZ), obteniendo además las corrientes verticales y cómo estas afectan la intrusión salina mediante el modelo hidrodinámico Delft3D.

DOI: <https://doi.org/10.21501/21454086.2950>

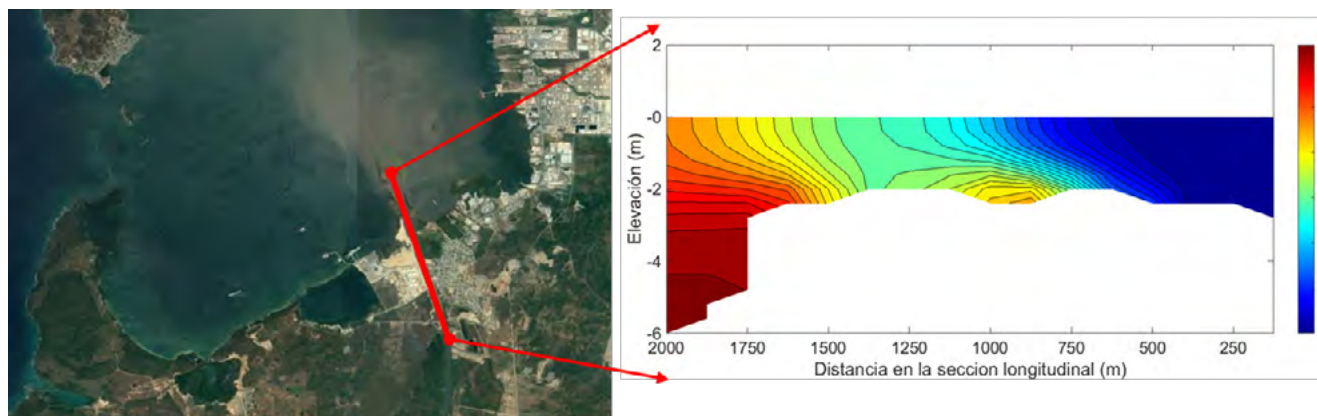


Fig. 11: a) Ubicación de la sección transversal en el área de estudio. b) Distribución de salinidad en la vertical.

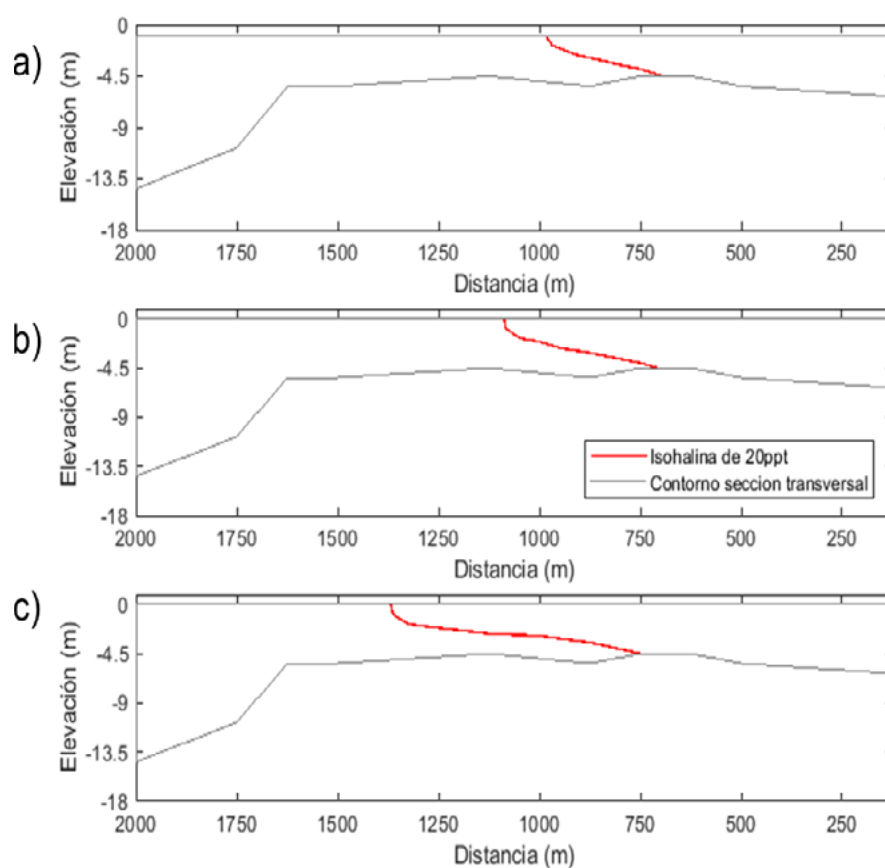


Fig. 12: Isohalina 20 ppt a diferentes caudales. a) Caudal bajo. b) Caudal promedio. c) Caudal máximo.

Son pocos los estudios que se han basado en los patrones de salinidad de la desembocadura del canal del Dique. No obstante, [11, p. 87] presenta la relación de la salinidad basada en lo obtenido con respecto a los patrones de turbidez en la bahía, resultados que se atribuyen a la magnitud del caudal del canal del Dique, que produce un efecto de flotación en la capa superior de las aguas, concordando con los datos derivados de esta investigación con respecto a la estratificación en la desembocadura.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se determinó la estratificación en la desembocadura del canal como se muestra en la Fig. 12, además está dada por la predominancia del caudal del canal, teniendo en cuenta que se simuló bajo condiciones promedio, considerando los picos de mínimos y máximos caudales; en comparación con el régimen de la micromareal de la bahía. Esta condición se considera importante para llevar a cabo la cuantificación de la estratificación y en futuras investigaciones determinar el potencial de la zona para la producción de energía a partir de gradiente salino (EGS). El uso de modelos numéricos como Delft3D son útiles debido a su capacidad de recrear y predecir bajo condiciones dadas, la hidrodinámica que se presente en ecosistemas estuarinos como la desembocadura del canal del Dique a la bahía de Cartagena, sin embargo, un criterio de selección de modelos sería fundamental para la escogencia del más adecuado a las condiciones presentes, tanto geográficas, meteomarinas e hidrodinámicas, propias del estuario del canal del Dique a la Bahía de Cartagena.

REFERENCIAS

- [1] D. Prichard, "What is an estuary?: physical viewpoint in: Estuaries" *American Association for the Advancement of Science*, pp. 3-5, 1967.
- [2] S. Farreras, *Hidrodinámica de Lagunas Costeras*, México: Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, 2006.
- [3] K. Dyer, *Estuaries, a physical introduction*, West Sussex: WILEY, 1997.
- [4] H. Savenije, *Salinity and Tides in Alluvial Estuaries*, Amsterdam: ELSERVIER, 2005.
- [5] N. Yin Yip, D. Brogioli, H. V. M. Hamelers and K. Nijmeijer, "Salinity Gradients for Sustainable Energy: Primer, Progress, and Prospects", *Environmental Science & Technology*, vol. 50, no. 22, pp. 12072-12094. DOI: 10.1021/acs.est.6b03448
- [6] J. Pagliardini, G. M., T. Gutiérrez, D. Zapata, A. Jurado, J. Garay and G. Verenette, "Síntesis del proyecto Bahía de Cartagena", *Boletín Científico CIOH*, vol. 4, no. 4, pp. 49-110, 1982. Recuperado de http://cecoldodigital.dimar.mil.co/92/1/dimarcioh_1982_boletincioh_04_49-110.pdf
- [7] S. Lonin, "Circulación de las aguas y transporte de contaminantes en la Bahía de Cartagena", *Boletín Científico CIOH*, no. 16, pp. 25-56, 1995. Recuperado de http://cecoldodigital.dimar.mil.co/150/1/dimarcioh_1995_boletincioh_16_25-56.pdf
- [8] S. Lonin y L. Giraldo, "Influencia de los efectos térmicos en la circulación de la bahía interna de Cartagena", *Boletín Científico CIOH*, no. 17, pp. 47-56, 1997. Recuperado de http://cecoldodigital.dimar.mil.co/157/1/dimarcioh_1996_boletincioh_17_47-56.pdf
- [9] A. De Lisa, "Estudio de la hidrodinámica y renovación de las aguas del caño del Zapatero", trabajo de grado, Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla" (ENAP), 2003.
- [10] J. G. Rueda Bayona, L. J. Otero Díaz, y J. O Pierini, "Caracterización hidrodinámica en un estuario tropical de Suramérica con régimen micromareal mixto", *Boletín Científico CIOH*, vol. 31, pp. 159-174, 2013.

- [11] S. Lonin, C. Parra Llanos, C. A. Andrade Amaya y Y. F. Thomas, "Patrones de pluma turbia del canal del Dique en la bahía de Cartagena", *Boletín Científico CIOH*, no. 22, pp. 77-89, 2004.
- [12] Deltares, Delft3D-FLOW, User Manual, Netherland: Deltares, 2014.
- [13] L. Marriaga y J. Echeverry, "Análisis de la evolución del fondo marino y cambios en la línea de costa, en el área de influencia de la desembocadura del Canal del Dique", *Boletín Científico CIOH*, pp. 158-178, 2011.
- [14] A. Gómez Giraldo, A. F. Osorio Arias, F. M. Toro, J. D. Osorio Cano y O. A. Álvarez, "Efecto del cambio de los caudales del Canal del Dique sobre el patrón de transporte horizontal en la bahía de Barba-coas", *Boletín Científico CIOH*, no. 27, pp. 90-111, 2009.
- [15] C. H. Grisales López, J. A. Salgado Mesa y R. J. Morales Babra, "Proceso de intercambio de masas de agua de la bahía de Cartagena (Caribe colombiano) basado en la medición de parámetros oceanográficos", *Boletín Científico CIOH*, no. 32, pp. 47-70, 2014.
- [16] R. Morales y M. Mestres, "Efectos de la descarga estacional del Canal del Dique en el mecanismo de intercambio de aguas de una bahía semicerrada y micromareal: Bahía de Cartagena, Colombia", *Boletín Científico CIOH*, pp. 53-74, 2012. DOI: <https://doi.org/10.26640/22159045.243>
- [17] G. S. Stelling, *On the construction of computational methods for shallow water flow problems*, Holanda: Institutional Repository, 1983.
- [18] J. C. Eijkeren, B. J. de Haan, G. S. Stelling and T. L. van Stijn, "Notes on Numerical Fluid Mechanics, Linear upwind biased methods", *Numerical Methods for Advection-Diffusion Problems*, vol. 45, pp. 55-91, 1993.
- [19] R. Morales, "Clasificación e identificación de las componentes de marea del Caribe colombiano", *Boletín Científico CIOH*, no. 22, pp. 105-114, 2004.
- [20] V. Ramos, R. Caraballo and J. V. Ringwood, "Application of the actuator disc theory of Delft3D-FLOW to model far-field hydrodynamic impacts of tidal turbines", *Renewable Energy*, vol. 139, pp. 1320-1335, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.02.094>
- [21] S. Waldman, S. Bastón, R. Nimalidinne, A. Chatzi-rodou, V. Venugopal and J. Side, "Implementation of tidal turbines in MIKE 3 and Delft3D models of Pentland Firth & Orkney Waters", *Ocen & Coastal Management*, vol. 147, pp. 21-36, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.04.015>
- [22] A. Rhaman and V. Venugopal, "Parametric analysis of three dimensional flow models applied to tidal energy sites in Scotland" *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, vol. 189, pp. 17-32, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2017.02.027>
- [23] M. Des, M. de Castro, M. Sousa, J. M. Dias and M. Gómez-Gesteira, "Hydrodynamics of river plume intrusion into an adjacent estuary: The Minho River and Ria de Vigo", *Journal of Marine Systems*, vol. 189, pp. 87-97, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2018.10.003>
- [24] W. van Gerwen, B. Borsje, J. Damveld and S. Hulscher, "Modelling the effect of suspended load transport and tidal asymmetry on the equilibrium tidal sand wave height", *Coastal Engineering*, vol. 136, pp. 56-64, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2018.01.006>
- [25] K. Hu, Q. Chen, H. Wang, E. K. Hartig and P. M. Orton, "Numerical modeling of salt marsh morphological change induced by Hurricane Sandy", *Coastal Engineering*, vol. 132, pp. 63-81, 2018. DOI: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378383917300327>

- [26] U. Besr, M. Van de Wengen, J. Dijkstra, P.W.J.M. Willemen, B. W. Borsje and D. J. A. Roelvink, "Do salt marshes survive sea level rise? Modelling wave action, morphodynamics and vegetation dynamics", *Environmental Modelling & Software*, vol. 109, pp. 152-166, 2018.
- [27] Y. Wan and L. Wang, "Numerical investigation of the factors influencing the vertical profiles of current, salinity and SSC within a turbidity maximum zone" *International Journal of Sediment Research*, vol. 32, no. 1, pp. 20-33, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2016.07.003>
- [28] C. I. Vargas, N. Vaz and J. M. Dias, "An evaluation of climate change effects in estuarine salinity patterns: Application to Rias de Aveiro shallow water system", *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, vol. 189, pp. 33-45, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2017.03.001>
- [29] S. Orseau, S. Lesourd, N. Huybrechts and A. Gardel, "Hydro-sedimentary processes of a shallow tropical estuary under Amazon influence. The Mahury Estuary, French Guiana", *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, vol. 189, pp 252-266, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2017.01.011>