

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

Effects of fluctuating river discharge on the water exchange mechanism of a semi-enclosed micro-tidal bay: Cartagena Bay, Colombia

Fecha de recepción: 2012-01-25 / Fecha de aceptación: 2012-08-23

Ricardo Molares¹ y Marc Mestres^{2 y 3}

¹ Facultad de Oceanografía, Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla", Isla de Manzanillo, Cartagena, Colombia. Correo electrónico: ricardomolares@yahoo.com. Tel: +57(5) 672 53 89.

² Laboratori d'Enginyeria Marítima (LIM-UPC), Universitat Politècnica de Catalunya. C/ Jordi Girona 1-3, Mòdul D1, 08034 Barcelona, Spain. Correo electrónico: marc.mestres@upc.edu. Tel: 34 93 401 69 00. Fax: 34 93 401 65 04.

³ Centre Internacional d'Investigació dels Recursos Costaners (CIIRC). C/ Jordi Girona 1-3, Mòdul D1, 08034 Barcelona, Spain.

Molares, R. y Mestres, M. 2012. 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. Bol. Cient. CIOH (30): 53-74.

RESUMEN

Las características mareales de la Bahía de Cartagena (Colombia), su morfología y la fluctuación estacional del caudal de descarga del Canal del Dique modifican el mecanismo de intercambio de agua de la bahía con el mar abierto a través de dos entradas: Bocagrande y Bocachica. Con el fin de estudiar el proceso de intercambio de agua, tres escenarios diferentes fueron diseñados y numéricamente modelados, utilizando el Sistema de Modelación Regional del Océano (ROMS_AGRIF).

Los resultados mostraron que las fluctuaciones del caudal de descarga del Canal del Dique modifican fuertemente el régimen de corrientes de flujo y reflujo a través de las entradas de la bahía. Considerando el incremento sostenido en la descarga del río (de bajo a alto caudal de descarga) a lo largo del año y la intensidad de la corriente promedio que fluye hacia afuera de la bahía (reflujo) a través de Bocagrande, esta corriente aumentó hasta un 60 %, mientras que las corrientes dirigidas hacia la bahía (flujo) a través de Bocachica, experimentaron variaciones entre el 23 % (en el sector profundo de la entrada-canal de navegación) y 50 % (en la sección de agua someras de esta entrada).

Durante la época de alta rata de descarga del Canal del Dique, a través de la entrada de Bocagrande al noroeste de la bahía, el flujo de masas de agua es generalmente dirigida hacia afuera de la bahía. Esto es mayormente debido a la presencia de La Escollera, que se extiende entre la isla Tierrabomba y el continente, la cual actúa como una pared que previene el influjo de las aguas oceánicas densas sobre el fondo. Al mismo tiempo, el agua mezclada y menos densa en la superficie, es empujada fuera de la bahía por la corriente inducida por la descarga del Canal del Dique.

Al suroeste de la bahía (Bocachica) se identifican dos regímenes de intercambio de masas. En la sección somera, cercana al continente, el régimen es similar al detectado en Bocagrande, y también al observado en las capas superficiales (0 a 6 m) sobre el canal navegable en Bocachica. En las capas profundas de este canal, el flujo de agua se dirige hacia la bahía.

Palabras clave: Bahía de Cartagena, fluctuación estacional, intercambio de aguas, Sistema de Modelación Regional del Océano.

ABSTRACT

The tidal characteristics of Cartagena Bay (Colombia), its morphology and the flow rate fluctuation of the Dique Channel discharge throughout the year, modify the water exchange mechanism of the bay with the open sea through two entrances (Bocagrande and Bocachica). In order to study the water exchange process, three different scenarios are designed and numerically modelled using the Regional Ocean Modelling System (ROMS_AGRIF).

The results show that fluctuations of the Dique Channel flow rate discharge strongly modify the underlying ebb-and-flood current regime through the entrances of the bay. Considering the annual increment of the river discharge (from low to high flow rate discharge), the intensity of the average currents flowing out of the bay through Bocagrande can increase up to a 60 %, while currents entering the bay through Bocachica experiment variations between 23 % (in the deep navigational channel sector) and 50 % in the shallower section.

During the high discharge rate season of the Dique Channel, through Bocagrande entrance at the northwest of the bay, the water mass flux is generally directed out of the bay. This is largely due to the presence of The Escollera (submersed dike), which is located between the Tierrabomba island and the mainland; it acts as a wall that prevents the influx of denser oceanic waters. At the same time, the mixed and less dense water on the surface is pushed out of the bay by the current induced by Dique Channel.

Two water mass exchange regimes were identified at the southwest of the bay (Bocachica). In the shallow water section, closest to the mainland, the regime is similar to that detected in Bocagrande, and also observed in the surface layers (0 to 6m) on the navigational channel in Bocachica. In the deep layers of the channel, the water flow is directed toward the bay.

Key words: floating breakwaters; wave attenuation; coastal protection structures.

INTRODUCCIÓN

Entre 1996 y 1998 el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH) empleó el Modelo Oceánico de Princeton [1] acoplado a un modelo atmosférico de mesoescala [2] para simular la circulación del Mar Caribe, con el propósito de obtener las condiciones de frontera para áreas de interés locales; una de esas áreas de interés fue la Bahía de Cartagena. Para modelar el campo hidrodinámico de la Bahía, fue implementado el modelo CODEGO [3], el cual fue basado en el modelo MECCA (*Model of Estuarine and Coastal Circulation Assessment*) [4].

Casi simultáneamente (1998–2002), un modelo matemático (eutrofización/régimen de oxígeno) para las áreas costeras más densamente pobladas de la costa Caribe colombiana, incluyendo la Bahía de Cartagena, fue diseñado. Este modelo fue construido con bloques hidrodinámicos y biogeoquímicos, con el propósito de evaluar alternativas de ingeniería para el mejoramiento de la calidad de aguas y régimen de oxígeno de la Bahía.

De acuerdo con estos estudios, el principal impacto de la descarga del Canal del Dique en la Bahía de Cartagena, está probablemente relacionado con su rol en los regímenes hidrodinámicos y químicos del cuerpo de agua [5]. La descarga de agua dulce representa un fuerte suministro de nitrógeno (N), fósforo (P) y sedimentos que determinan la transparencia del agua de la bahía. Adicionalmente, la fuerte pycnoclina superficial (0 a 4 m) que existe en la bahía, previene el intercambio vertical entre las aguas superficiales y profundas. Como resultado, las aguas contaminadas que viajan por el Canal del Dique, una vez descargadas en la bahía se propagan en esta en los límites de la capa superficial menos densa, restringiendo la capa fótica.

[5] Propuso algunas alternativas para mejorar la calidad de aguas de la Bahía de Cartagena, una de ellas era el cerramiento de la descarga del Canal del Dique, encontrando que el déficit de oxígeno desaparece.

De acuerdo con sus resultados, de realizarse esta modificación, al sur de la bahía externa, en donde la renovación de aguas es lenta y donde están situadas la mayor cantidad de fuentes de descargas industriales, el oxígeno en las capas del fondo durante la estación de lluvias sería más

de 1,5 ml/l; mientras que en la bahía interna, ésta sería de más de 2,5 ml/l (el oxígeno por debajo de 1 ml/l causa la mortalidad de varios organismos acuáticos aeróbicos).

A diferencia de la calidad del agua en la Bahía de Cartagena, la cual es influenciada por la descarga fluvial, el aumento del nivel del mar ha atraído mucha atención en Cartagena, teniendo en cuenta que la ciudad se encuentra situada en una zona plana y muy baja, sometida a procesos de subsidencia local [6], determinó una velocidad vertical en el orden de 1,4 mm/año y que durante los últimos años la ciudad ha sufrido de inundaciones periódicas durante octubre a noviembre.

Considerando una estimación del aumento relativo del nivel del mar para Cartagena entre 4,5 y 5,98 mm/año, [7][8][9], y teniendo en cuenta que las inundaciones ocurren durante la época de lluvias (octubre–noviembre), unos centímetros adicionales en el nivel del mar, debido a la descarga del Canal del Dique, podrían tener efectos importantes, considerando que durante esos meses se observa el mayor caudal de descarga a lo largo del año [10].

De otro lado, en la costa norte suramericana el ciclo estacional del nivel del mar tiene un pico en los meses de octubre, incrementando la probabilidad de impactos en la costa [11].

En escenarios específicos como en bahías semicerradas o pequeños estuarios, incrementos en la rata de descarga de ríos pueden resultar en un aumento del nivel del mar [12][13][14].

Considerando cualquier futura alternativa relacionada con el mejoramiento de la calidad de aguas de la Bahía de Cartagena, medidas para prevenir inundaciones [15], medidas de adaptación debido al ascenso del nivel del mar o medidas para controlar la sedimentación en los canales navegables de la bahía [16]; éstas tienen que tener el cuenta la descarga del Canal del Dique y la hidrodinámica de la bahía.

Este estudio analiza el impacto de la descarga del Canal del Dique en el mecanismo de intercambio de aguas de la bahía, tomando en consideración los máximos y mínimos caudales de descarga, así como unos escenarios de cerramiento de esta descarga, usando el Sistema de Modelado Regional del Océano (*Regional Ocean Model System-ROMS_AGRIF V.2.1*) mediante métodos anidación de grillas.

ÁREA DE ESTUDIO

La Bahía de Cartagena (Figura 1), situada en la costa Caribe colombiana, es una bahía semicerrada en la cual el Canal del Dique descarga sus aguas. Se encuentra localizada entre las latitudes 10°26' N y 10°16'N, y entre las longitudes 75°30'W y 75°35'W; en promedio, la bahía tiene 16 km de largo (sur a norte) y 9 km de ancho (oeste a este), con una profundidad promedio de 16 m. Se encuentra flanqueada por la isla Tierrabomba (6,5 X 6 km), que cuenta con una altura máxima de 80 m. La bahía se conecta e intercambia sus aguas con el Mar Caribe a través de dos entradas (Bocachica al

suroeste y Bocagrande al noroeste). La entrada de Bocagrande está parcialmente bloqueada por un dique sumergido (La Escollera), lo que origina en esta entrada una profundidad entre 0,6 y 2,1 m. La entrada ubicada al sur de la bahía tiene tres canales angostos, uno de ellos, el más profundo, es usado como canal de acceso para la navegación (100 m de ancho y 15 m de profundidad); mientras que los otros dos (entre las islas de Abanico, Isla Draga y Punta Barú) son someros, con profundidades entre 0,5 y 2 m, y 600 m de ancho cada uno).

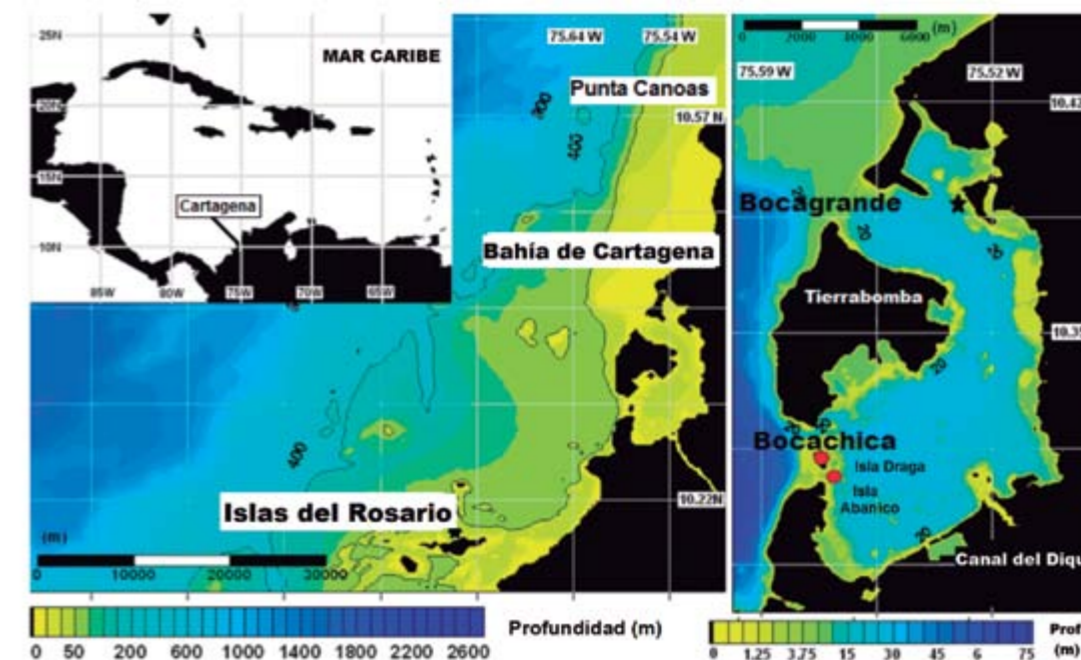


Figura 1. De izquierda a derecha. Vista general del Mar Caribe; sección de la costa colombiana en el Caribe, entre Punta Canoas (Norte) y las Islas del Rosario (Sur). Bahía de Cartagena.

Al sur de la bahía se encuentra la desembocadura del Canal del Dique. Ésta es una descarga fluvial artificial construida en el siglo XVII que conecta el río Magdalena con la ciudad de Cartagena [17], que para la época mejoraba el transporte y comercio a través del Reino de la Nueva Granada (actualmente: Colombia, Panamá, Ecuador y Venezuela).

El Canal del Dique pasa a través de una ecorregión (Figura 2) localizada al oeste del delta del río Magdalena, con un área de alrededor de 4400 km². Esta región está formada de tierras

bajas y pantanos de manglar; está constituida por más de 213 km² de espejos de agua y tierras húmedas de gran significado ecológico, y aproximadamente 870 km² de tierras húmedas deltaicas [15]. La construcción del Canal del Dique produjo cambios mayores en todo el sistema acuático de la Bahía de Cartagena, transformándola de una bahía con ecosistemas coralinos y de aguas transparentes en un estuario fuertemente estratificado con gran cantidad de sedimentos en suspensión, que estacionalmente alteran la salinidad, oxígeno y otros parámetros físicos, químicos y biológicos [18].

El nivel del Canal del Dique depende del nivel del río Magdalena y del nivel del mar en la Bahía de Cartagena y en la bahía de Barbaçoas. El promedio anual del caudal en el río Magdalena es de alrededor de 7163 m³/s del cual, en promedio, cerca del 8 % (540 m³/s) es distribuido al Canal del Dique. Este porcentaje varía dependiendo

de las condiciones del flujo del Magdalena en un rango entre el 9 % para los caudales máximos (1200 m³/s correspondientes a 16000 m³/s del Magdalena) a un 4 % durante los mínimos valores de caudal. En promedio, la Bahía de Cartagena recibe una rata de caudal de agua dulce de 130 m³/s [15].

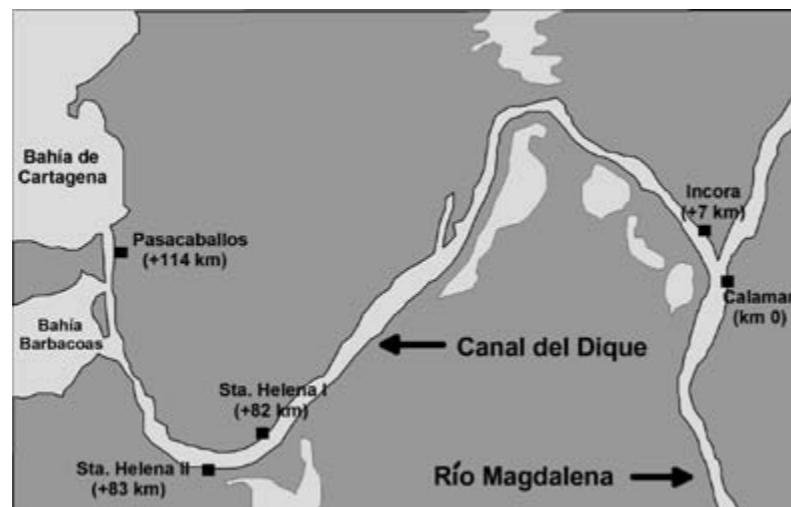


Figura 2. La cuenca del Canal del Dique conecta la Bahía de Cartagena con el río Magdalena a través de diferentes cuerpos de agua. En la figura se aprecian las estaciones de medición de caudales operadas por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (Ideam). (Fuente: [19]).

La variación del caudal del Canal del Dique se advierte en la Figura 3, donde se revela un incremento sostenido de marzo a junio y de septiembre a noviembre, con ratas decrecientes entre estos periodos.

Este comportamiento está estrechamente relacionado con las ratas de precipitación, cuyos máximos se dan en noviembre, con valores mínimos en marzo.

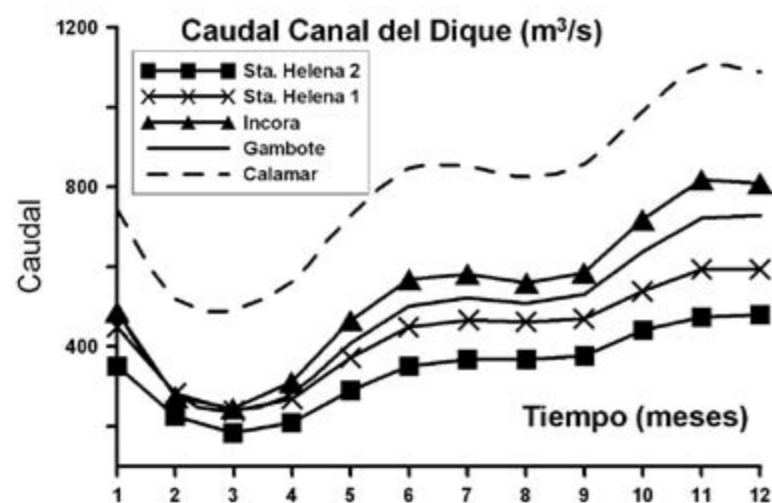


Figura 3. Variación mensual del caudal promedio (1984-2000) en cinco estaciones hidrológicas a lo largo del Canal del Dique. Santa Helena II es la estación más cercana a la desembocadura del Canal del Dique en la Bahía de Cartagena. (Adaptado de [20]).

METODOLOGÍA

El modelo numérico

El Sistema de Modelación Regional Oceánico (ROMS-Shchepetkin and McWilliams, 2005) es un descendiente evolucionado del modelo S-coordinado de la Universidad de Rutgers (SCRUM: [21]). ROMS resuelve las ecuaciones primitivas en un ambiente de rotación centrado en la Tierra, basado en la aproximación de Boussinesq y el balance hidrostático vertical. ROMS está discretizado en coordenadas curvilíneas para la línea de costa y coordenadas de seguimiento del fondo. El esquema matemático de ROMS es explícito, de superficie libre, donde se usan pasos de tiempo cortos para avanzar la elevación del nivel del mar y la inercia barotrópica; con pasos de tiempo más largos que se usan para la temperatura, salinidad y la inercia baroclínica (ROMS emplea un procedimiento especial que promedia el tiempo en dos vías para el modo barotrópico, que satisface la ecuación de continuidad tres dimensional [22]). El algoritmo predictor-corrector del paso del tiempo, especialmente diseñado en ROMS, concede un incremento substancial en el tamaño del paso del tiempo permisible.

La versión usada en el estudio es ROMS_AGRIF, que tiene la capacidad de anidamiento en el cual AGRIF (*Adaptive Grid Refinement in Fortran*) es el método escogido. Una de las mayores ventajas de AGRIF en la grilla anidada es la habilidad de manejar un número arbitrario de grillas fijas y un número arbitrario de niveles anidados [23].

Grilla de cálculo

Se decidió configurar el modelo usando grillas anidadas para tomar en consideración las características oceanográficas de la región por fuera del área de interés (Bahía de Cartagena). La grilla horizontal principal (Figura 4) incluye a la Bahía de Cartagena, extendiéndose hacia el Este entre 75,25°W y costa afuera hasta 76,25°W, con una resolución espacial de 1 km. La grilla local para la Bahía de Cartagena (Figura 4) está anidada con la grilla principal, con una resolución espacial de 300 m, cubriendo el área de interés, y fueron definidas 10 capas en la vertical empleando el sistema de coordenada vertical de seguimiento del terreno, aplicando una función de estrechamiento [21].

Los datos batimétricos en aguas profundas fueron tomados de una base de datos global con una resolución de 2 minutos [24]; mientras que para las aguas poco profundas (0 a 100m) se emplearon datos de levantamientos batimétricos efectuados por el Servicio Hidrográfico Colombiano (CIOH). La batimetría fue suavizada para disminuir errores numéricos que normalmente ocurren cerca de veriles muy pronunciados. Sin embargo, las profundidades en las entradas de la bahía fueron mantenidas, considerando que ésta es una de las características más importantes de la morfología de la cuenca.

Inicialización del modelo

Para la inicialización del modelo en la grilla de gran escala fueron usados los campos climatológicos de temperatura y salinidad a niveles de profundidad estándar para periodos anuales, mensuales y estacionales [25] [26] -WOA05 (World Ocean Atlas 2005-set de datos objetivamente analizados con una resolución de 1°). Para cada WOA z-nivel los valores inexistentes son reemplazados por análisis objetivo. Las matrices resultantes son horizontalmente y verticalmente interpoladas en las grilla de seguimiento del fondo [27].

Forzantes (descarga fluvial, mareas, flujos de superficie)

El modelo incluye el Canal del Dique. Se utilizan las ratas de descarga mínima y máxima, correspondientes a la época seca (diciembre-abril) y a la época húmeda (septiembre-noviembre), respectivamente. De acuerdo con [28], se usan los caudales mínimos y máximos de descarga, 50 y 250 m³/s, respectivamente.

El forzamiento por mareas fue aplicado en las fronteras abiertas, empleando 10 armónicos (M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1, Mf, Mm) tomados de modelo inverso global de mareas 1/4° TPX06 [29]. La marea de Cartagena está clasificada como micromareal, mezclada y principalmente diurna [30].

Las forzantes de superficie (flujo de calor neto de superficie, flujos de agua-evaporación y precipitación, temperatura y salinidad superficial del mar, radiación solar) fueron tomadas de COADS [31]. Las matrices resultantes son interpoladas empleando un método cúbico [27].

Escenarios modelados

Para entender las implicaciones de la descarga del Canal del Dique en la hidrodinámica del la Bahía de Cartagena fueron diseñados tres escenarios así: Alta Descarga del Canal del Dique (ADCD-250 m³/s); Baja Descarga del Canal del Dique (BDCN-50 m³/s); No Descarga del Canal del Dique (NDCD-0 m³/s). Se obtuvieron secciones verticales de las corrientes a lo largo de tres transectos (Figura 4) en las dos entradas de la bahía: Bocagrande (transecto 1) y Bocachica

(transecto 2); y entre el continente y la isla Tierrabomba a lo largo de la latitud 10,35°N (transecto 3), durante un ciclo de marea (sicigia) después de un calentamiento del modelo con 15 días de simulación para lograr la estabilidad de las variables hidrodinámicas y forzando el modelo con la descarga del Canal del Dique y marea. El volumen de agua intercambiado entre la bahía y el Mar Caribe fue calculado usando los escenarios antes mencionados.

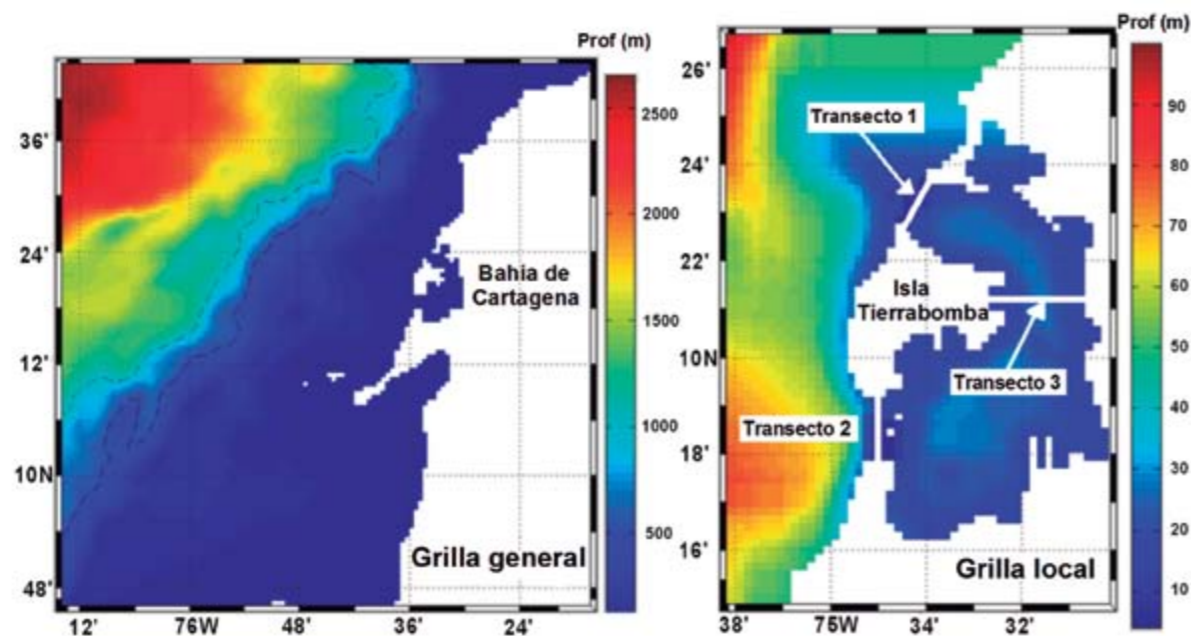


Figura 4. Dominio de las grillas. Izq.: grilla principal; Der.: grilla local.

RESULTADOS

Mecanismo de intercambio de agua sin la descarga del Canal del Dique

Cuando no se considera la descarga del Canal del Dique, el mecanismo de intercambio de aguas se presenta como se muestra en la Figura 5, donde el agua fluye entrando y saliendo de la bahía a través de Bocagrande y Bocachica, de acuerdo con la marea. A lo largo de Bocagrande se observan pequeñas diferencias en cuanto a la dirección y velocidad, dependiendo del estado de

la marea (Figura 6); pero a lo largo de Bocachica las corrientes son vertical y horizontalmente uniformes (Figura 7).

En el transecto 3 se evidencia el cambio de dirección. Aunque la corriente es débil, fuertes corrientes se detectan cerca a la isla Tierrabomba (Figura 8).

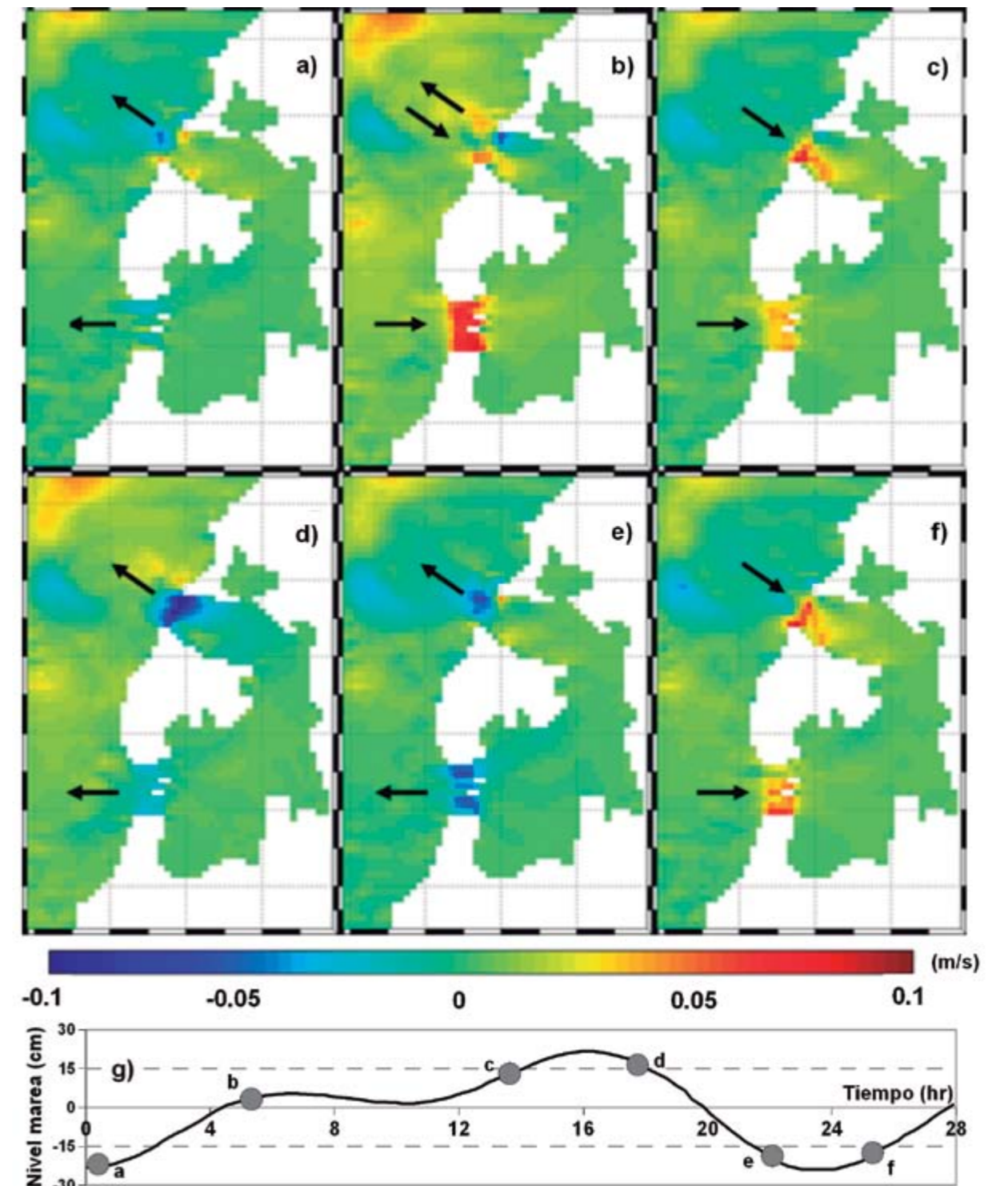


Figura 5. De a) a f) se muestra el componente *u* de la corriente promediado e integrado verticalmente (no se considera la descarga del Canal del Dique). En g) se grafica el correspondiente estado de la marea para cada uno de los regímenes de corrientes; los puntos grises indican la hora a la cual la correspondiente corriente, verticalmente integrada, fue obtenida. Las flechas representan la corriente de flujo y refluxo.

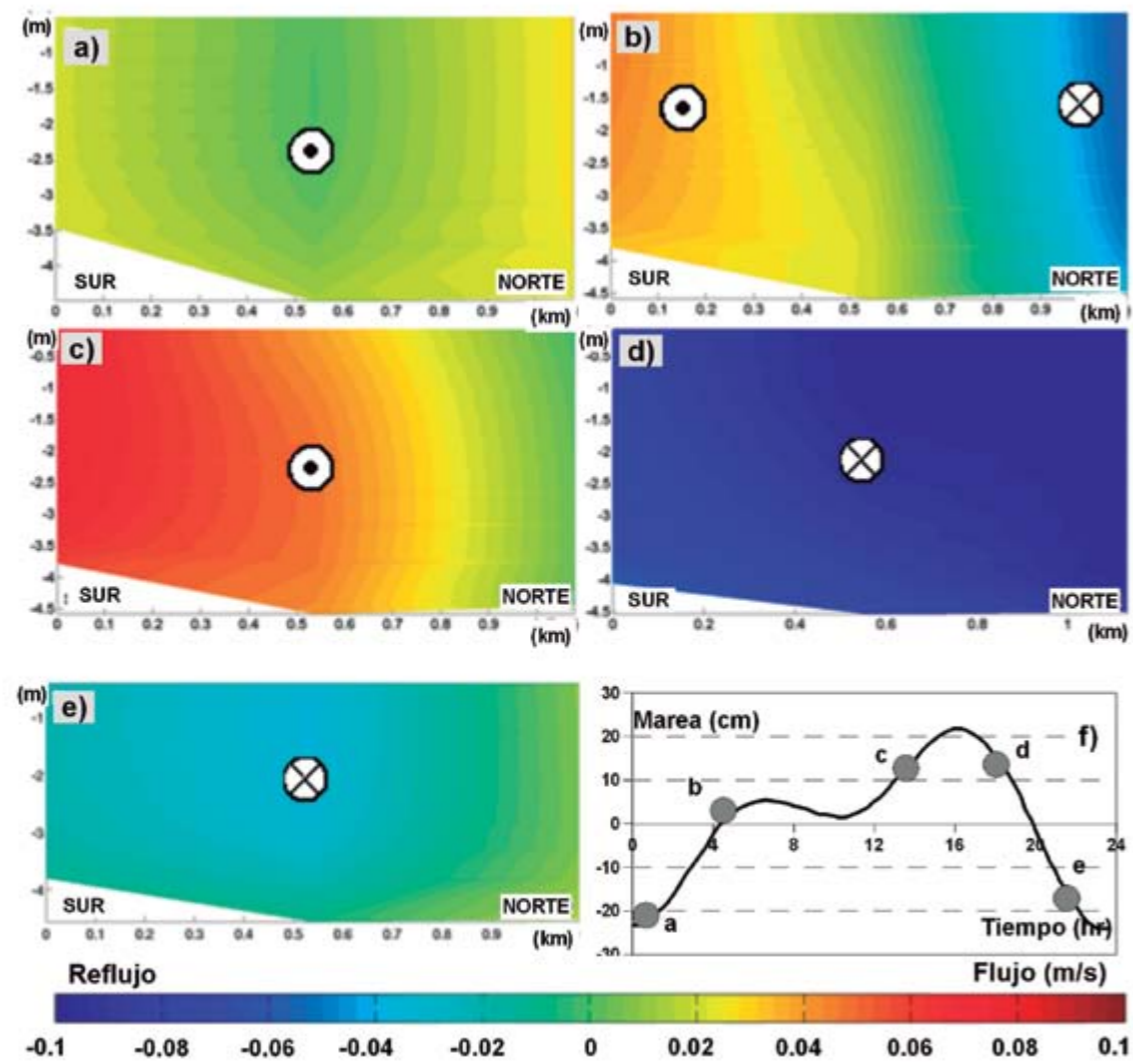


Figura 6. Sección vertical del componente u de la corriente en el transecto 1 (Bocagrande) durante un ciclo mareal; no se considera la descarga del Canal del Dique. La sección empieza (km 0) en la isla Tierrabomba. La X encerrada en un círculo representa la corriente de reflujo (saliendo); el punto encerrado en un círculo representa la corriente de flujo (entrando). En **f** se grafica el ciclo mareal correspondiente; los puntos grises indican la hora a la cual la sección vertical correspondiente es obtenida.

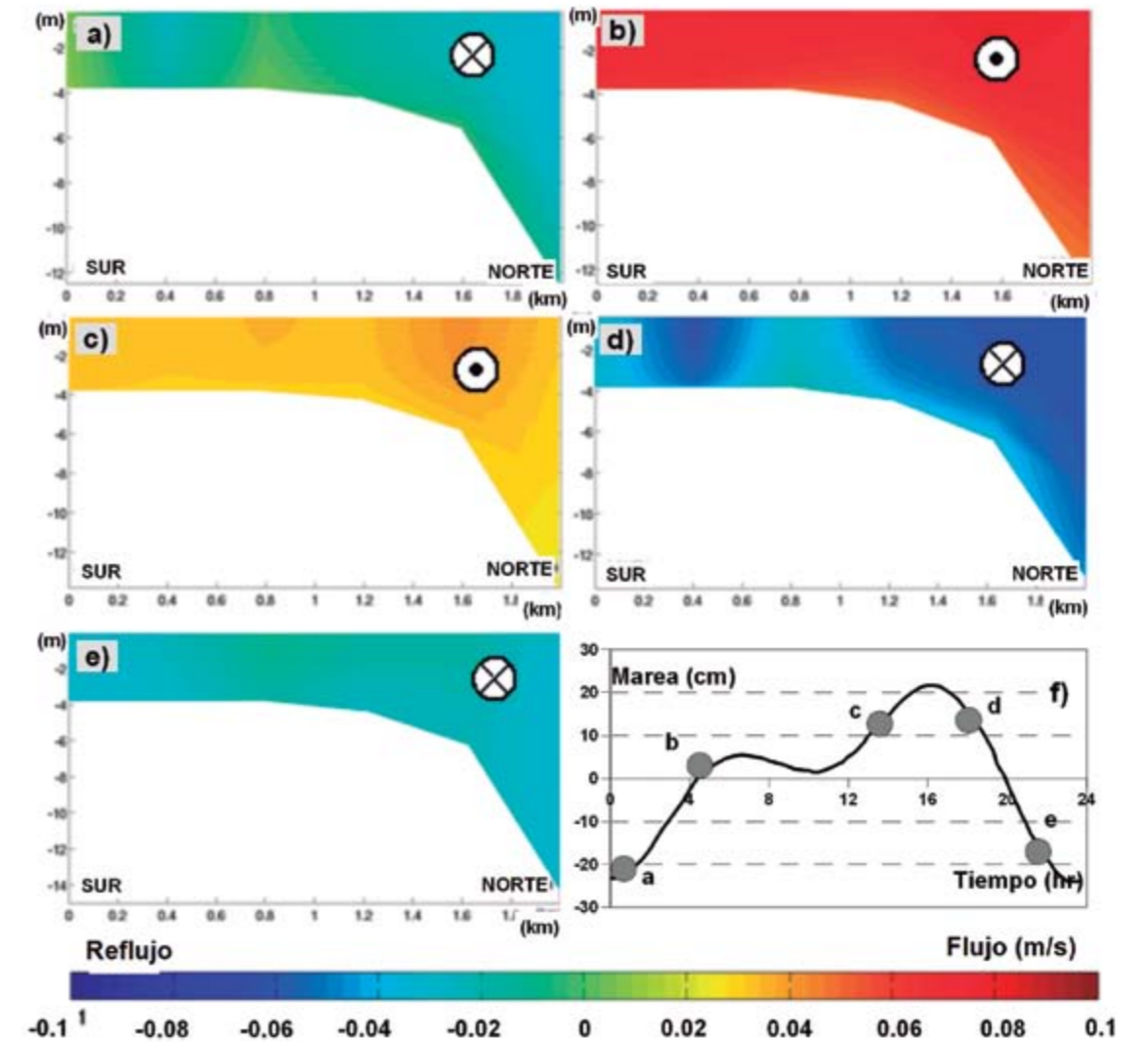


Figura 7. Sección vertical del componente u de la corriente en el transecto 2 (Bocachica) durante un ciclo mareal; no se considera la descarga del Canal del Dique. La sección termina (km 2) en la isla Tierrabomba. La X encerrada en un círculo representa la corriente de reflujo (saliendo); el punto encerrado en un círculo representa la corriente de flujo (entrando). En **f** se grafica el ciclo mareal correspondiente; los puntos grises indican la hora a la cual la sección vertical correspondiente es obtenida.

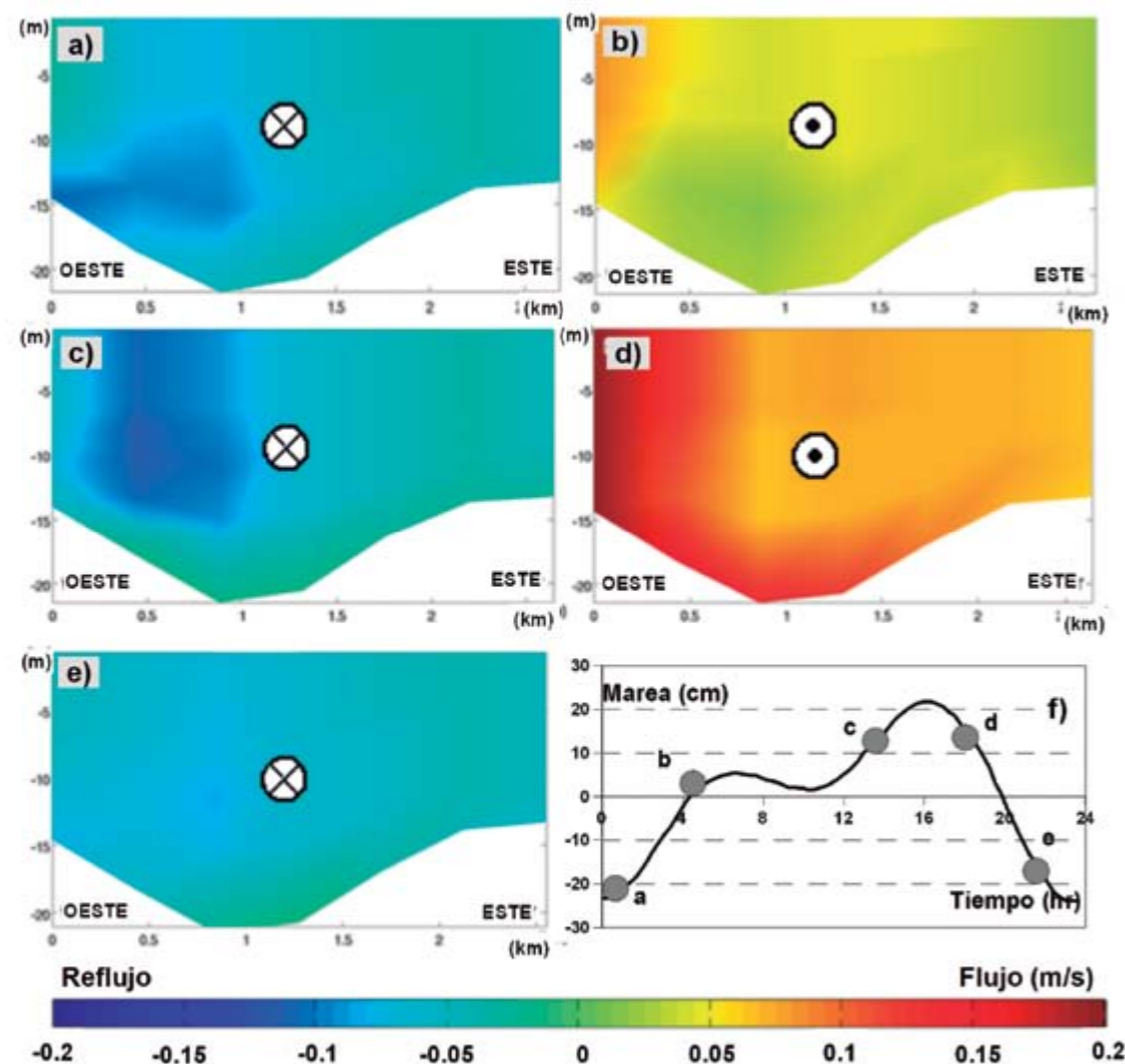


Figura 8. Sección vertical del componente v de la corriente en el transecto 3 ($10,35^{\circ}\text{N}$ —centro de la bahía) durante un ciclo mareal; no se considera la descarga del Canal del Dique. La sección empieza (km 0) en la isla Tierrabomba. La X encerrada en un círculo representa la componente v con dirección sur; el punto encerrado en un círculo representa la componente v con dirección norte. En **f**) se grafica el ciclo mareal correspondiente; los puntos grises indican la hora a la cual la sección vertical correspondiente es obtenida.

Mecanismo de intercambio de aguas considerando la descarga del Canal del Dique

Si se tiene en cuenta la descarga del Canal del Dique, los patrones de intercambio de aguas entre la bahía y el Mar Caribe cambian. El análisis de la componente u promediada e integrada verticalmente (Figura 9) revela el mecanismo de intercambio de la bahía. A través de Bocagrande el agua fluye fuera de la bahía; en Bocachica, a través de la sección somera del transecto (cerca al continente), el agua también fluye hacia afuera, mientras que a lo largo de la sección profunda del transecto (canal de navegación), el agua oceánica entra a la bahía.

Este mecanismo general de intercambio de aguas depende de la marea y del caudal de descarga del Canal del Dique. Comparando la componente u verticalmente integrada obtenida usando BCCD ($50 \text{ m}^3/\text{s}$) en la (Figura 10) con la obtenida utilizando un caudal mayor (ADCD—Fig. 9), se revelan algunas diferencias. En Bocagrande la componente u es débil para un bajo caudal de descarga del Canal del Dique, y se identifican pequeños valores positivos de la componente (Figura 10f) durante el periodo de ascenso de la marea.

En Bocachica, a lo ancho del canal de navegación, la corriente se debilita durante el periodo de descenso de la marea y hasta se observa un cambio en la dirección (Figuras 10b, 10c y 10f). Teniendo en cuenta la descarga del Canal del Dique (ADCD), a continuación se hace una descripción general de la dinámica en los tres transectos escogidos (Fig. 4 der). En la sección 4.3 se cuantifican las diferencias encontradas en la dinámica dependiendo de la descarga (ADCD y BCCD).

Considerando ADCD, durante el ciclo de marea, en Bocagrande el agua fluye principalmente hacia afuera de la bahía; sin embargo, durante el periodo de ascenso de la marea (*flood tide*) la intensidad de la corriente decrece y el agua más densa del océano entra a la bahía a través de las capas profundas, pasando sobre La Escollera (Figura 11). En Bocachica el intercambio de agua muestra el mismo comportamiento en las capas superficiales (0 a 4 m), como en Bocagrande. Sin embargo, la existencia del canal navegable de acceso a la bahía permite la entrada de aguas

oceánicas, generando un patrón de circulación de dos capas. En la superficie, agua menos densa fluye hacia afuera de la bahía, mientras que en las capas profundas el agua oceánica fluye hacia la bahía. Esta dinámica es permanente durante el ciclo de marea (Figura 12). En la mitad de la bahía (transecto 3) el agua de la capa superficial (0 a 5 m) fluye dirigida hacia el norte cerca de Tierrabomba, mientras que cerca al continente ésta circula débil hacia el sur. En las capas profundas la intensidad de la corriente es menor y cambia de dirección siguiendo el ciclo mareal (Figura 13).

Para clarificar lo anterior, en la (Figura 14) se grafican los perfiles verticales de densidad y corriente (en las entradas de la bahía) para los tres escenarios modelados durante la marea baja y la marea alta. La descarga del Canal del Dique forma una capa superficial que puede extenderse hasta los 9 m de profundidad, dentro del cual las corrientes son afectadas por el flujo del Canal del Dique. En las entradas la corriente en las capas densas y profundas se dirige hacia la bahía, balanceando el intercambio de masas de la bahía, como se puede corroborar adicionalmente en las Figuras 11 y 12.

Corrientes de flujo y reflujos

Para encontrar la corriente a lo largo de Bocagrande y Bocachica durante el ciclo de marea, considerando ADCD ($250 \text{ m}^3/\text{s}$), BCCD ($50 \text{ m}^3/\text{s}$), y la inexistencia de la descarga, la velocidad de las corrientes verticalmente integradas se asume que corresponden al reflujos (hacia afuera de la bahía) y flujo (hacia la bahía) en términos de su dirección.

Entonces, en Bocagrande la corriente de reflujos se define como aquella cuya dirección es entre 53° y 233° relativos al cero (0) matemático ($233^{\circ} < \text{DIR} < 53^{\circ}$), mientras que las que no entran en este rango se consideran corrientes de flujo (hacia la bahía). Similarmente, las corrientes en Bocachica son consideradas de reflujos cuando su dirección es entre 90° y 270° ($270^{\circ} < \text{DIR} < 90^{\circ}$), y de flujo para el resto de direcciones (Figura 15).

Para obtener un valor representativo de la corriente en los transectos 1 y 2 las corrientes verticalmente integradas obtenidas en cada nodo a lo largo de los transectos 1 y 2 (transecto 1: 5 nodos; transecto 2: 7 nodos) fueron promediados.

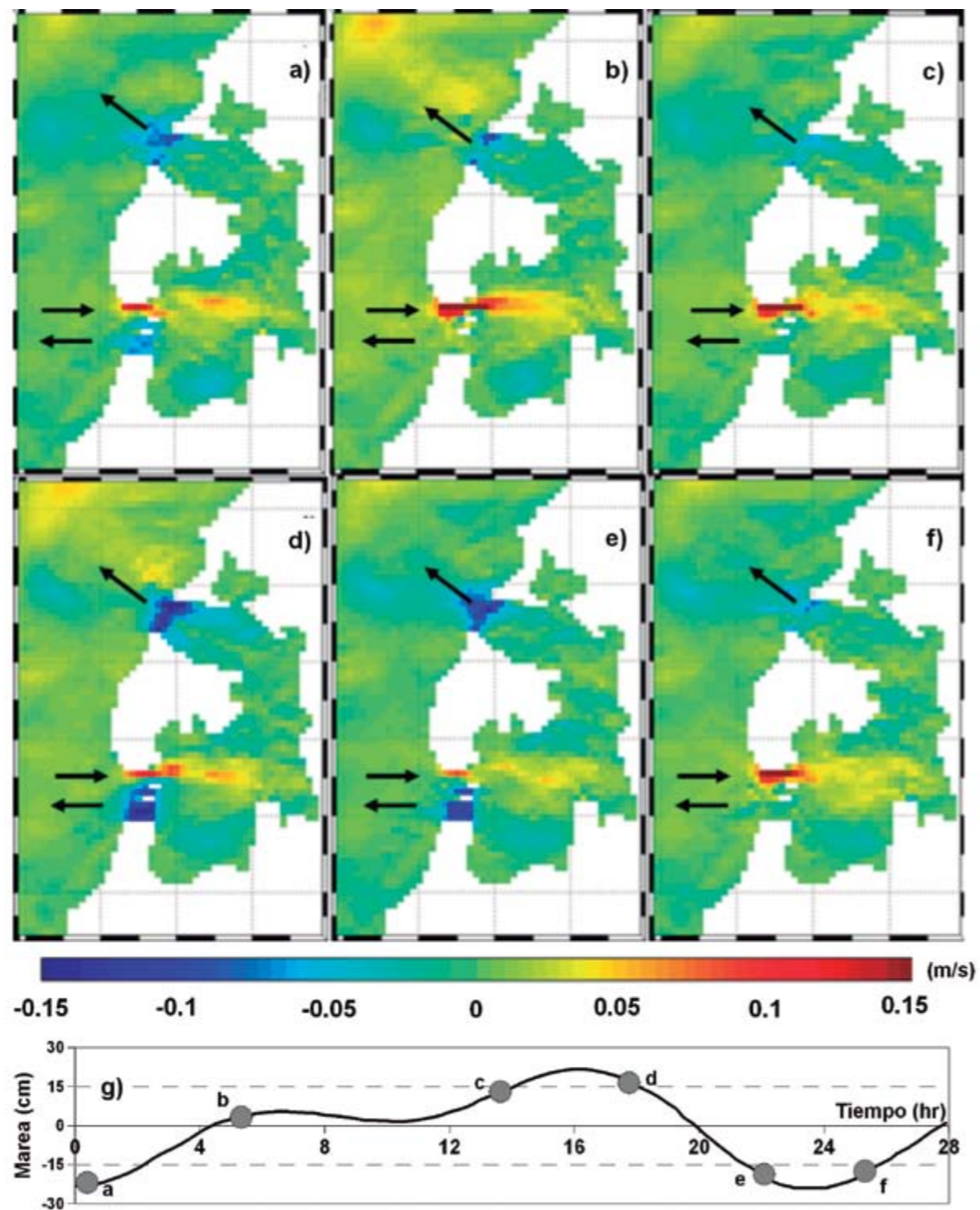


Figure 9. De **a)** a **f)** se muestra el componente u de la corriente promediado e integrado verticalmente teniendo en cuenta la alta descarga del Canal del Dique (ADCD- $250 \text{ m}^3/\text{s}$). En **g)** se grafica el ciclo de la marea empleado; los puntos grises indican la hora a la cual corresponde el patrón de corrientes graficadas de **a)** a **f)**; las flechas representan las corrientes de flujo y refluo.

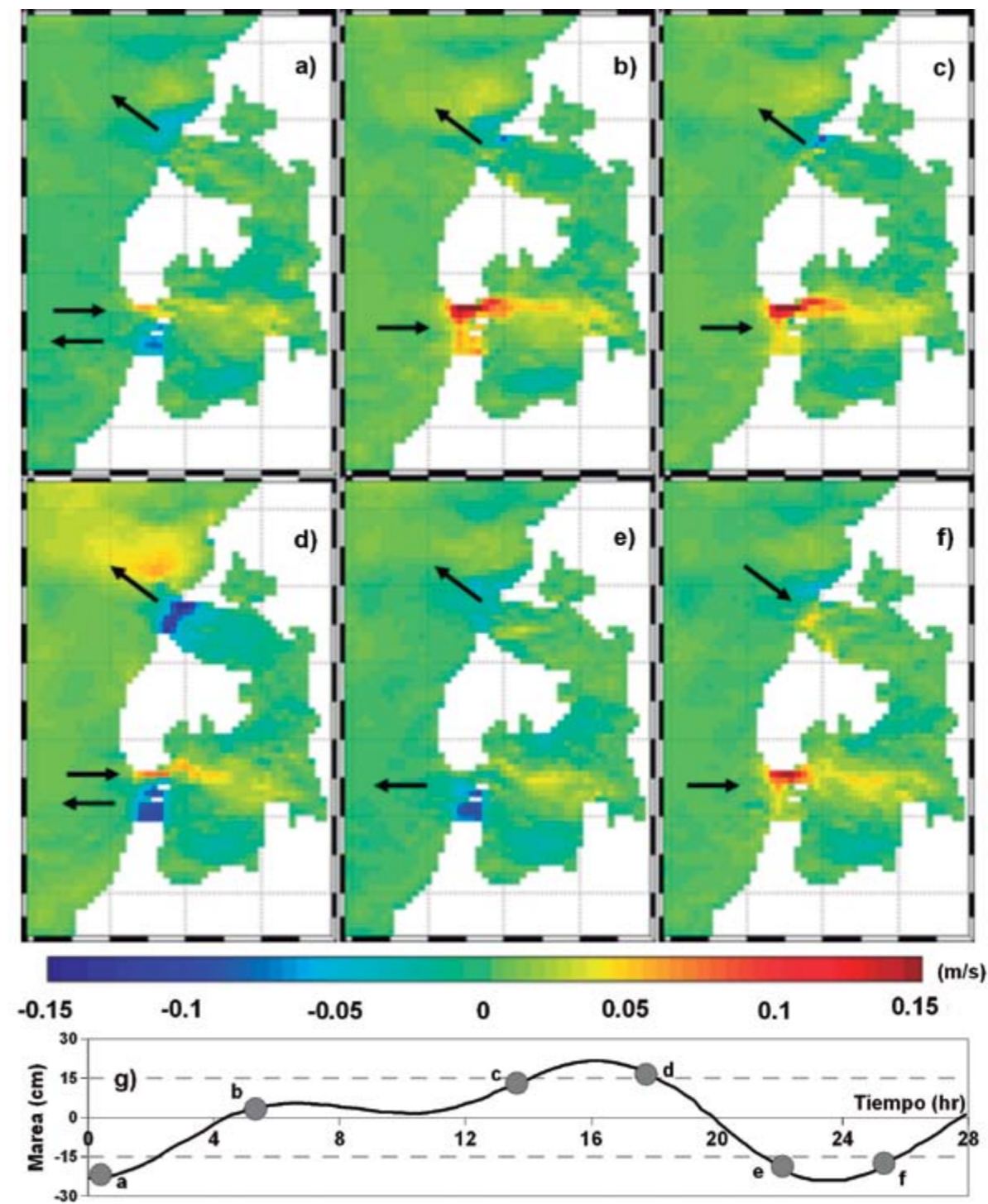


Figura 10. De **a)** a **f)** se muestra el componente u de la corriente promediado e integrado verticalmente, teniendo en cuenta la baja descarga del Canal del Dique (BDCD- $50 \text{ m}^3/\text{s}$). En **g)** se grafica el ciclo de la marea empleado; los puntos grises indican la hora a la cual corresponde el patrón de corrientes graficadas de **a)** a **f)**; las flechas representan las corrientes de flujo y refluo.

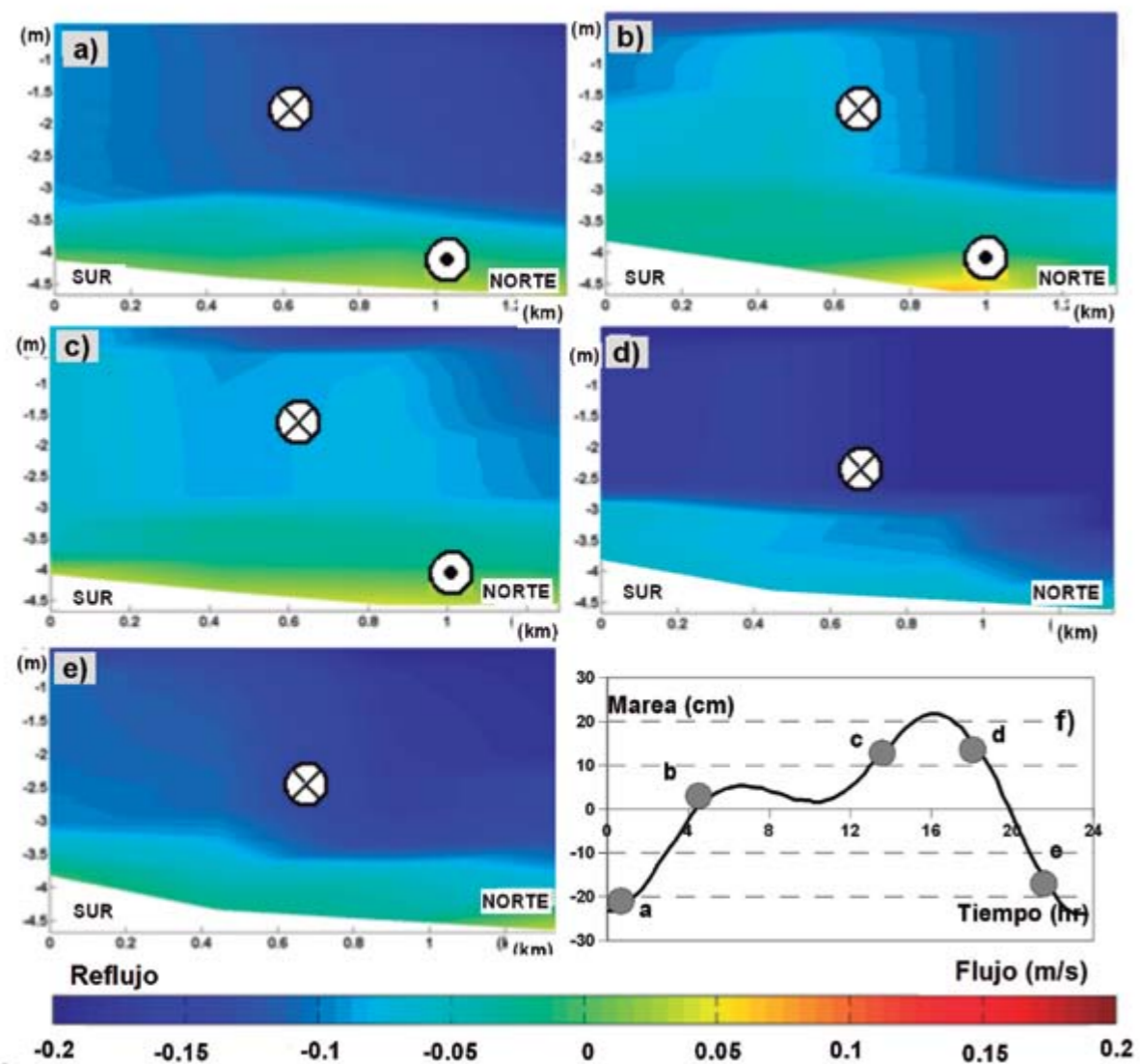


Figura 11. Sección vertical del componente u de la corriente en el transecto 1 (Bocagrande) durante un ciclo marea y ADCD; la sección empieza (km 0) en la isla Tierrabomba. La X encerrada en un círculo representa la corriente de reflujo (saliendo); el punto encerrado en un círculo representa la corriente de flujo (entrando). En **f** se grafica el ciclo marea correspondiente; los puntos grises indican la hora a la cual la sección vertical correspondiente es obtenida.

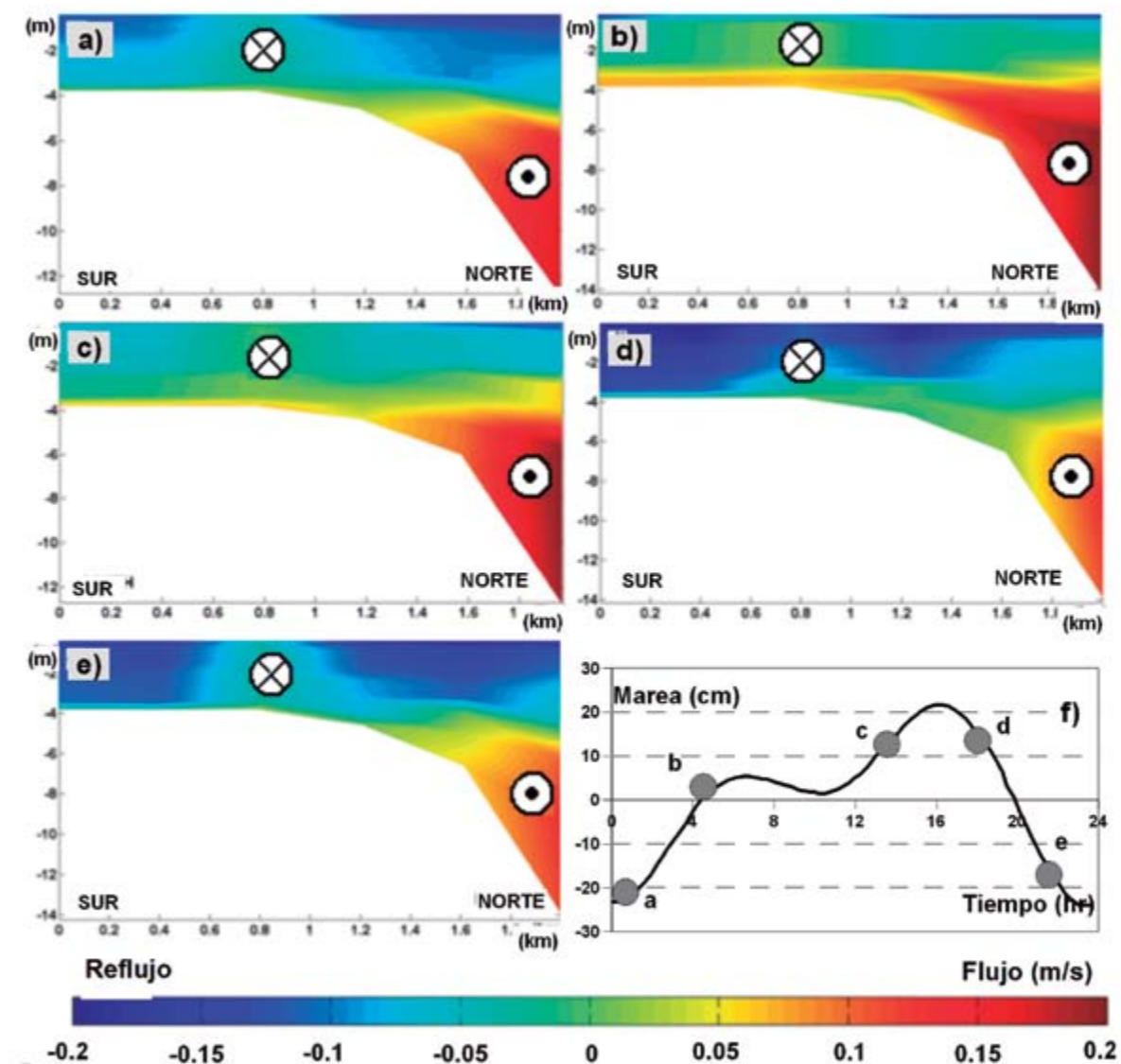


Figura 12. Sección vertical del componente u de la corriente en el transecto 2 (Bocachica) durante un ciclo marea y ADCD; la sección termina (km 2) en la isla Tierrabomba. La X encerrada en un círculo representa la corriente de reflujo (saliendo); el punto encerrado en un círculo representa la corriente de flujo (entrando). En **f** se grafica el ciclo marea correspondiente; los puntos grises indican la hora a la cual la sección vertical correspondiente es obtenida.

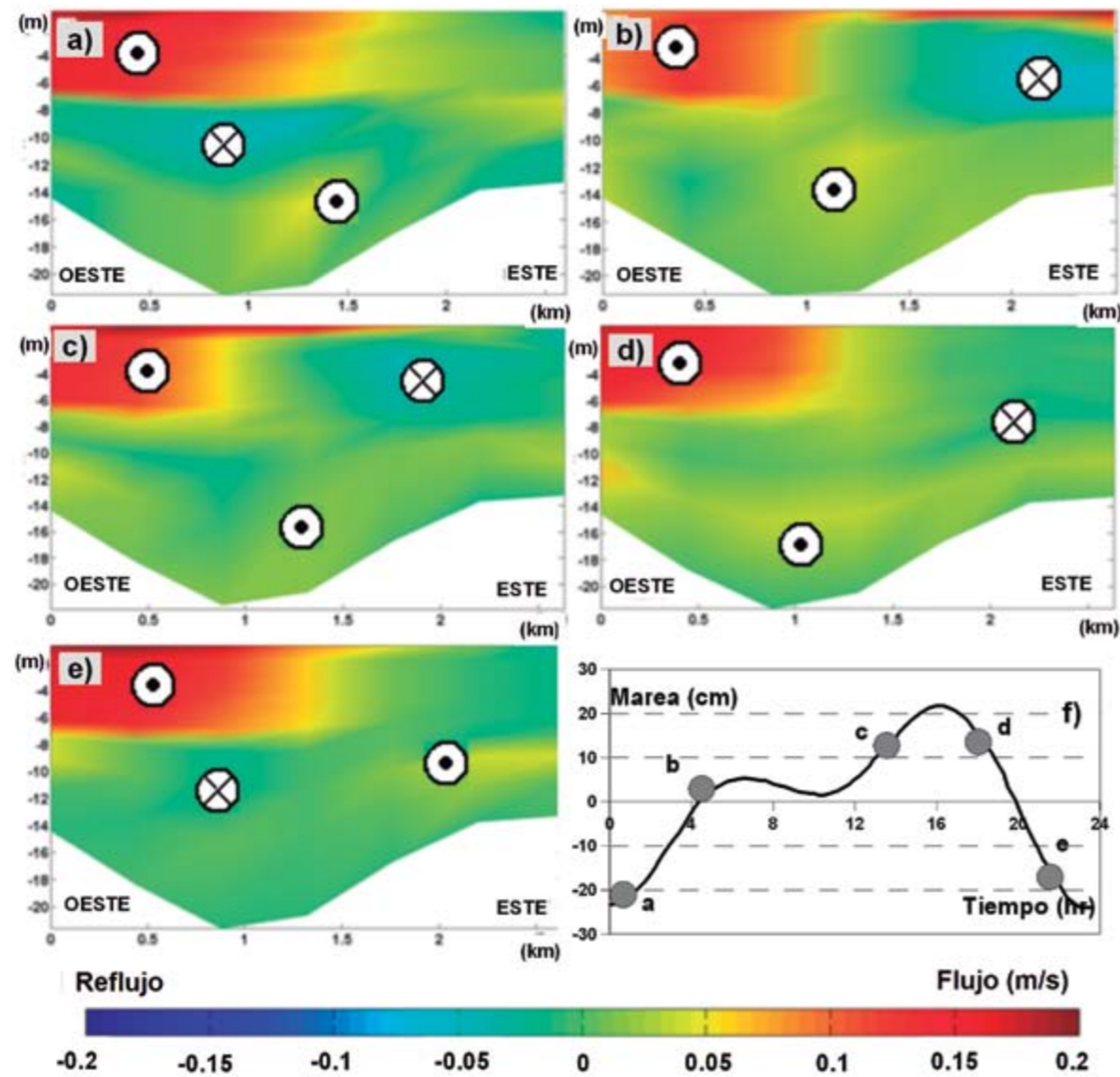


Figure 13. Sección vertical del componente v de la corriente en el transecto 3 ($10,35^\circ$ N) durante un ciclo mareal y ADCD; la sección empieza (km 0) en la isla Tierrabomba. La X encerrada en un círculo representa la componente v con dirección sur; el punto encerrado en un círculo representa la componente v con dirección norte. En **f**) se grafica el ciclo mareal correspondiente; los puntos grises indican la hora a la cual la sección vertical correspondiente es obtenida.

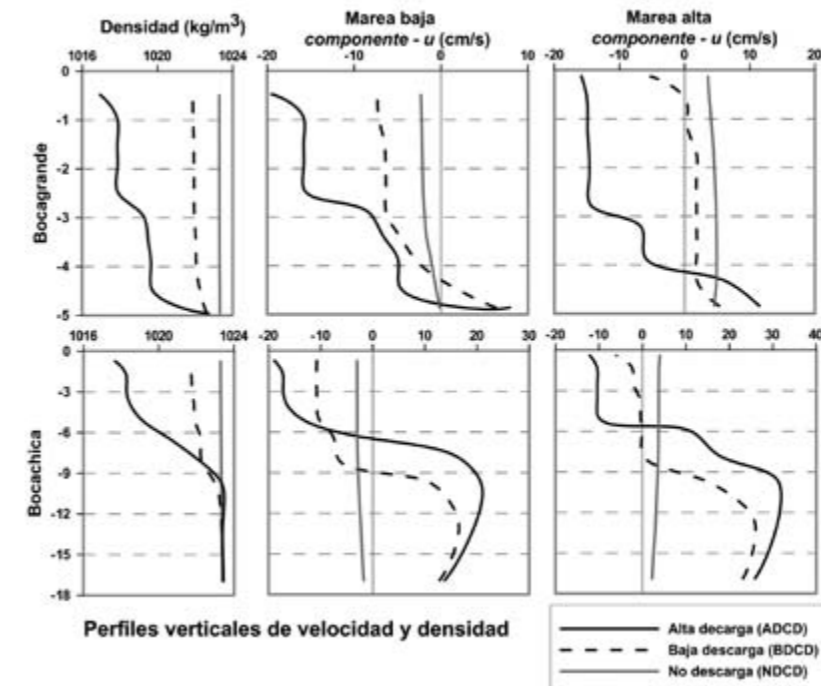


Figura 14. Perfil vertical de densidad y corriente en Bocagrande y Bocachica para los tres escenarios (ADCD, BDCD, NDCD) durante la marea baja y la marea alta.

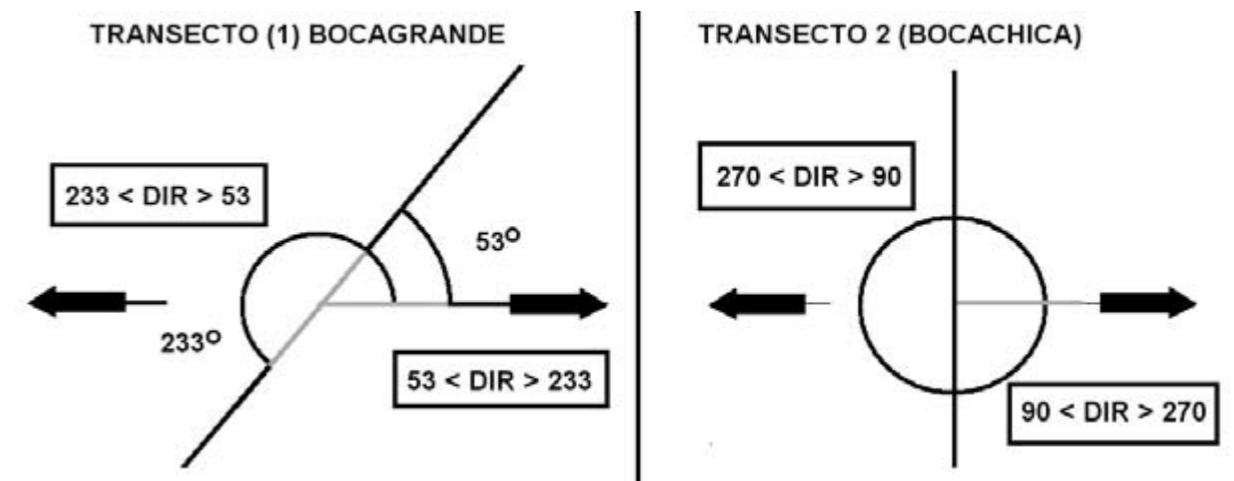


Figura 15. Rangos de direcciones para determinar las corrientes de flujo y reflujos en los transectos 1 y 2. El eje principal (línea negra) en la figura representa la dirección del transecto.

Considerando la descarga del Canal del Dique, Bocagrande es principalmente dominada por corrientes de reflujo (hacia afuera), particularmente durante la época de alta descarga (Fig. 16a). En Bocachica se identifican dos sectores (Fig. 16a y 16b); atravesando el canal de navegación, cerca de Tierrabomba, son predominantes las corrientes de flujo (hacia la bahía), las cuales se intensifican por el incremento de la descarga del Canal del Dique, mientras que en aguas someras, cerca al continente, las corrientes de reflujo

son dominantes; sin embargo, existen corrientes de flujo débiles que se intensifican cuando decrece la descarga del Canal del Dique.

Si no se considera la descarga del Canal del Dique, las corrientes de flujo y reflujo se presentan en Bocachica y Bocagrande. En Bocachica las corrientes son uniformes a lo largo de la entrada, sin diferencia entre la sección profunda (canal de navegación) y somera (Fig. 16c).

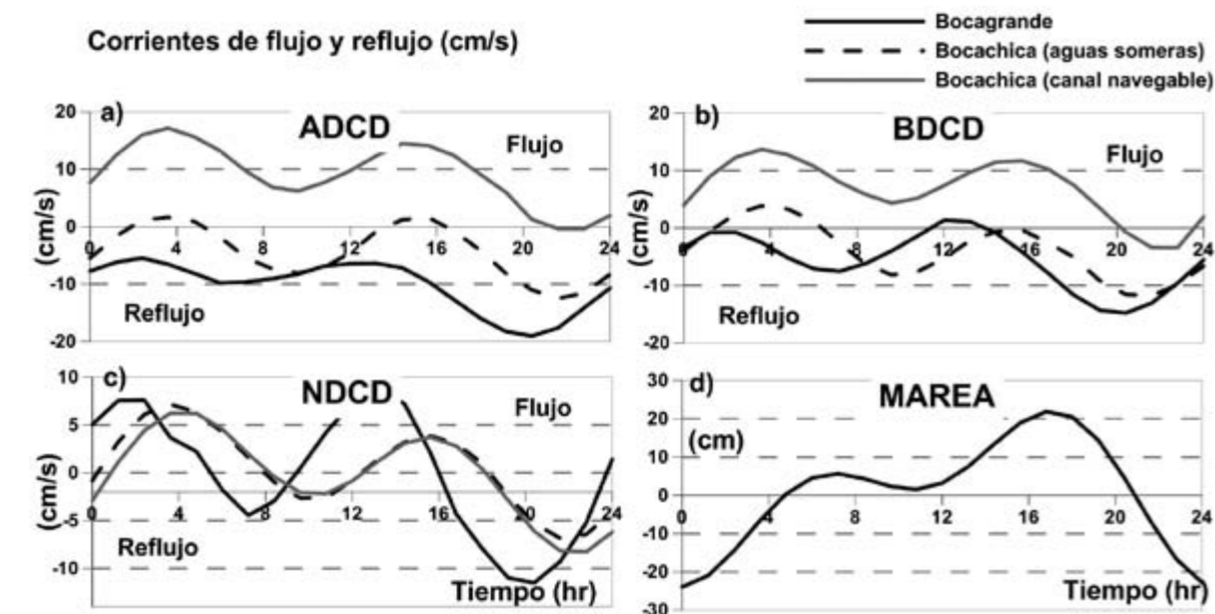


Figura 16. Corrientes de flujo y reflujo a través de Bocagrande (línea negra continua), Bocachica-sección somera (línea punteada) y Bocachica-sección profunda (línea gris continua) considerando alta descarga (ADCD-a), baja descarga (BDCD-b), sin descarga (NDCD-c). Los valores negativos de la velocidad de la corriente representan reflujo y los positivos flujo (a, b y c). En d) el ciclo de marea empleado.

Intercambio de masas de agua

El volumen de masas de agua intercambiado a través de las entradas de la Bahía de Cartagena durante un ciclo de marea es cuantificado considerando las secciones principales de cada transecto (incluyendo el nivel del mar) y las corrientes verticalmente integradas en cada sección cada 1,2 horas (Tabla I).

Como resultado de lo anterior, se obtuvo que el intercambio de agua a través de Bocachica es aproximadamente 40 % mayor que el de Bocagrande. Este resultado está de acuerdo con otros hallazgos [32], donde se calculó el

intercambio de masas de agua, sin considerar el Canal del Dique, usando el modelo hidrodinámico dos dimensional de elementos finitos RMA2.

Los resultados que se presentan en la Tabla I muestran que el agua mezclada como producto de la descarga de agua dulce del Canal del Dique en la bahía es evacuada mayormente por la entrada de Bocagrande, mientras que el rol de Bocachica y particularmente en la sección del canal de navegación es permitir la introducción de aguas oceánicas en la cuenca.

Tabla I. Volumen total intercambiado a través de Bocagrande y Bocachica durante un ciclo de marea considerando diferentes caudales de descarga en el Canal del Dique.

Descarga	Entrada	Vol. Flujo (x10 ⁶ m ³)	Vol. Reflujo (x 10 ⁶ m ³)
ADCD	Bocagrande	0,00	88,86
	Bocachica	97,33	16,43
BDCD	Bocagrande	1,4	49,69
	Bocachica	77,31	22,98
NDCD	Bocagrande	23,06	24,96

CONCLUSIONES

Durante la época de alta rata de descarga del Canal del Dique, a través de la entrada de Bocagrande al noroeste de la bahía, el flujo de masas de agua es generalmente dirigida hacia afuera de la bahía. Esto es mayormente debido a la presencia de La Escollera, que se extiende entre la isla Tierrabomba y el continente, la cual actúa como una pared que previene el influjo de las aguas oceánicas densas sobre el fondo. Al mismo tiempo, el agua mezclada y menos densa en la superficie es empujada fuera de la bahía por la corriente inducida por la descarga del Canal del Dique (ver figuras 11, 12 y 14).

Al suroeste de la bahía (Bocachica) se identifican dos regímenes de intercambio de masas. En la sección somera, cercana al continente, el régimen es similar al detectado en Bocagrande y también al observado en las capas superficiales (0 a 6 m) sobre el canal navegable en Bocachica. En las capas profundas de este canal el flujo de agua se dirige hacia la bahía (Figura 12).

Este patrón de intercambio varía durante la época de baja descarga del Canal del Dique. En Bocagrande el componente del flujo dirigido hacia afuera de la bahía se debilita e inclusive se pueden detectar valores positivos (hacia la bahía) durante el periodo de ascenso de la marea.

En Bocachica, a lo ancho del canal de navegación, las corrientes dirigidas hacia la bahía se debilitan durante el periodo de descenso de la marea y se experimenta un cambio de dirección de la corriente (hacia afuera). En la sección somera de Bocachica y durante el periodo de ascenso de

la marea se detectan fuertes corrientes dirigidas hacia afuera de la bahía (figuras 9 y 10).

La descarga del Canal del Dique produce una fuerte picnoclina (0 a 9 m); este agua superficial menos densa y boyante es permanentemente empujada hacia afuera de la bahía a través de Bocagrande y Bocachica por la inercia generada por la descarga fluvial (Fig. 14). Este flujo superficial dirigido hacia afuera de la bahía es parcialmente bloqueado por la corriente de marea (durante el periodo de ascenso) en ambas entradas de la bahía, reduciendo su velocidad.

El volumen de agua que fluye (hacia afuera) a través de Bocachica y Bocagrande en las capas superiores es balanceado por la casi permanente, pero oscilatoria, corriente de flujo subsuperficial a través de la sección profunda de Bocachica (canal de navegación), conservando el volumen de agua de la bahía.

Los resultados de la modelación muestran que la fluctuación de la rata de descarga del Canal del Dique durante el año actúa modificando fuertemente el régimen del flujo y reflujo de la corriente a través de las entradas de la bahía. Considerando la variación típica de la rata de descarga fluvial, existe un 60 % de incremento en el promedio de la velocidad de las corrientes de reflujo (hacia afuera de la bahía) en Bocagrande, mientras que las corrientes dirigidas hacia la bahía en el sector del canal navegable en Bocachica son 23 % más fuertes; a lo largo de la sección somera en Bocachica esta corriente se debilita en un 50 % (Fig. 16).

DISCUSIÓN

Los resultados mostraron la relevancia de la descarga del Canal del Dique y de la marea como los mecanismos principales de la hidrodinámica de la Bahía de Cartagena.

El importante rol del stress del viento en el proceso de mezcla no fue considerado en el estudio para entender inicialmente la importancia de la marea y de la descarga del Canal del Dique; el viento deberá ser incluido en análisis futuros para obtener una imagen completa del mecanismo de intercambio de masas de agua en la bahía.

El impacto de la descarga del Canal del Dique en la circulación de la Bahía de Cartagena y en el intercambio de aguas con el mar abierto a través de Bocagrande y Bocachica, es un asunto relevante para el manejo costero y ambiental marino, teniendo en cuenta que la bahía sufre de importantes procesos eutrofización, así como de sedimentación y erosión. La erosión se evidencia a lo largo de la playa Castillogrande, mientras que el proceso de sedimentación se observa en el sector de El Laguito.

Los resultados del presente estudio fueron preliminarmente validados [10] por comparación con los resultados de simulaciones con el modelo CODEGO, el cual fue calibrado y validado [3]; sin embargo, se requiere una validación con mediciones *in situ*.

[5] propuso el mejoramiento de la calidad del agua de la bahía por medio del cerramiento del Canal del Dique. Sin embargo, los resultados obtenidos en este estudio muestran que eso podría permitir el reforzamiento de las corrientes de flujo (dirigidas hacia la bahía) en Bocagrande, que en la actualidad es débil, lo que incrementaría el potencial de introducción y transporte de sedimentos hacia la bahía, los cuales son suspendidos en Bocagrande por el rompimiento del oleaje, aumentando las ratas de sedimentación actual en el sector de El Laguito.

En este sentido, se requiere evaluar de forma más detallada el transporte de sedimento a través de Bocagrande.

LITERATURA CITADA

- [1] Blumberg, A.F. y Mellor, G.L.A. *Description of a three-dimensional coastal ocean circulation Model, in three-dimensional coastal ocean models. American Geophysical Union. 1987. 4, 208.*
- [2] Kazakov A.L., Lezhenin, A.A. y Spreranzkiy, L.S. Resultados preliminares del estudio de la capa límite meso-meteorológica de la atmósfera en la costa norte colombiana aplicando un modelo numérico. 1996. Bol. Cient. CIOH; 17: 17-26.
- [3] Lonin, S.A. Cálculo de la transparencia del agua en la Bahía de Cartagena. Bol. Cient. CIOH 1997; 18: 85-92.
- [4] Hess, K.W. 1985. *Assessment model for estuarine circulation and salinity. NOAA Technical Memorandum NESDIS AISC3—National Environmental Satellite, Data, and Information Service, USA, Washington, DC, 39 pp.*
- [5] Tuchkovenko, Y., Lonin, S.A. y Calero, L. Modelo de eutrofización de la Bahía de Cartagena y su aplicación práctica. 2002. Bol. Cient. CIOH ; 20 : 28-44 .
- [6] Seemüller, W., Seitz, M., Sánchez, L. y Drewes, H. *The position and velocity solution SIR09P01 of the IGS Regional Network Associate Analysis Centre for SIRGAS (IGS RNAAC SIR). DGFI Report 85. 2009 ; 96 pp.*
- [7] Afanador, F., Torres, R. y Gómez, J.C. LiDAR y fotografía aérea digital en la determinación del impacto del aumento en el nivel del mar en el sector de "La Boquilla", Cartagena de Indias, Caribe Colombiano. 2006. Bol. Cient. CIOH ; 24 : 94-106.
- [8] Andrade, C.A. Cambios recientes del nivel del mar en Colombia. En: *Deltas de Colombia: morfodinámica y vulnerabilidad ante el cambio global. 2008. ISBN 978-958-720-020-1. Universidad EAFIT, COLCIENCIAS. p. 101 - 121.*
- [9] Restrepo, J. y Lopez, S. *Morphodynamics of the Pacific and Caribbean deltas of Colombia, South America. Journal of South American Earth Sciences. 2008; 25 : 1-21.*
- [10] Molares R. *The influence of the Dique Channel Discharge on the sea water level of Cartagena Bay. Msc. Tesis. Coastal and Marine Engineering and Management. Tudelft University. 2011.*
- [11] Torres, R.R. & Tsimplis, M.N. *Seasonal sea level cycle in the Caribbean Sea, J. Geophys. Res. 2012 ; 117, C07011, doi:10.1029/2012JC008159.*
- [12] Zhang, W., Yan, Y., Zheng, J., Li, L., Dong, X. & Cai, H. *Temporal and spatial variability of annual extreme water level in the Pearl River Delta region, China. Global and Planetary Change. 2009 ; 69 : 35-47.*
- [13] Mazzotti, S., A. Lambert, A., Van der Kooij, M. & Mainville A. *Impact of anthropogenic subsidence on relative sea-level rise in the Fraser River delta. 2009 ; 37 : 771-774, doi:10.1130/G25640A.1.*
- [14] González, J.L. & Tornqvist, T.E. *Coastal Louisiana in crisis: Subsidence or sea level rise?. 2006EOS 87, 493-498.*
- [15] Ordóñez, J., Cubillos, E. y Forero, G., 2007. Balance hídrico y sedimentológico del Canal del Dique y sus efectos sobre la sedimentación de la Bahía de Cartagena. *Third regional symposium in hydraulics on rivers. 18 pp.*
- [16] Nicolae-Lerma, A., Thomas, Y.F., Durand, P., Torres, R. y Andrade, C.A. Variabilidad del nivel del mar desde 1950 hasta el 2000 y riesgos asociados a episodios de mar de leva en las penínsulas de Bocagrande y Castillogrande, Cartagena de Indias, Colombia, Boletín Científico CIOH. 2008; 26:71-84.
- [17] Lemaitre, E., 1998. Caminos reales de Colombia. El tránsito del Canal del Dique. Fondo Fen. 1998.
- [18] Garay, T., Giraldo L., 1997. Influencia de los aportes de materia orgánica externa y autóctona en el decrecimiento de los niveles de oxígeno disuelto en la Bahía de Cartagena, Colombia. Bol. Cient. CIOH 18, 1-13
- [19] CIOH. 1999. Executive report. Project: Diseño preliminar del modelo numérico 2D-3D de calidad de aguas para el Canal del Dique y sus sistemas lagunares. 24 pp.
- [20] UNAL., 2008. *Flow rate reduction alternative of the Dique Channel through the narrowing of the channel section by sectors and the construction of the lock of Paricuica. Final report CM-513. Vol. 1.*
- [21] Song, Y. & Haidvogel, D. B., 1994. *A semi-implicit ocean circulation model using a generalized topography-following coordinate system. J. Comp. Phys., 115 (1), 228-244.*
- [22] Shchepetkin, A. & McWilliams, J. C., 2005. *The regional ocean modelling system (ROMS): A split-explicit, free-surface, topography-following coordinates oceanic model. Ocean Modelling, 9, 347-404.*
- [23] Penven, P., Debreu, L., Marchesiello, P. & McWilliams, J.C., 2006. *Evaluation and application of the ROMS 1-way embedding procedure to the central California upwelling system. Ocean Modelling, 12, 157-187.*
- [24] Smith, W.H.F. & Sandwell, D.T., 1997. *Global sea floor topography from satellite altimetry and ship depth soundings. Science 277, 1957-1962.*
- [25] Locarnini, R.A., Mishonov, A.V., Antonov, J.I., Boyer, T.P. & García, H.E. 2006. *World Ocean Atlas 2005, Volume 1: Temperature. S. Levitus, Ed. NOAA Atlas NESDIS 61, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 182 pp*
- [26] Antonov, J.I., Locarnini, R.A., Boyer, T.P., Mishonov, A.V. & García, H.E. 2006. *World Ocean Atlas 2005, Volume 2: Salinity. S. Levitus, Ed. NOAA Atlas NESDIS 62, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 182.*

- [27] Penven, P., Marchesiello, P. & Lefevre, J., 2008. *Software tools for pre- and post-processing of oceanic regional simulations. Environmental Modelling & Software 23, 660-662.*
- [28] Tuchkovenko, Y. & Lonin, S.A., 2003. *Mathematical model of the oxygen regime of Cartagena Bay. Ecological Modelling 165, 91-106.*
- [29] Egbert, G. & Erofeeva, L., 2002. *Efficient inverse modelling of barotropic ocean tides. J. Atmos. Ocean. Technol. 19, 183-204.*
- [30] Molares, R., 2004. Clasificación e identificación de las componentes de marea del Caribe colombiano. Bol. Cient. CIOH 22, 105-114.
- [31] DaSilva, A., Young, A. & Levitus, S. 1994. *Atlas of surface marine data 1994, volume 1: Algorithms and procedures.,» Tech. Rep. 6, U.S. Department of Commerce, NOAA, NESDIS.*
- [32] Palacio, C., García, F. & García, U. 2010. *Cartagena Bay 2D hydrodynamic model calibration. DYNA, 164, 152-166.*