

Proceso de intercambio de masas de agua de la bahía de Cartagena (Caribe colombiano) basado en la medición de parámetros oceanográficos

Cartagena bay water mass exchange based on measurement of oceanographic parameters (Colombian Caribbean)

Fecha de recepción: 2014-03-10 / Fecha de aceptación: 2014-05-05

César Humberto Grisales López¹, Julián A. Salgado Mesa², Ricardo José Molares Babra³

¹Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla". Oficial alumno Curso Complementación en Oceanografía. Barrio El Bosque, Isla Manzanillo. Cartagena, Colombia. Correo electrónico: cesargrisales31@gmail.com.

²Subcomisión de la Comisión Oceanográfica Intergubernamental de Unesco para el Caribe y Regiones Adyacentes (IOCaribe). Oficial de Enlace. Correo electrónico: enlaceiocaribecco@cco.gov.co

³Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH). M.Sc. Coastal and Marine Engineering and Management, Director CIOH. Barrio El Bosque, Isla Manzanillo, Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla". Cartagena, Colombia. Correo electrónico: jefcioh@dimar.mil.co

Grisales López CH, Salgado Mesa JA, Molares Babra RJ. Proceso de intercambio de masas de agua de la bahía de Cartagena (Caribe colombiano) basado en la medición de parámetros oceanográficos. Bol. Cient. CIOH 2104;32: 47-70.

RESUMEN

Se realizó una descripción y análisis del proceso de intercambio de masas de agua en la bahía de Cartagena, para lo cual se efectuaron salidas de campo, en las cuales se tomaron diferentes mediciones de parámetros oceanográficos en las entradas de la bahía (Bocagrande y Bocachica), así como en la descarga del Canal del Dique a la bahía. Otros aportes de agua no se tuvieron en cuenta. Las mediciones se efectuaron en las dos épocas (seca y húmeda), con el fin de determinar la influencia de los extremos estacionales en la dinámica de la bahía, principalmente del Canal del Dique, que durante la época de lluvias triplicó el aporte en el volumen de agua hacia la bahía.

Durante la época seca y en el sector de Bocachica (mediciones efectuadas durante un ciclo de marea) se presentó un flujo dominante hacia la bahía, correspondiente a un volumen de 59.1567×10^6 m³ durante un ciclo de marea y un flujo de salida por Bocagrande correspondiente a un volumen de 76.2013×10^6 m³, con una disminución del 28.81 % en el volumen de agua de la bahía. En la época de lluvias y durante un ciclo de marea, el volumen de agua que ingresó a la bahía (Bocachica y Canal del Dique) fue de 89.8590×10^6 m³, mientras que el volumen de salida por Bocagrande fue de 78.5392×10^6 m³, con un incremento del 12.59 % en el volumen de agua de la bahía.

Estos resultados corroboran los obtenidos por Molares y Mestres (2013), quienes simularon la dinámica de la bahía y determinaron una variación en los regímenes de flujo de entrada y salida a la bahía dependiendo de la época del año. Se resalta la importancia de los resultados obtenidos, los cuales indican las variaciones del volumen de agua dentro de la bahía, adquiriendo importancia por el impacto socioeconómico y ecológico que puede tener en este importante sistema estuarino.

PALABRAS CLAVES: intercambio de masas de agua, dinámica estuarina, bahía de Cartagena.

ABSTRACT

Was performed a description and analysis of the process of exchange of water masses in the bay of Cartagena, for which there were effected field exits, in which there took different measurements of oceanographic parameters in the income of the bay (Bocagrande and Bocachica), as well as in the unload of the Channel of the Dique in the bay. Other contributions of water were not born in mind. The measurements were effected in two epochs (dry and humid), in order to determine the influence of the seasonal ends in the dynamics of the bay, principally of the Channel of the Dique, which during the epoch of rains, approximately trebled the contribution in the water volume towards the bay.

During the dry epoch and in Bocachica's sector (measurements effected during a cycle of tide) one presented a dominant flow towards the bay, correspondent to a volume of 59.1567×10^6 m³ during a cycle of tide and an outflow for Bocagrande corresponding to a volume of 76.2013×10^6 m³, with a decrease of 28.81% in the water volume of the bay; In the epoch of rains and during a cycle of tide, the water volume that entered to the bay (Bocachica and Channel of the Dique) was of 89.8590×10^6 m³, whereas the volume of exit for Bocagrande was of 78.5392×10^6 m³, with an increase of 12.59% in the water volume of the bay.

These results corroborate the obtained ones for Molares and Mestres (2013), who simulated the dynamics of the bay and determined a variation in the rate of flow of entry and exit to the bay depending of the epoch of the year. There is highlighted the importance of the obtained results, which indicate the variations of the water volume inside the bay, acquiring importance for the socioeconomic and ecological impact that can have in this important system estuarino.

KEYWORDS: Exchange of water masses, dynamic estuarine, Cartagena Bay.

INTRODUCCIÓN

El proceso de intercambio de masas de agua está condicionado a las variaciones temporales en el flujo de agua dulce, marea y viento, las cuales dominan y determinan la distribución de la salinidad y la circulación dentro del estuario [1]; que para el caso de la bahía de Cartagena, efectuando modificaciones al Canal del Dique, generaría una reducción de la carga de sólidos suspendidos que podría afectar el balance hídrico de la bahía, aumentando los tiempos de residencia del agua y la posibilidad de generar problemas de calidad de agua [2].

Entre otras condiciones que se deben tener en cuenta para analizar y caracterizar el comportamiento hidrodinámico del intercambio de masas de agua en una bahía, se encuentra la morfología del fondo marino [2] y [3] el hecho de que un estuario denote un carácter morfológico complejo en un amplio abanico de escalas de tiempo, no sólo es científicamente relevante, sino que constituye un reto de ingeniería por la importancia socioeconómica y ecológica que presentan estos sistemas [4].

Teniendo en cuenta que los estudios de caracterización de las masas de agua en el mar Caribe colombiano son escasos [5] y solo se describen con algunos trabajos en que se menciona cómo puede llegar a ser este comportamiento [6], se observa que la investigación que durante algunos años se ha realizado sobre el intercambio de masas de agua en la bahía de Cartagena se ha basado en modelos numéricos como el propuesto por Lonin y Giraldo [7], complementado por Tuchkovenko, Lonin y Calero [8]; en los cuales se hizo una estimación de la dinámica de la bahía para las diferentes épocas climáticas, encontrando que para que se produzca un mejoramiento de la calidad de agua, debe limitarse al máximo el ingreso de sustancias contaminantes y diseñar medidas de ingeniería, orientadas al refuerzo del intercambio de aguas de la bahía con el mar.

De acuerdo con análisis efectuados en simulaciones numéricas publicadas [9], existe una estrecha relación entre la descarga del Canal del Dique y la variación en el nivel del mar en la bahía de Cartagena; los cuales inciden en los valores de intercambio de masas de agua tanto en Bocagrande, como en Bocachica [10]. En la Tabla I se muestran los resultados obtenidos por los autores.

Tabla I. Volumen de intercambio de masas a través de Bocagrande y Bocachica durante un ciclo de marea considerando HDD (*High Dique Discharge*), LDD (*Low Dique Discharge*) y NDD (*No Dique Discharge*).

Descarga Canal del Dique	Entrada	Volumen entrada /($\times 10^6 \text{ m}^3$)	Volumen salida /($\times 10^6 \text{ m}^3$)
HDD	Bocagrande	0.00	88.86
	Bocachica	97.33	16.43
LDD	Bocagrande	1.40	49.69
	Bocachica	77.31	22.98
NDD	Bocagrande	23.06	24.96

ÁREA DE ESTUDIO

La bahía de Cartagena se encuentra ubicada en la costa Caribe colombiana, con una superficie de plano de agua de 82 km². Al oeste de la bahía se encuentra la isla de Tierrabomba, cuya ubicación origina dos entradas; una

denominada Bocagrande, ubicada al noroeste; la otra Bocachica, al suroeste de la isla. Bocagrande posee una barrera submarina llamada La Escollera, que limita el intercambio de masas de agua entre la bahía y mar abierto (Fig. 1). En ese sector se encuentran profundidades que varían entre 0.6 y 2.1 m [11].

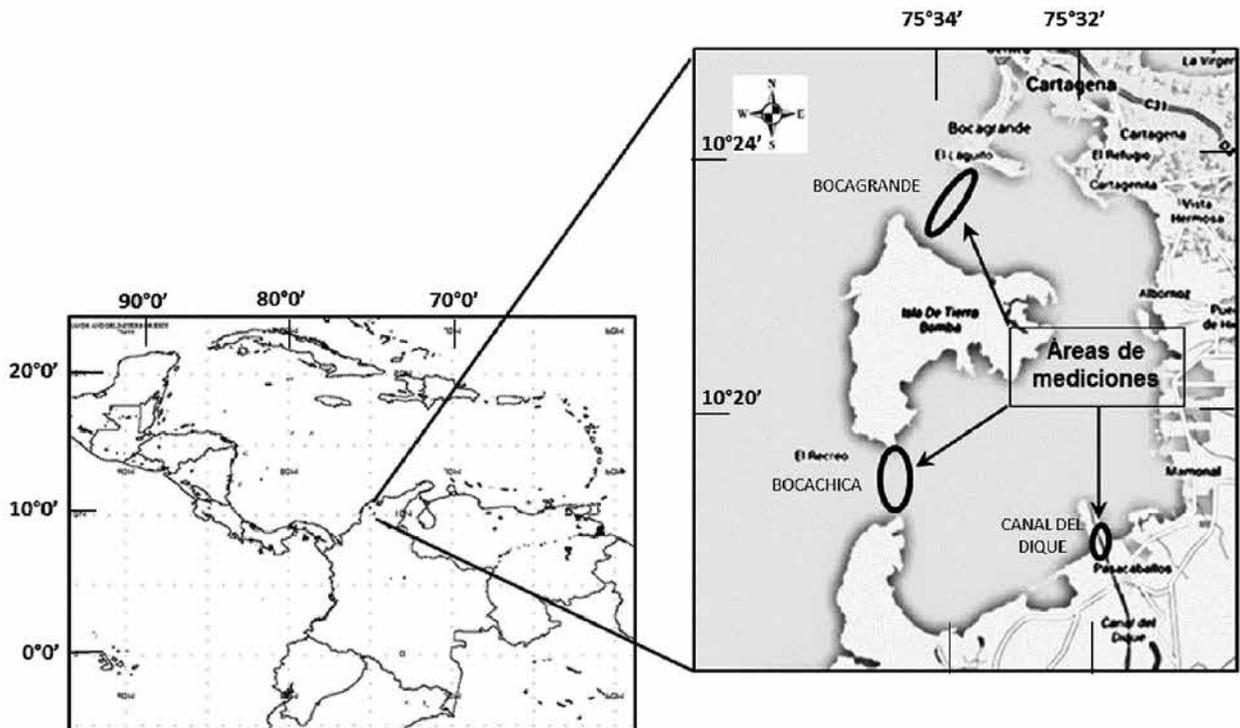


Figura 1. Áreas donde se efectuaron las mediciones de parámetros.

Al suroeste de la bahía se encuentran tres canales de acceso. De ellos el principal y más profundo es Bocachica; el siguiente canal se denomina Canal de Varadero, y un último canal se encuentra establecido entre las islas Draga y Abanico, con profundidades de tan solo 2 m [12]. Al sureste de la bahía se encuentra el Canal del Dique, que descarga a la bahía aguas dulces provenientes del Río de la Magdalena, importante arteria fluvial que fluye del sur al norte del país [13].

Debido a la construcción del Canal del Dique, la bahía se clasifica como un estuario fuertemente estratificado [14] y [15]. Por lo tanto, la densidad también juega un papel importante en la circulación; así algunos estuarios permanecen estratificados verticalmente, de tal forma que el agua dulce de los ríos circula sobre el agua salada [16]. Los niveles del Canal del Dique dependen del Río de la Magdalena, del cual se

deriva aproximadamente el 8 % del caudal; pasando por condiciones máximas el río con 16000 m³/s, derivando hacia el Canal del Dique 1200 m³/s con un 9 % y en condiciones de bajo caudal un 4 % [17]. De acuerdo con [18], los meses con menor presencia de lluvias son enero, febrero y marzo. De abril a noviembre la precipitación varía entre 200 y 300 mm por mes [19].

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación describe el proceso de intercambio de masas de agua en la bahía de Cartagena, tomando como base la medición de parámetros oceanográficos en las entradas de la bahía y la descarga del Canal del Dique. Para lo anterior se establecieron tres estaciones en el sector de Bocachica (Fig. 2a); tres estaciones en Bocagrande (Fig. 2b), y tres estaciones en el Canal del Dique (Fig. 2d).

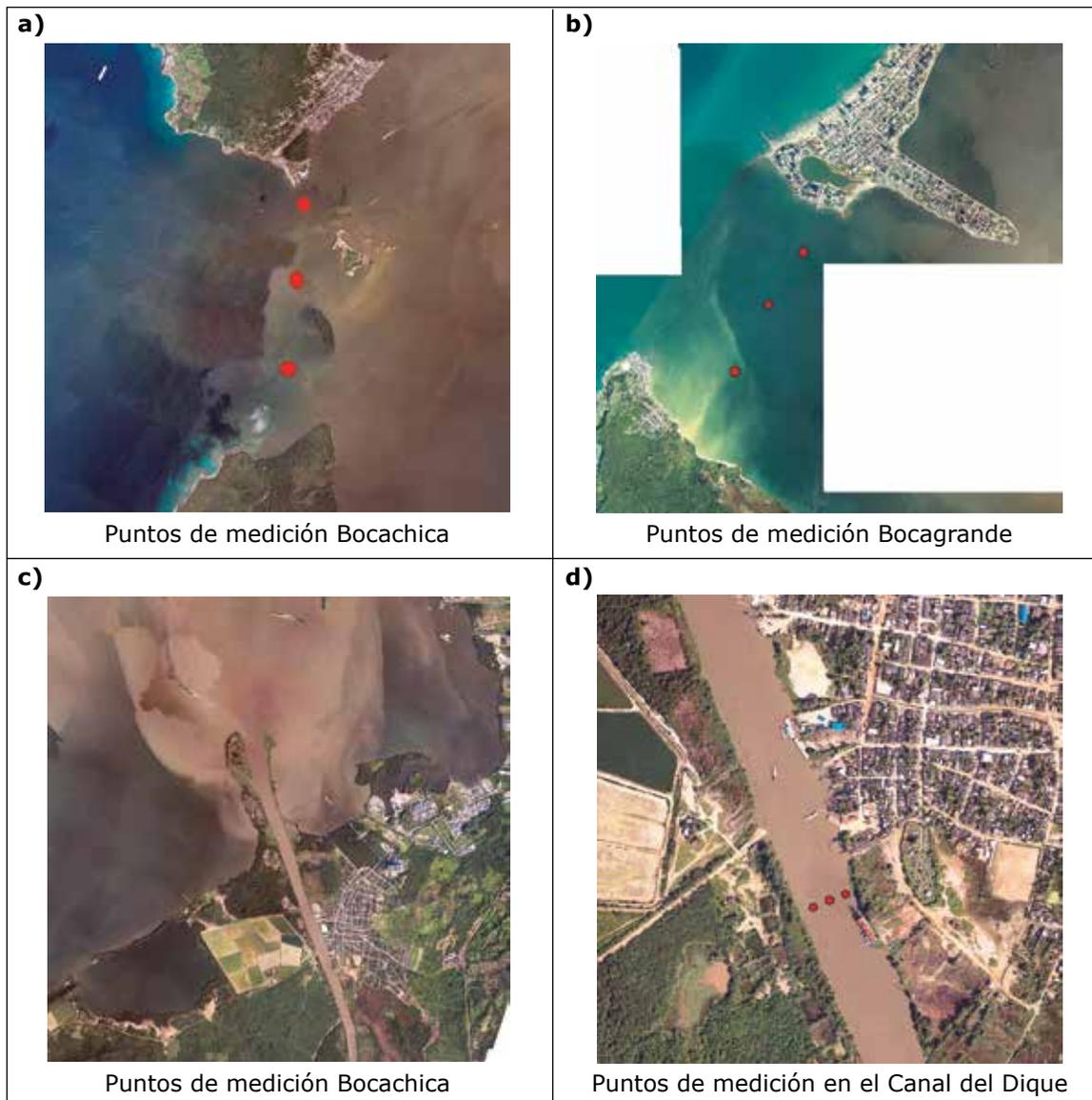


Figura 2. a) Estaciones de medición en Bocachica; **b)** Estaciones de medición en Bocagrande; **d)** Estación en el Canal del Dique (tres mediciones transversalmente). (Fuente: Ortofotos Dimar-2009).

Se efectuaron dos monitoreos (épocas seca y húmeda) que consistieron en la medición de parámetros oceanográficos (corriente, densidad, salinidad, temperatura), tomando siete mediciones durante un ciclo de marea. El primero se efectuó en época seca, entre el 24 y 25 de enero/13; el segundo se efectuó en época de lluvias, los días 17, 18 y 19 de junio/13. Para las mediciones se utilizaron un perfilador de

corriente y un perfilador CTD; el nivel del mar se midió con un mareógrafo de propiedad del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (Ideam), ubicado en la isla de Manzanillo; las mediciones de viento fueron tomadas de la estación meteorológica ubicada en el aeropuerto Rafael Núñez. En la Figura 3 se registra la marea y viento medidos durante los dos monitoreos.

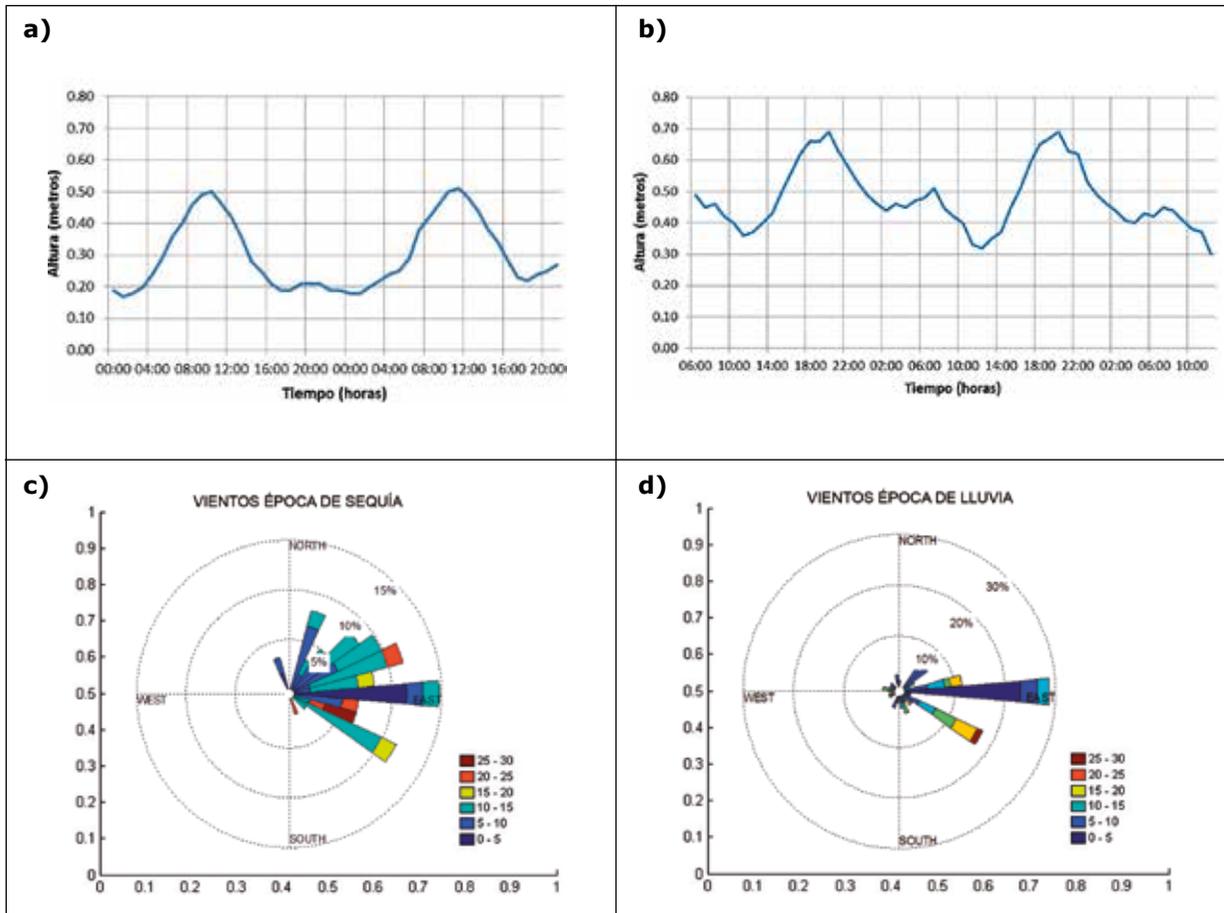
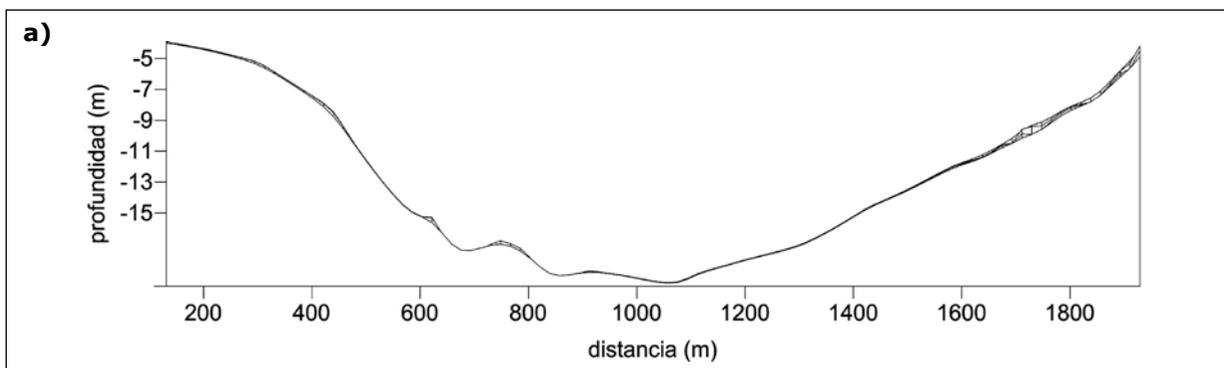


Figura 3. **a)** Nivel de marea días 24 y 25 de enero/13; **b)** Nivel de marea días 17, 18 y 19 de junio/13; **c)** Intensidad y dirección del viento en los días 24 y 25 de enero/13; **d)** Viento días 17, 18 y 19 de junio/13.

El nivel del Canal de Dique fue tomado de la estación de monitoreo de Gambote, perteneciente al Ideam. La información batimétrica fue suministrada por el Servicio Hidrográfico del

CIOH. Para hallar el área transversal en cada entrada (Fig. 4) se utilizó el método de integración del trapecio y se tuvo en cuenta la variación de la profundidad acuerdo la marea.



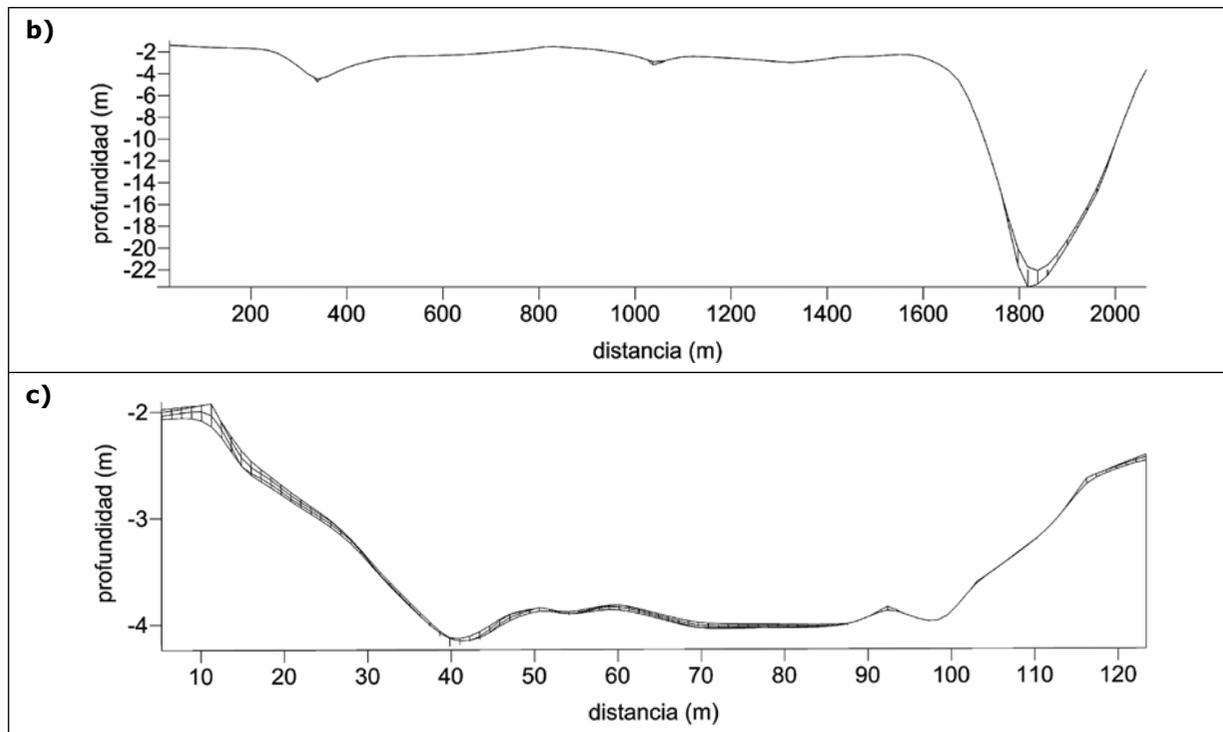


Figura 4. a) Sección transversal Bocagrande; **b)** Sección transversal Bocachica; **c)** Sección transversal Canal del Dique.

RESULTADOS

Análisis datos en el sector de Bocachica

El seguimiento de la densidad en la Estación 1 mostró estratificación hasta que la marea inicio su descenso, destacándose uniformidad en la columna durante la fase de marea baja. A partir de allí se observó la influencia que tienen las aguas menos densas provenientes del Canal del Dique. La densidad que existe a los 5 m se prolonga verticalmente hasta los 18 m, durante el periodo de descenso de marea. En las estaciones 2 y 3, durante todos los estados de marea, la estratificación se mantiene (Fig. 5a).

Para las mediciones en la época de lluvias¹ la cuña densa que se formó en el canal durante el

monitoreo de la época seca desaparece, debido al aumento del caudal del Canal del Dique (Fig. 5b). De acuerdo con los registros de la estación de monitoreo de Gambote, para la época seca el nivel en el Canal del Dique fue de 5.0 m. El análisis de la corriente permitió establecer para la época seca un flujo de descarga del Canal del Dique de 85.7 m³/s, mientras que para la época de lluvias (nivel del espejo de agua: 6.70 m) el resultando fue de 295.2 m³/s. Esta considerable variación en el aporte de agua dulce a la bahía, sumado a los vientos provenientes del este, hace que se genere una mayor mezcla en la capa superficial.

La salinidad en la Estación 1 reveló un comportamiento estratificado, pero durante el descenso de marea mostró un cambio abrupto, influenciado por el Canal del Dique (Fig. 6a). La salinidad a los 5 m se prolonga en la vertical hasta los 18 m, pero luego tiende a

¹ Para todas las gráficas de época de lluvias, los valores de tiempo en el eje horizontal llegan hasta 32 horas; es decir, al llegar a las 24 horas, la siguiente división con el número 32 equivale a las 02:00 a.m. y así sucesivamente.

aparecer hasta el inicio del aumento del nivel de marea.

En las estaciones 2 y 3 se mantiene la estratificación salina durante el ciclo mareal. Para la época de lluvias la salinidad en la capa superficial disminuye y las mayores concentraciones son desplazadas hacia el fondo, generando una capa más amplia con agua mezclada menos densa, haciendo que la cuña salina que se generó en época seca desaparezca (Fig. 6b).

En la Estación 1 la temperatura permaneció entre los 26.6° y 27°C, pero durante el descenso de marea ese parámetro ascendió hasta los 27.8°C, en profundidades de 6 a 18 m, durante

3 horas. Durante la marea baja se eleva hasta los 28.8°C.

En las estaciones 2 y 3 la temperatura aumentó hasta 28.8°C, pero durante el descenso de la marea disminuye (Fig. 7a). La temperatura medida en Bocachica está estrechamente relacionada con el comportamiento mareal, el cual tuvo un aumento (hasta 28.8°C) durante la fase de descenso de la marea; asimismo, donde se presenta mayor profundidad, se encontraron cambios más marcados. Para las mediciones efectuadas en época de lluvias, la temperatura en el canal aumentó en mínima marea y posteriormente se encontraron valores homogéneos.

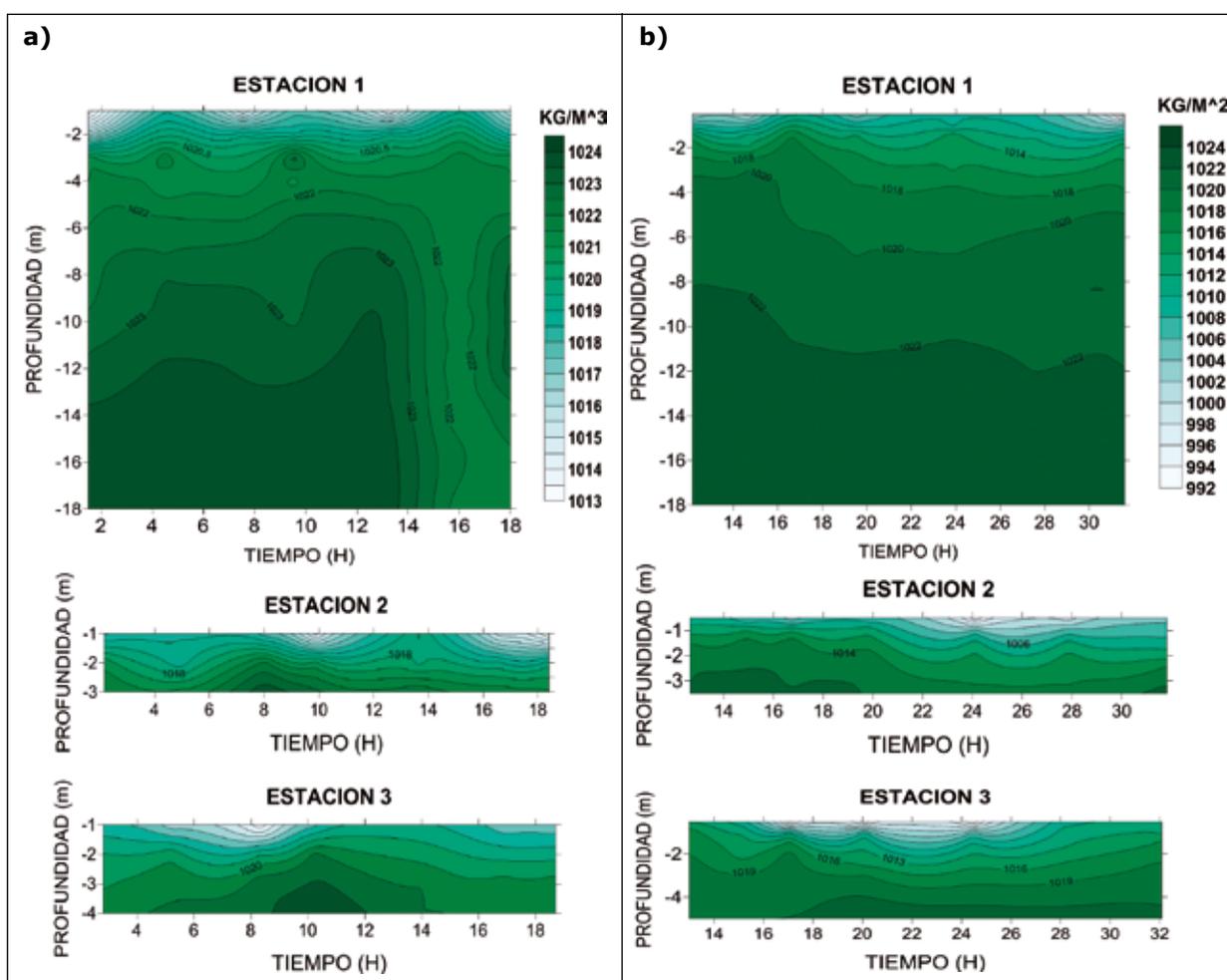


Figura 5. Densidad en el canal de Bocachica. **a)** Época seca; **b)** Época de lluvias.

Se observó que la temperatura se estratifica, pero aumenta hasta en 1.5°C en el fondo. Igual sucede en las estaciones 2 y 3, con un aumento de 2°C en toda la columna de agua (Fig. 7b). Teniendo en cuenta estas observaciones y de acuerdo con [11], en el que la capa de agua superficial del Caribe presenta temperaturas

entre 27.0 y 28.5°C, y salinidad entre 35.1 y 36.1 psu, se puede afirmar entonces que para la época de lluvias la masa de agua ubicada dentro de la bahía en el sector de Bocachica (la cual es menos densa y más caliente) puede llegar a generar un predominante flujo de salida de la bahía.

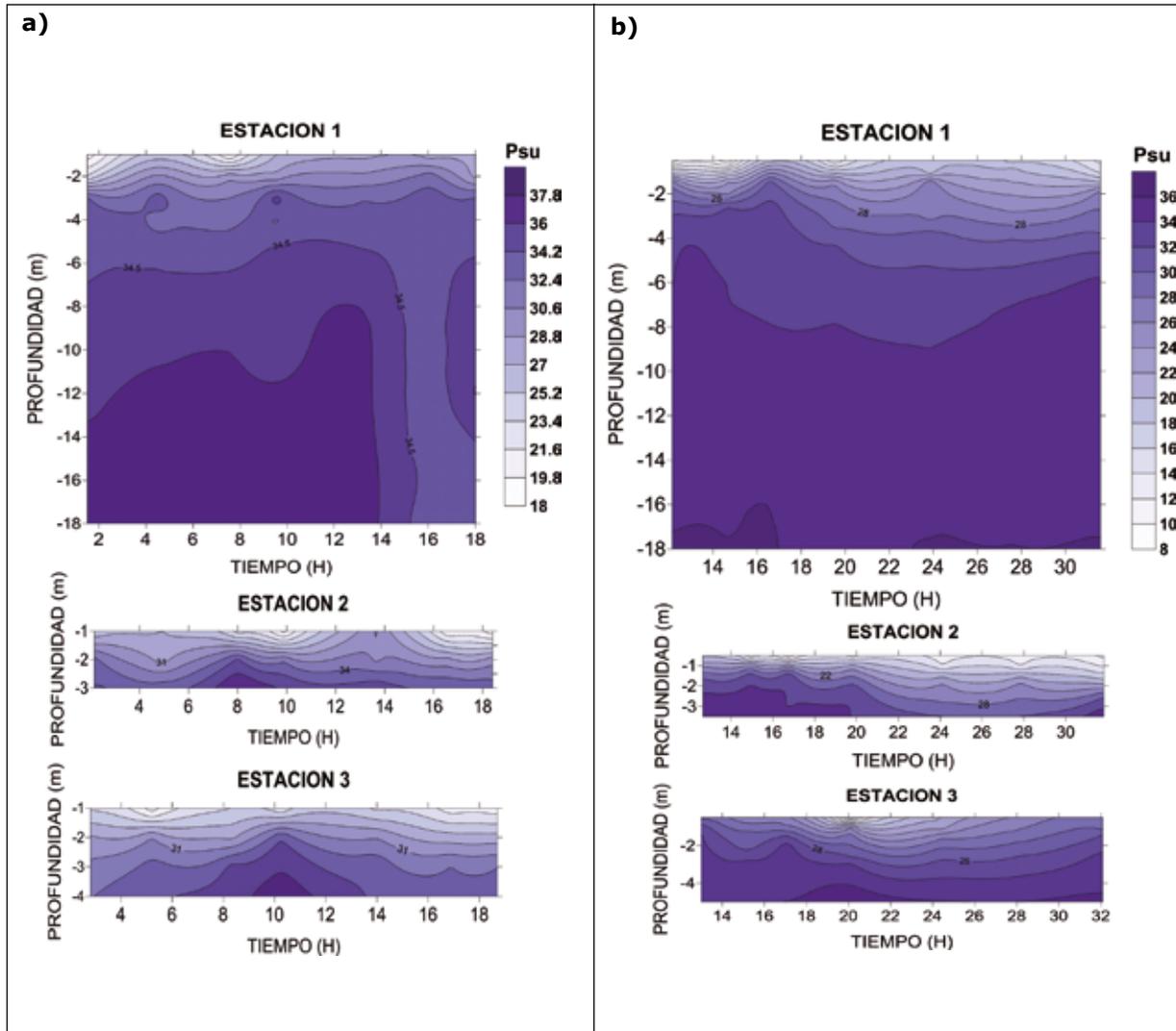


Figura 6. Salinidad en el canal de Bocachica. **a)** Época seca, **b)** Época de lluvia.

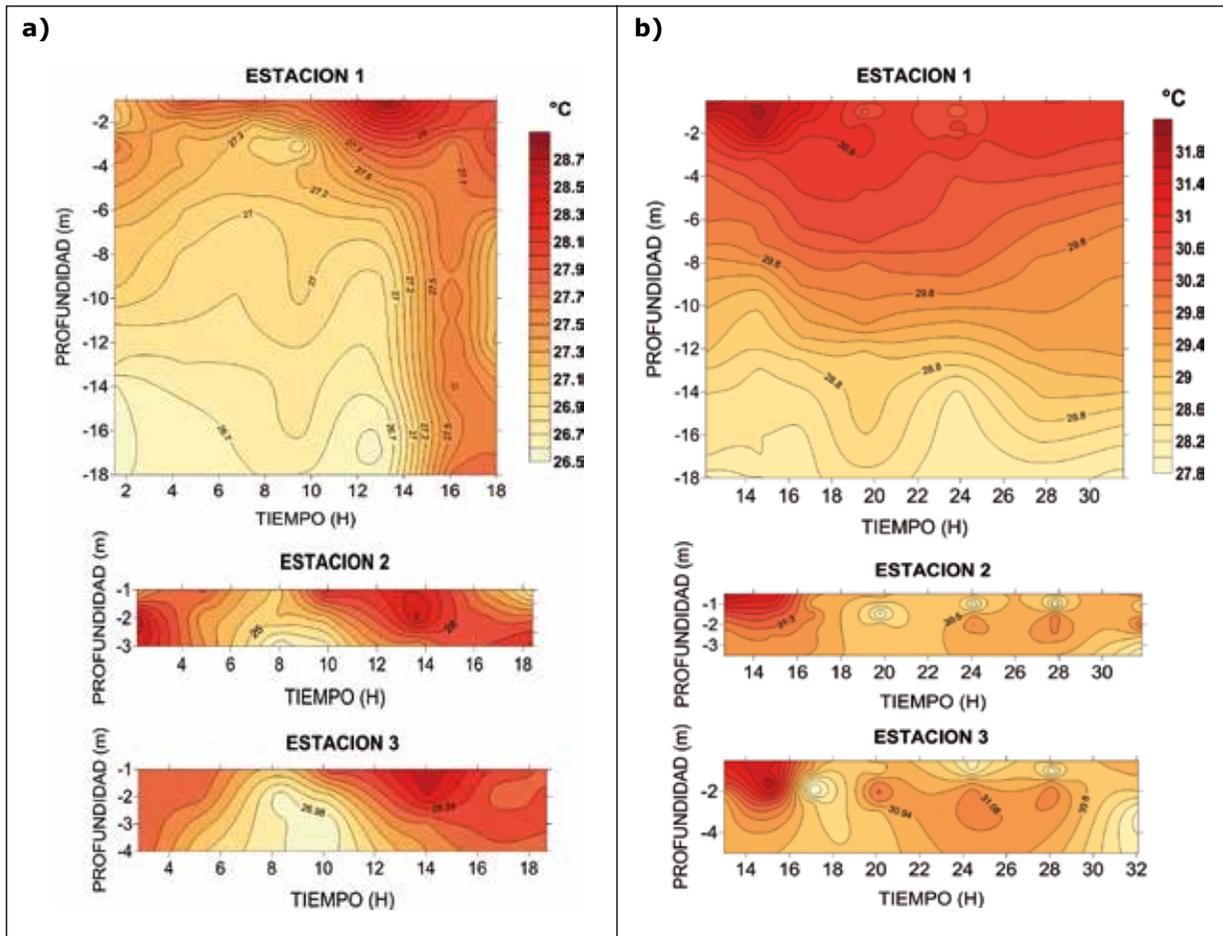


Figura 7. Temperatura en el canal de Bocachica. **a)** Época seca; **b)** Época de lluvias.

• **Comportamiento del flujo de agua en Bocachica (época seca):**

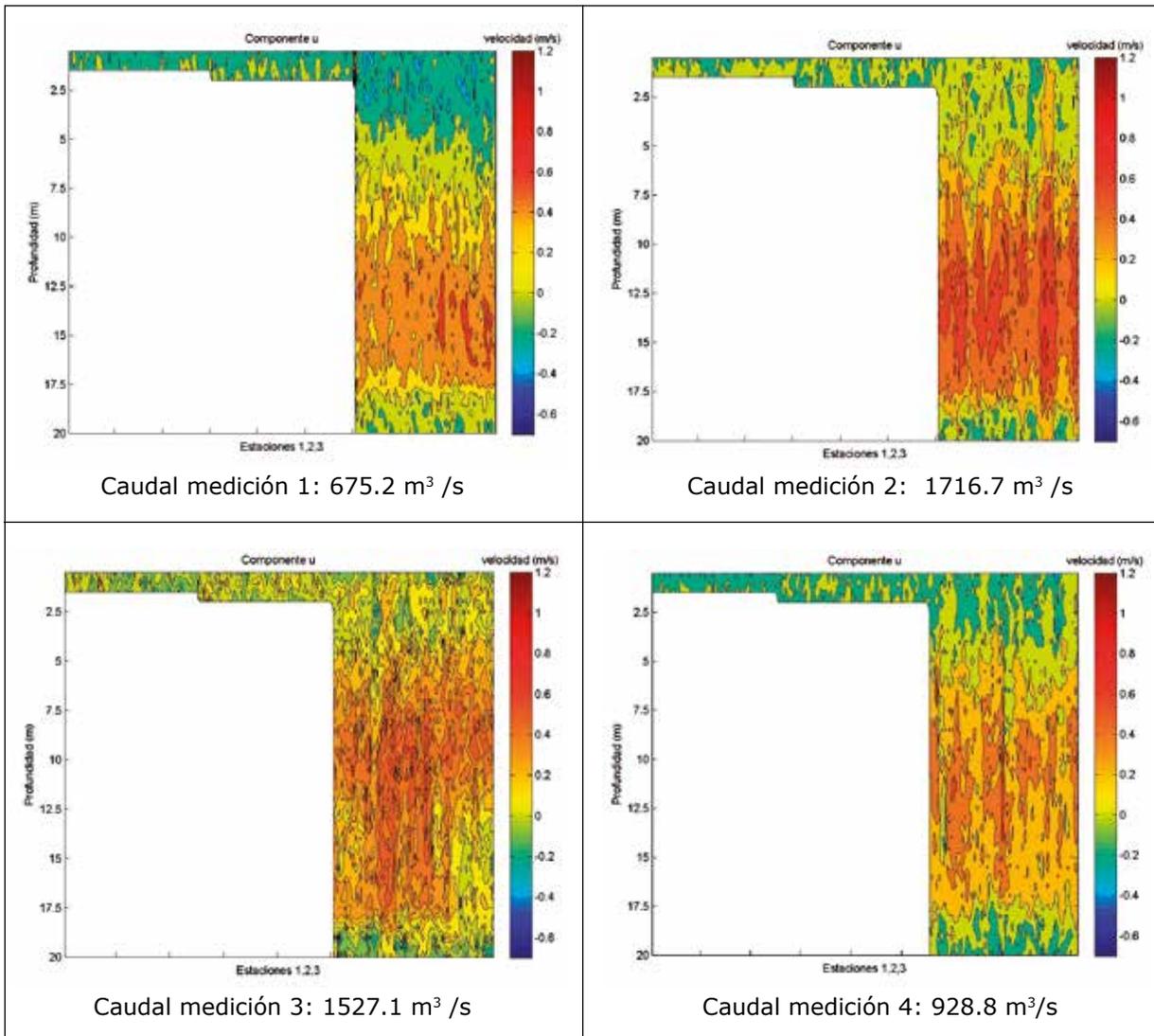
En el monitoreo de la Estación 1 se presentaron flujos de masas de agua hacia afuera de la bahía en los primeros 5 m de profundidad; sin embargo, después de los 6 m se observó un flujo con ingreso de agua más significativo que el de salida (Tabla II), mientras que en las estaciones 2 y 3 predominó un flujo de salida. Estos resultados indican un comportamiento influenciado directamente por

la marea y el aporte de agua dulce del Canal del Dique.

Para observar el intercambio de masas de agua durante un ciclo de marea se realizó una interpolación spline cúbico con siete cálculos de volumen realizados en el sector de Bocachica, de acuerdo con las mediciones de corrientes efectuadas en las tres estaciones de Bocachica (Fig. 8). El volumen total de ingreso de masa de agua en este sector, calculado para la época seca, fue de $53.9119 \times 10^6 \text{ m}^3$ durante un ciclo de marea.

Tabla II. Volumen integral (neto) de intercambio de masas en Bocachica, calculado durante el monitoreo en época seca.

Medición	Nivel de marea	Flujo total	Dirección
1	0.17 m	675.2 m ³ /s	Ingreso a la bahía
2	0.29 m	1716.7 m ³ /s	Ingreso a la bahía
3	0.46 m	1527.1 m ³ /s	Ingreso a la bahía
4	0.50 m	928.8 m ³ /s	Ingreso a la bahía
5	0.28 m	-347.6 m ³ /s	Salida de la bahía
6	0.20 m	336.2 m ³ /s	Ingreso a la bahía
7	0.19 m	1083.3 m ³ /s	Ingreso a la bahía



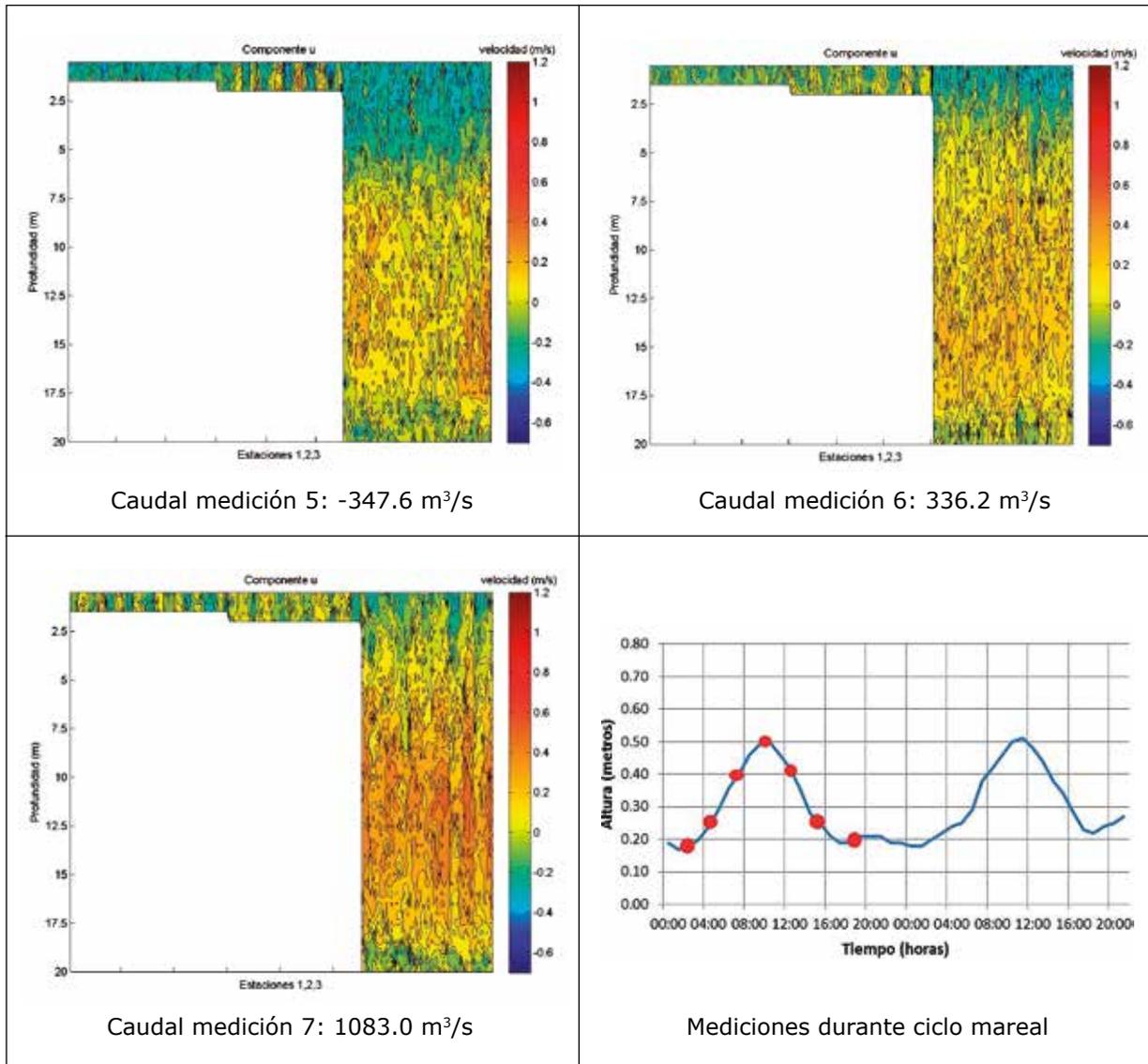


Figura 8. Corrientes medidas en la vertical. En la curva de marea se muestran (puntos en rojo) los momentos de las mediciones efectuadas en Bocachica (época seca).

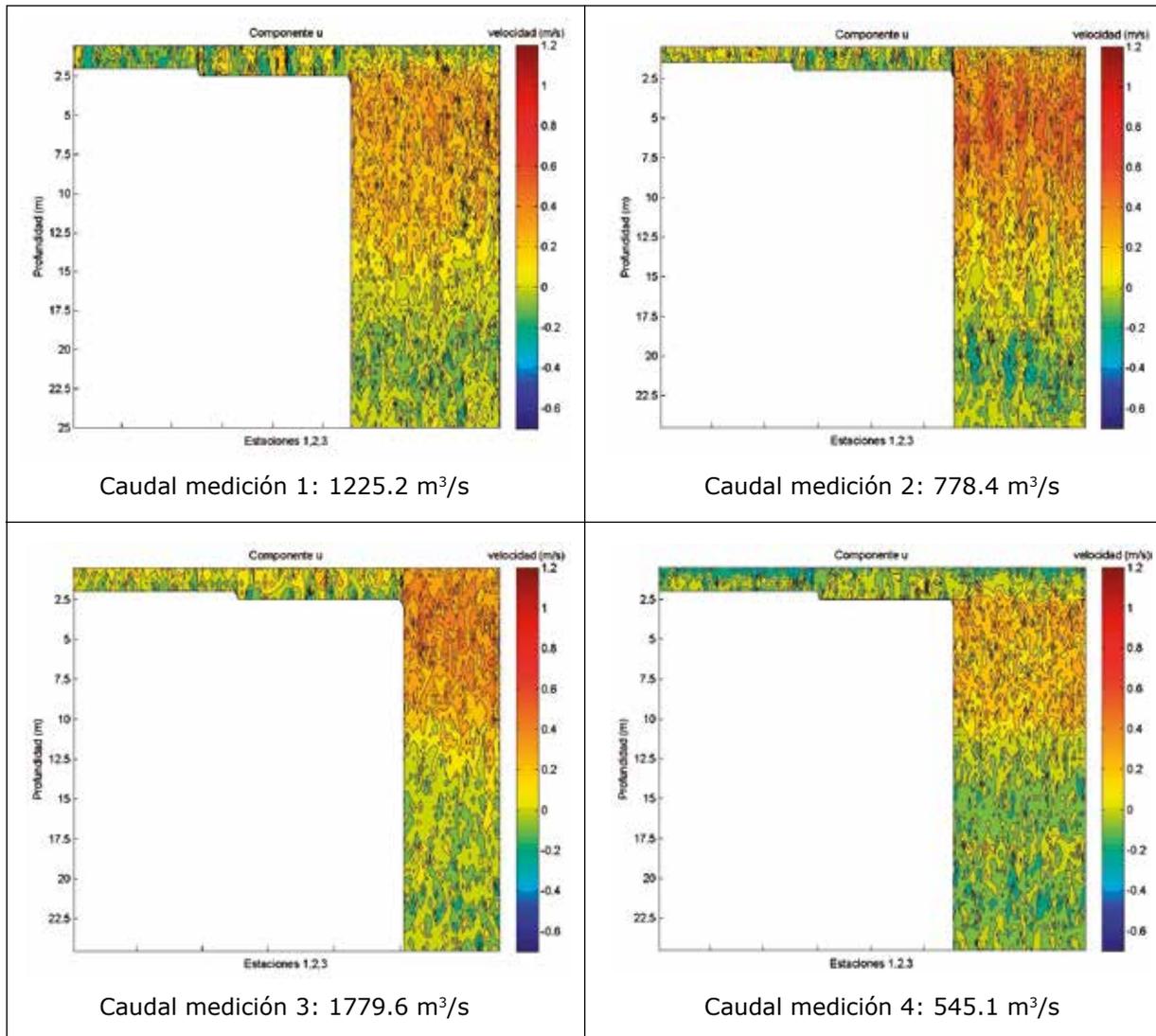
• **Comportamiento del flujo de agua en Bocachica (época de lluvia):**

Durante la mayor parte del ciclo de marea

se observaron flujos de entrada por este sector (Tabla III). El volumen total de ingreso de masa de agua durante un ciclo de marea, calculado para la época de lluvias, fue de 64.6450×10^6 m³ (Fig. 9).

Tabla III. Volumen integral (neto) de intercambio de masas en Bocachica, calculado durante el monitoreo en época de lluvias.

Medición	Nivel de marea	Flujo total	Dirección
1	0.33 m	1225.2 m ³ /s	Ingreso a la bahía
2	0.45 m	778.4 m ³ /s	Ingreso a la bahía
3	0.59 m	1779.6 m ³ /s	Ingreso a la bahía
4	0.69 m	545.1 m ³ /s	Ingreso a la bahía
5	0.49 m	-175 m ³ /s	Salida de la bahía
6	0.40 m	867.9 m ³ /s	Ingreso a la bahía
7	0.44 m	1264.9 m ³ /s	Ingreso a la bahía



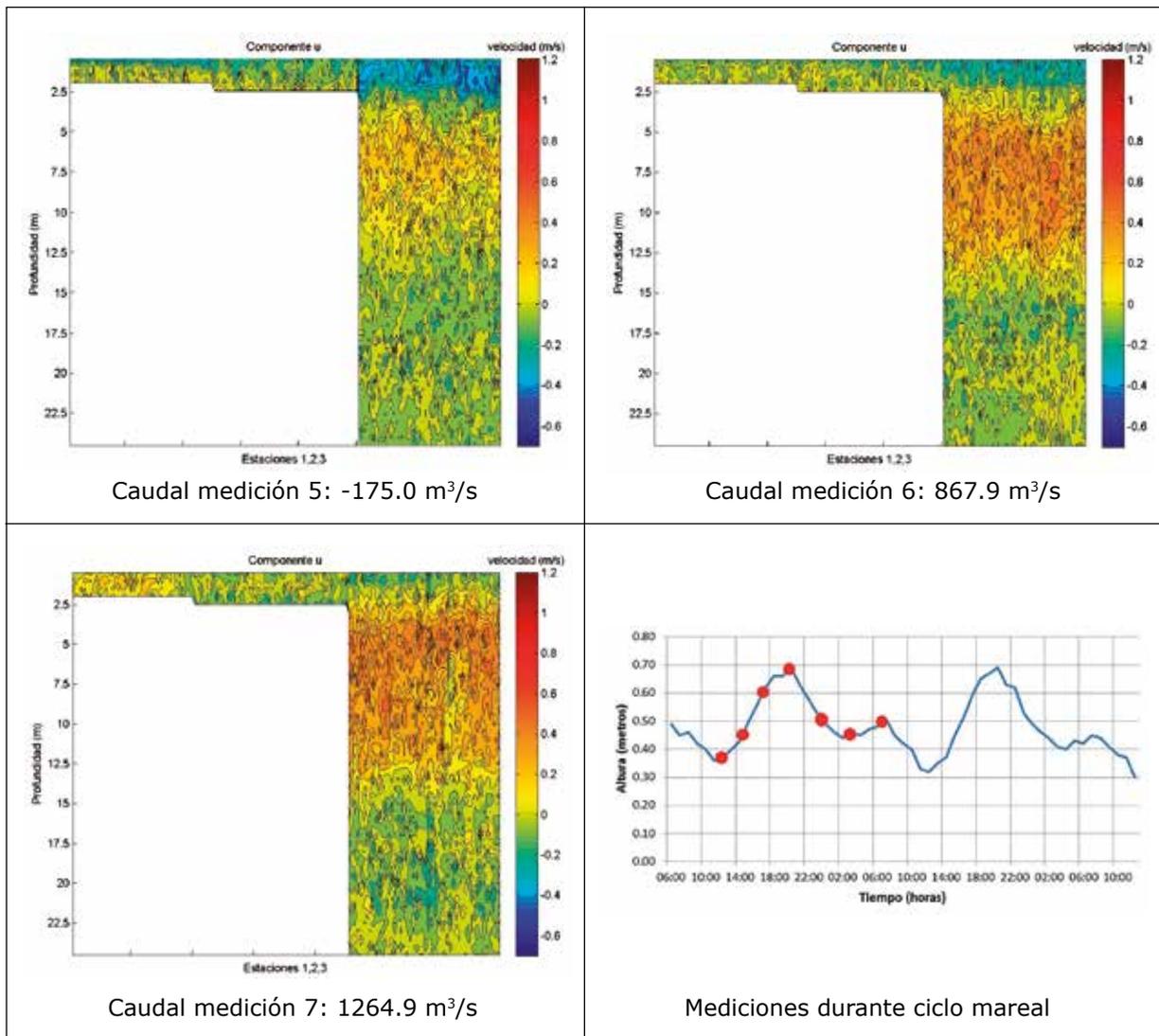


Figura 9. Corrientes medidas en la vertical. En la curva de marea se muestran (puntos en rojo) los momentos de las mediciones en Bocachica para época de lluvias.

Análisis datos en el sector de Bocagrande

La medición de la densidad durante la época seca mostró una estratificación bien definida, principalmente en la Estación 1; observándose que la densidad en la superficie oscila entre los 1010 a 1012 kg/m³ y aumenta levemente hasta los 1019 kg/m³; además, en las estaciones 2 y 3 la densidad permanece constante durante

el ascenso del nivel de marea, pero cuando la marea desciende, la densidad decrece hasta el fondo. En la capa superficial la densidad se estratifica y no presenta mayores variaciones (Fig. 10a). Para la época húmeda se encontró que la estratificación en toda la columna de agua continúa sin variaciones de consideración, caso similar ocurre en las estaciones 2 y 3 (Fig. 10b).

Existe una masa de agua diferenciada en la superficie y que corresponde a agua menos

densa y menos salina, proveniente del aporte y mezcla del agua dulce del Canal del Dique. Por otra parte, de acuerdo con las mediciones efectuadas en la época de lluvias, como era de esperarse, la salinidad superficial disminuyó, lo que se evidenció hasta los 12 m de profundidad, desde donde permanece constante (Fig. 11b).

En cuanto a la salinidad, se observó que en la Estación 1, durante la época seca, permanece estratificada en toda la columna de agua; mientras que en las estaciones 2 y 3, a partir de los 4 y 5 m de profundidad, la salinidad

permanece constante a lo largo de la columna de agua (35 psu); en la capa superficial continua estratificada, similar a la Estación 1 (Fig. 11a).

Referente a la temperatura en la Estación 1 durante la época seca, se detectó un aumento hasta los 28.7°C. Esto se explica ya que es en ese momento donde se presenta una mayor y directa incidencia de los rayos solares, además, la masa de agua que ingresa de mar abierto registra temperaturas entre los 27.0 y 28.5°C [20], inferior a la que se registró dentro de la bahía durante la época de lluvias.

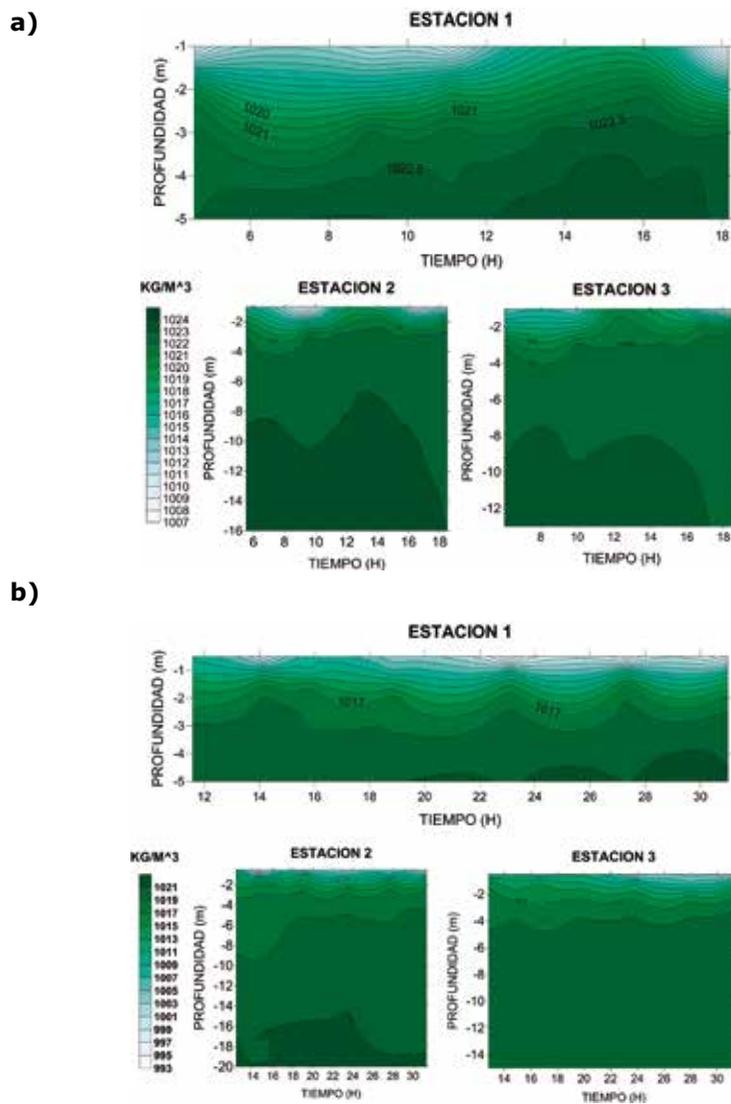


Figura 10. Monitoreo de la densidad en Bocagrande. **a)** Época seca; **b)** Época de lluvia.

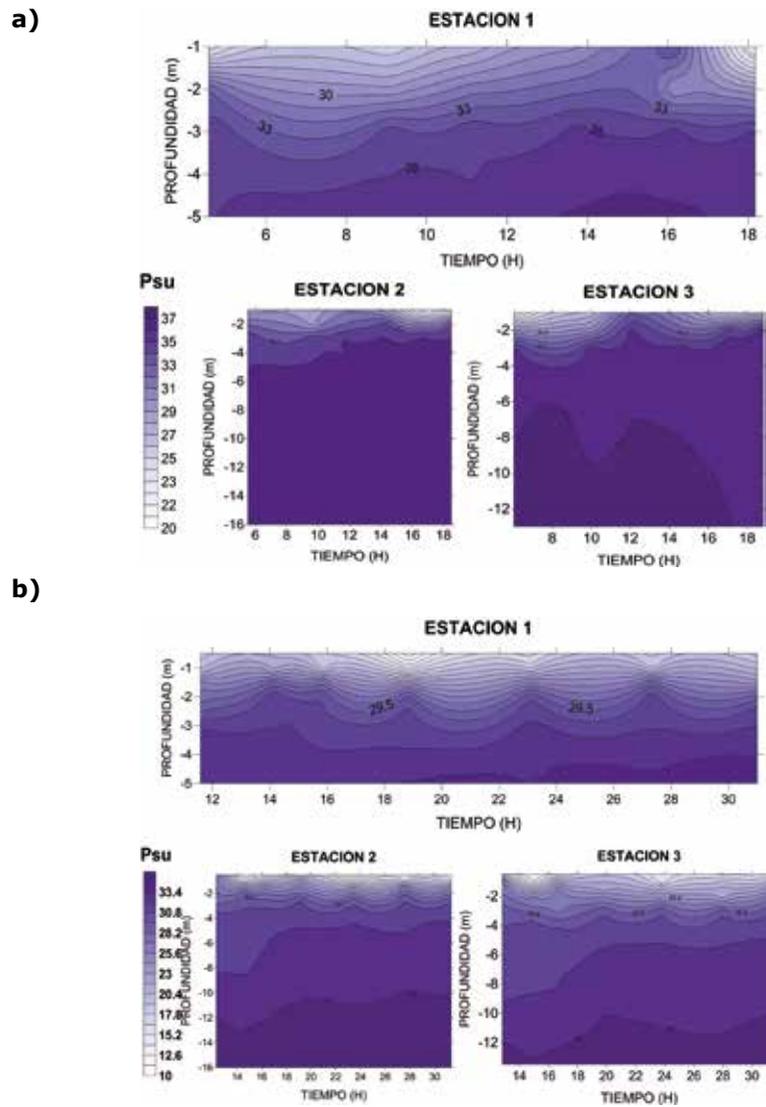


Figura 11. Monitoreo de la salinidad en Bocagrande. **a)** Época seca; **b)** Época de lluvia.

Por otra parte, en las estaciones 2 y 3 el aumento en la temperatura se amplía hacia aguas más profundas, con un aumento de hasta 27.9°C y se extiende desde los 4 m hasta los 12 m de profundidad, cuando la marea comienza a descender (Fig. 12a). Para la época

de lluvias en la Estación 1, durante todo el monitoreo, la columna de agua permaneció estratificada, mientras que en las estaciones 2 y 3 la temperatura superficial aumentó y se observó un máximo de temperatura hasta los 32°C (Fig. 12b).

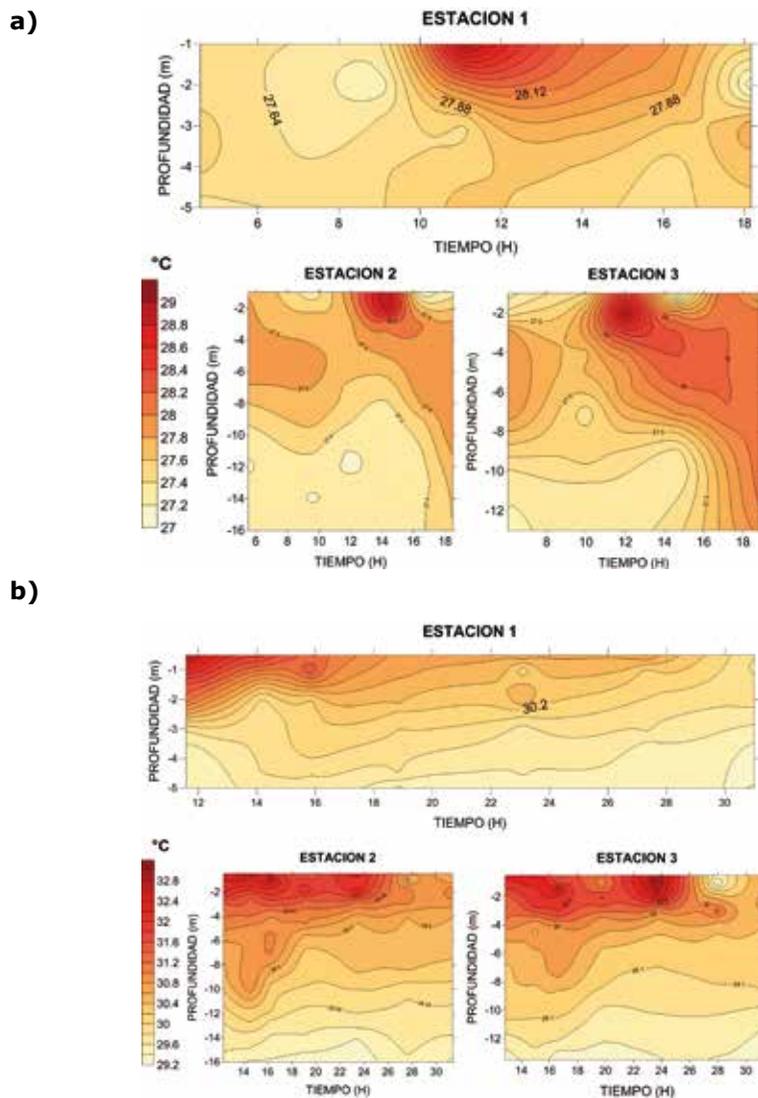


Figura 12. Monitoreo de la temperatura en Bocagrande. **a)** Época seca; **b)** Época de lluvia.

• **Comportamiento del flujo de agua en Bocagrande (época seca):**

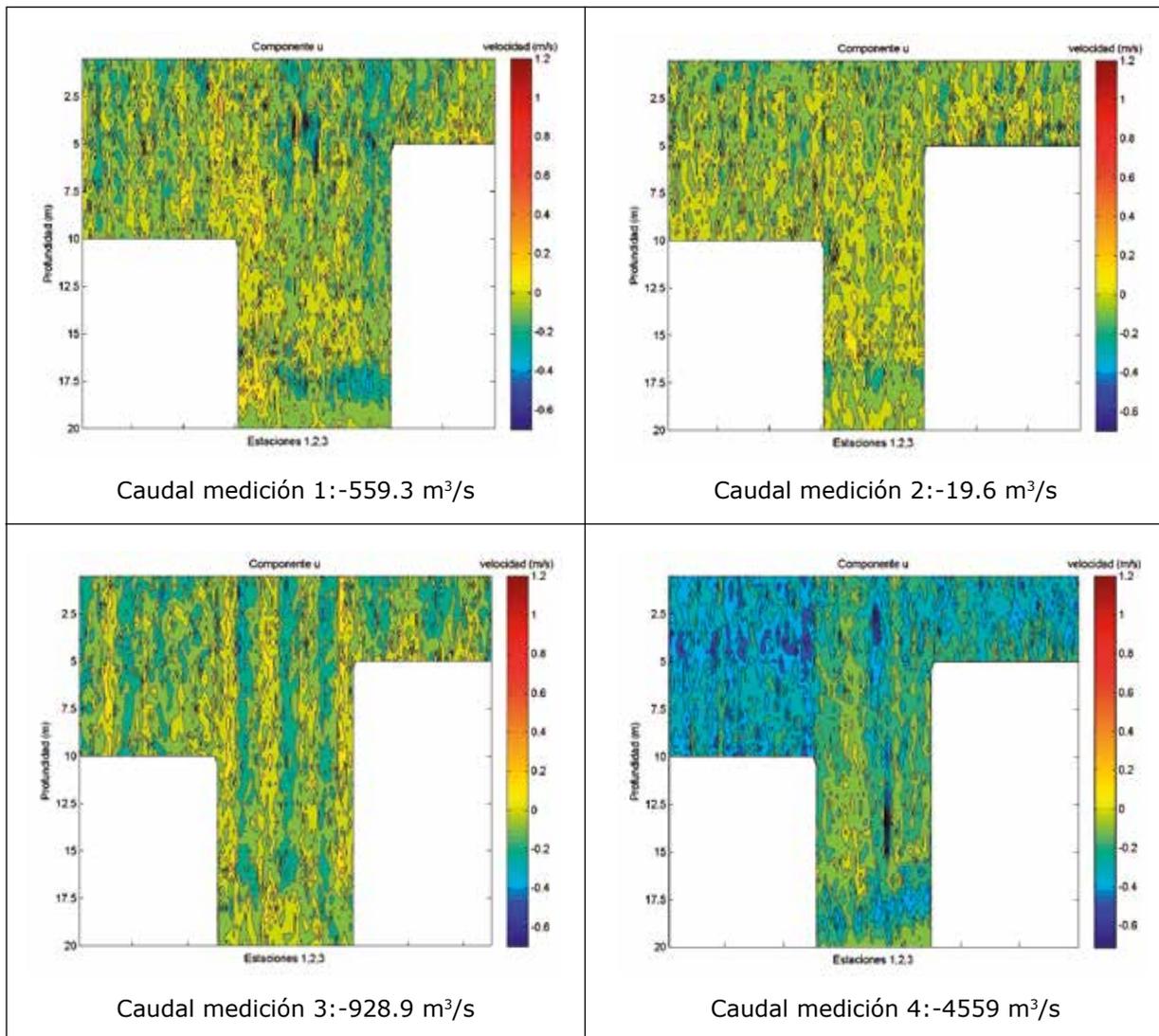
En la entrada de Bocagrande se efectuaron seis mediciones² (Fig. 13) y se observaron

predominantemente flujos de salida durante todo el ciclo de marea (Tabla IV). El volumen total de salida de masa de agua en este sector, calculado para la época seca fue de $75.4057 \times 10^6 \text{ m}^3$ durante un ciclo de marea.

² No se efectuaron las siete mediciones como se tenía planeado, debido a condiciones de fuerte oleaje durante el monitoreo.

Tabla IV. Volumen integral (neto) de intercambio de masas en Bocagrande, calculado durante el monitoreo en época seca.

Medición	Nivel de marea	Flujo total	Dirección
1	0.25 m	-559.3 m ³ /s	Salida de la bahía
2	0.48 m	-19.6 m ³ /s	Salida de la bahía
3	0.51 m	-928.9 m ³ /s	Salida de la bahía
4	0.36 m	- 4559.6 m ³ /s	Salida de la bahía
5	0.26 m	-691.3 m ³ /s	Salida de la bahía
6	0.22 m	-1781.1 m ³ /s	Salida de la bahía



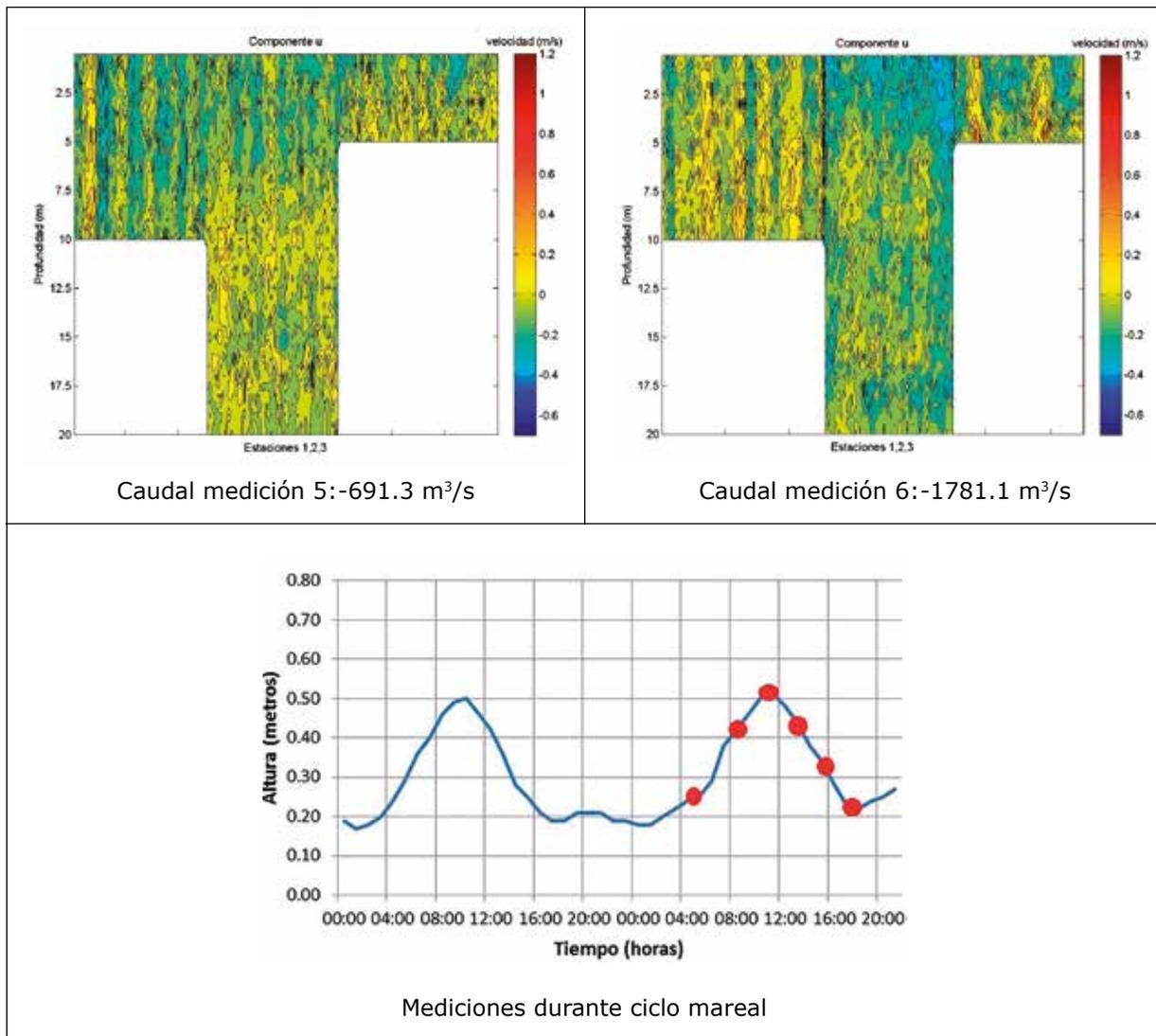


Figura 13. Corrientes medidas en Bocagrande durante la época seca.

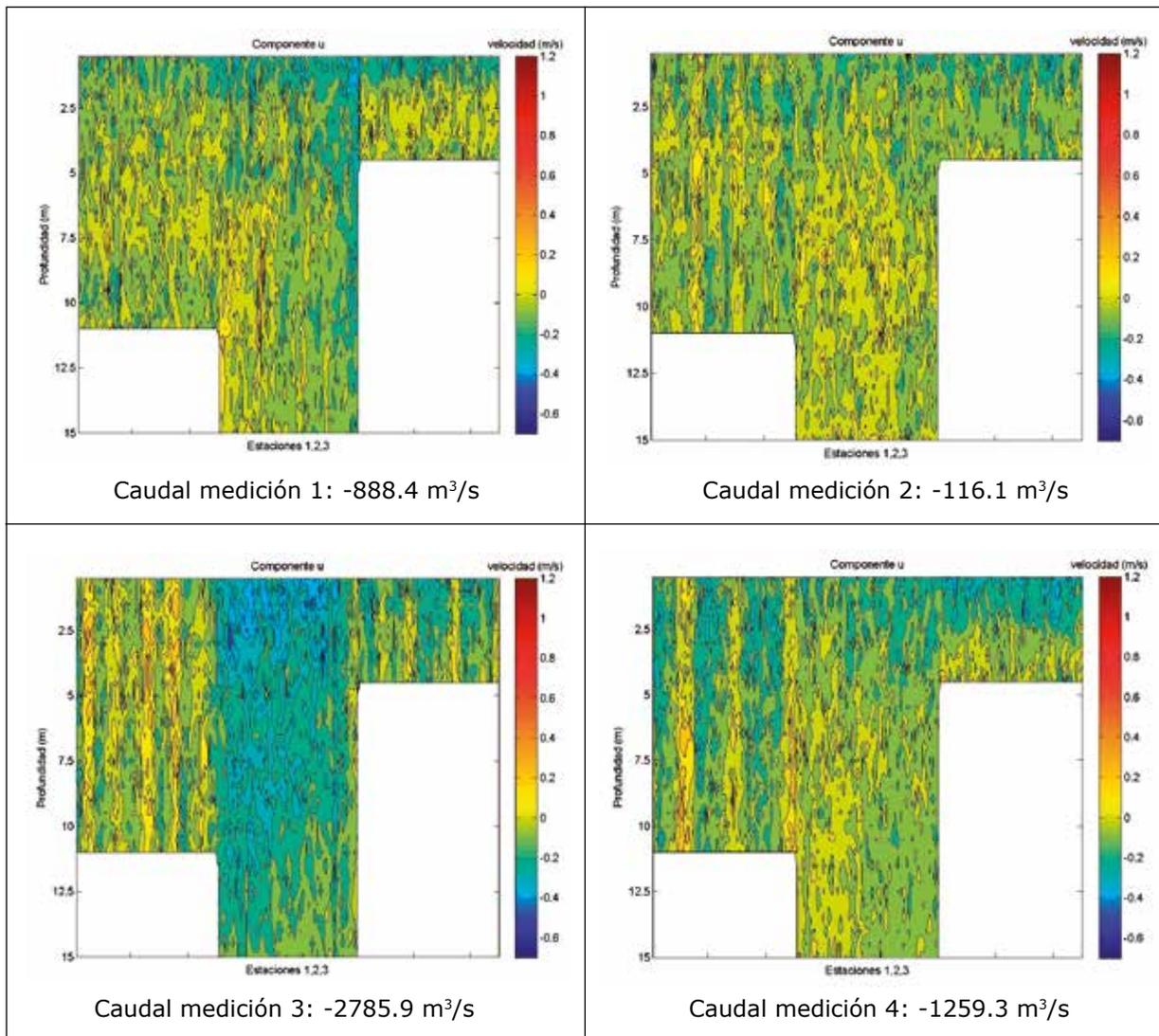
• **Comportamiento del flujo de agua en Bocagrande (época de lluvias):**

Durante el monitoreo se observó un mayor

predominio en el flujo de salida (Tabla V). El volumen total de salida de masa de agua, calculado para la época de lluvias, fue de 55.7392×10^6 m³ durante un ciclo de marea (Fig. 14).

Tabla V. Volumen integral (neto) de intercambio de masas en Bocagrande, calculado durante el monitoreo en época de lluvias.

Medición	Nivel de marea	Flujo total	Dirección
1	0.36 m	-888.4 m ³ /s	Salida de la bahía
2	0.50 m	-116.1 m ³ /s	Salida de la bahía
3	0.59 m	-2785.9 m ³ /s	Salida de la bahía
4	0.69 m	-1259.3 m ³ /s	Salida de la bahía
5	0.51 m	-174.6 m ³ /s	Salida de la bahía
6	0.45 m	-595.2 m ³ /s	Salida de la bahía
7	0.45 m	-1505.3 m ³ /s	Salida de la bahía



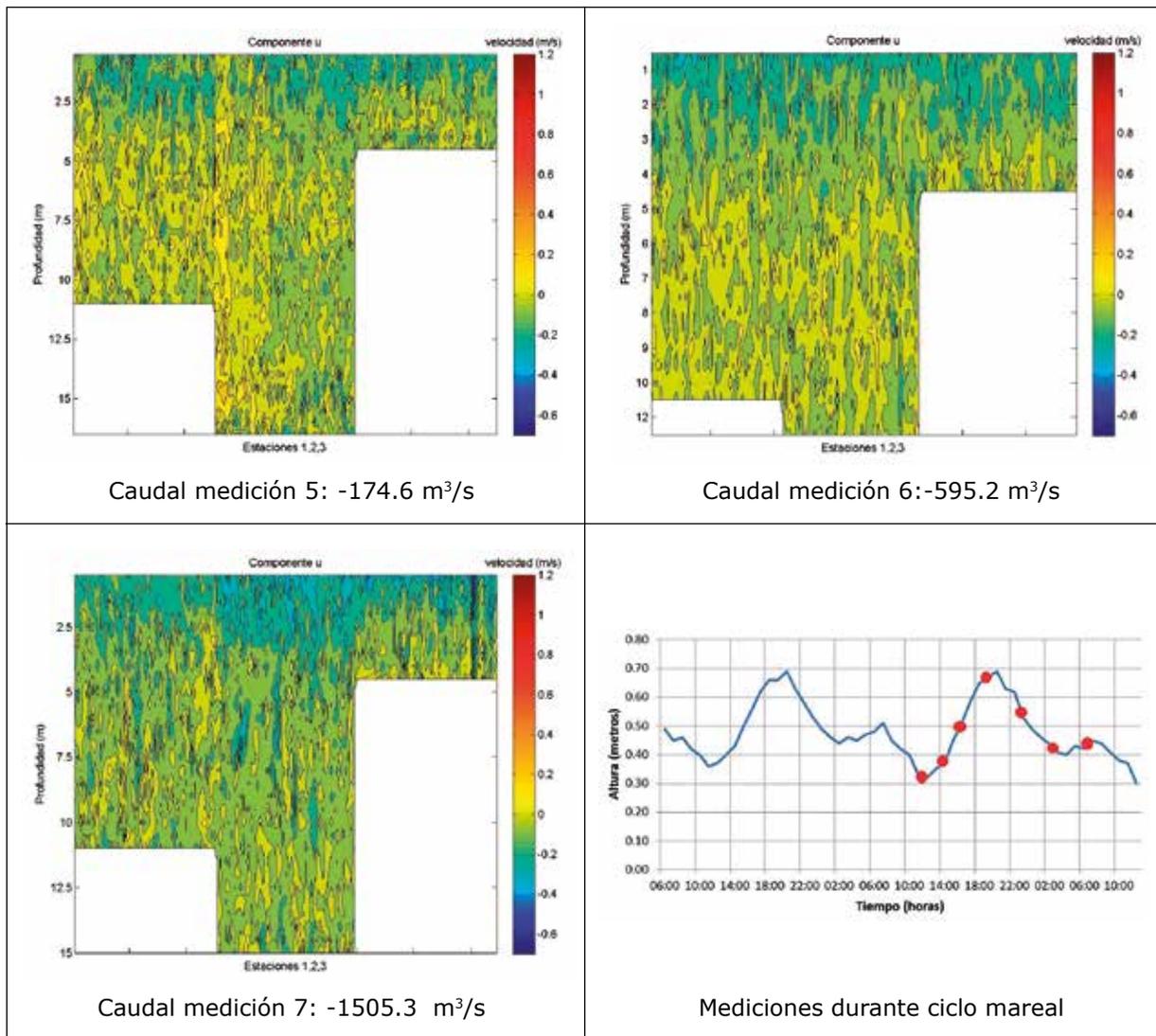


Figura 14. Corrientes medidas en la vertical. En la curva de marea se muestran (puntos en rojo) los momentos de las mediciones efectuadas en Bocagrande durante la época de lluvias.

Análisis de las mediciones en el Canal del Dique

- **Descarga del Canal del Dique (época seca):**

Se efectuaron tres mediciones en un transepto (Fig. 1d) y se realizó batimetría del sector. El levantamiento batimétrico fue realizado el 25

de enero/13 (km 107, estación de Gambote). El caudal en ese sector se calculó en 85.7 m³/s (Fig. 15a), equivalente a un volumen de 5.2448x10⁶ m³ durante el ciclo de marea.

- **Descarga del Canal del Dique (época de lluvias):**

La medición tuvo lugar el 19 de junio/13. Para esa fecha la estación Gambote registró un nivel

de 6 m, con una diferencia de 1.5 m respecto al nivel registrado durante el monitoreo de la época seca. Esta diferencia de nivel fue agregada a la batimetría realizada durante la época seca. La medición de corrientes efectuada en las tres estaciones durante la época de lluvias mostró un incremento hasta 0.9 m/s (en época seca la

medición fue en promedio de 0.3 m/s), con lo que se calculó un caudal de 295.2 m³/s (Fig. 15b), equivalente a un volumen de 21.2544x10⁶ m³, durante el ciclo de marea. La descarga del Canal del Dique, de acuerdo con la medición realizada en la época de lluvias, es 3.45 veces mayor que la de la época seca.

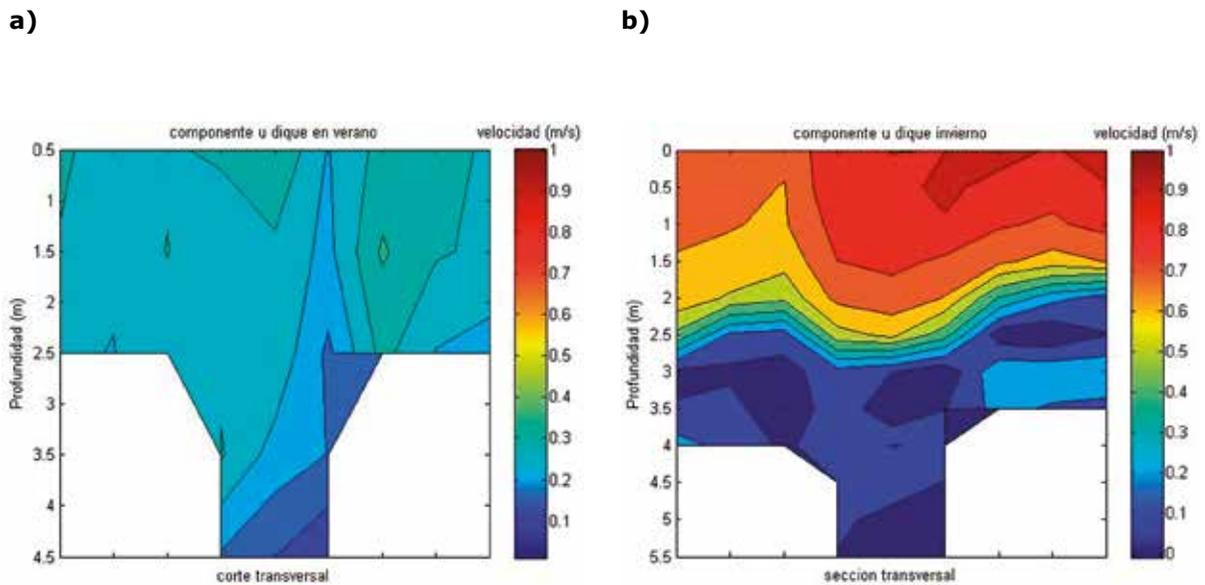


Figura 15. Velocidad de la corriente medida e interpolada para una sección transversal del Canal del Dique. **a)** Época de seca; **b)** Época de lluvias

• **Balance de masas de agua en la bahía de Cartagena:**

En la Figura 16 se describe el balance de masas en la bahía, mientras que en la Tabla VI se consignan los volúmenes de intercambio calculados.

En Bocachica se calculó el volumen de agua que ingresó a la bahía, el cual fue mayor en época de lluvias con una diferencia de 14.6927x10⁶ m³, respecto a la medición de la época seca. Asimismo, en Bocagrande se observó que el volumen de agua que salió de la bahía a través de los puntos de medición fue mayor en época de lluvias con

una diferencia de 2.3379x10⁶ m³ respecto a la medición de época seca.

De acuerdo con lo modelado por [4], en el que utilizaron caudales mínimos (50 m³/s) y máximos (250 m³/s) de descarga del Canal de Dique, para la época seca y de lluvias, respectivamente, se observó que existe un comportamiento similar en el que se presenta una variación en los regímenes de flujo de entrada y salida a la bahía dependiendo de la época del año (Tabla VI). Los caudales de descarga del Canal del Dique, medidos en el presente estudio, durante la época seca y de lluvias fueron de 85.7 m³/s y 295 m³/s, respectivamente.

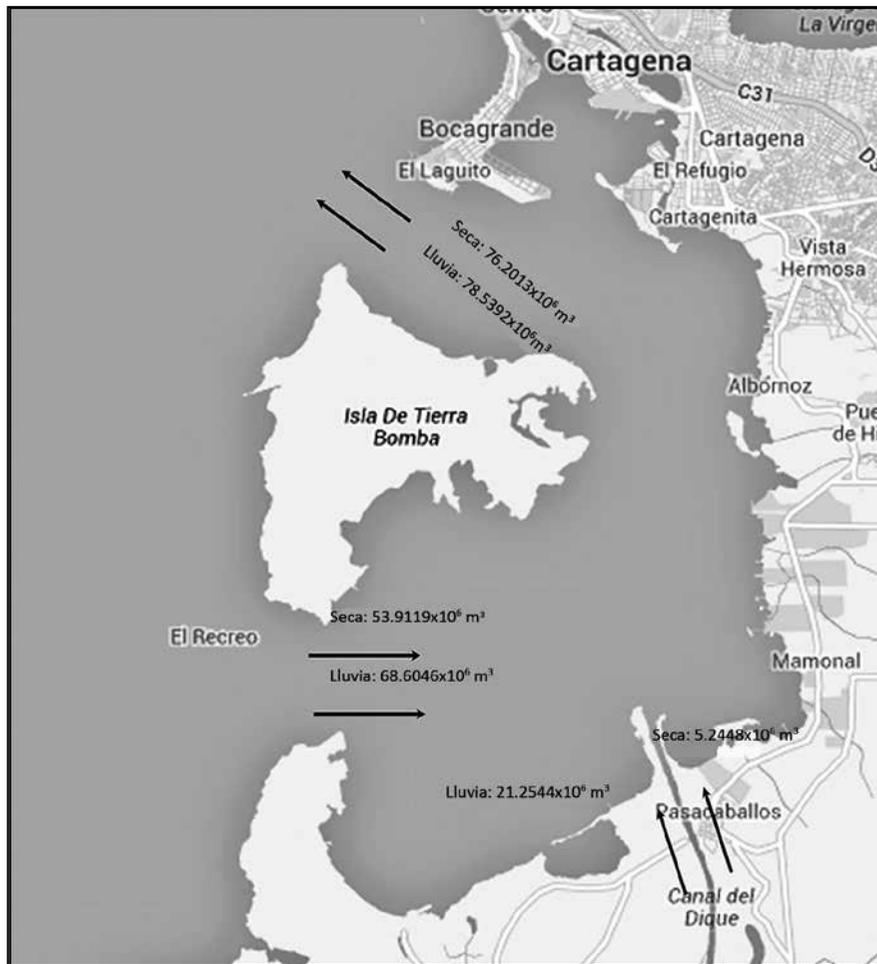


Figura 16. Volúmenes de agua medidos en Bocachica, Bocagrande y Canal del Dique para cada época.

Tabla VI. Comparación de volúmenes modelados en Bocagrande y Bocachica [4], con volúmenes medidos durante un ciclo de marea, para época seca y de lluvias, considerando diferentes caudales de descarga en el Canal del Dique.

	Área	Volumen modelado ($\times 10^6 \text{ m}^3$)	Volumen medido ($\times 10^6 \text{ m}^3$)
Época seca	Bocagrande	- 48.29	-76.20
	Bocachica	54.33	53.91
Época de lluvias	Bocagrande	-88.86	-78.53
	Bocachica	80.9	68.60

DISCUSIÓN

- Si bien los valores medidos en el presente estudio corresponden a mediciones efectuadas durante un ciclo de marea, no son valores que se puedan afirmar ocurren siempre, pues estos pueden variar teniendo en cuenta fenómenos locales que pudiesen llegar a ocurrir durante cada una de las épocas climáticas.
- Es de tener en cuenta el posible efecto que tiene La Escollera sumergida ubicada en el sector de Bocagrande, que actúa como barrera en el intercambio de las masas de agua y afecta la medición de la velocidad en la corriente.

CONCLUSIONES

- Ocurre una dinámica estuarina en la bahía de Cartagena que varía de acuerdo con la época del año (seca o lluvias), la cual hace que se presente un incremento o disminución sustancial de agua dentro de la misma, dependiendo de los niveles del Canal del Dique, los cuales a su vez afectan el balance e intercambio de masas de agua de la bahía con el mar abierto. Esto fue evidenciado con las mediciones efectuadas por el mareógrafo ubicado dentro de la bahía.
- Otros parámetros también sufren perturbaciones como son la densidad, temperatura y salinidad; debido al aporte de agua dulce proveniente del Canal del Dique y que influyen en la dinámica estuarina de la zona.
- Los resultados obtenidos en las mediciones realizadas en Bocagrande y Bocachica indican de manera general, tanto para la época seca como para la de lluvias, un flujo de salida en el sector de Bocagrande y un flujo de ingreso en el sector de Bocachica, teniendo en cuenta que en ambos lugares se presentan flujos de ingreso y salida hacia la bahía.
- Existe un flujo de volumen dominante hacia la bahía en Bocachica, que sumado al aporte de Canal del Dique y para la época seca fue de $59.1567 \times 10^6 \text{ m}^3$, y un flujo de volumen de salida por Bocagrande de $76.2013 \times 10^6 \text{ m}^3$, evidenciando una disminución del 28.81% en el volumen de agua aportado a la bahía; mientras que para la época de lluvias el flujo de volumen aportado a la bahía por Bocachica y el Canal del Dique fue de $89.8590 \times 10^6 \text{ m}^3$ y un flujo de volumen de salida por Bocagrande

de $78.5392 \times 10^6 \text{ m}^3$, lo que permitió determinar un incremento del 12.59 % en el volumen de agua aportado a la bahía.

RECOMENDACIONES

Si se efectuara un monitoreo más completo durante un ciclo lunar (28 días, aproximadamente), ese estudio podría arrojar resultados diferentes y precisaría aún más la dinámica de intercambio de agua, y podría ser un elemento a tener en cuenta para el control de la descarga del Canal del Dique, contribuyendo así al mejoramiento de la calidad de aguas de la bahía de Cartagena.

Para lograr un estudio más detallado sobre el balance de masas de agua en la bahía de Cartagena se deberá de contemplar otros aportes existentes a la bahía tales como, caños, escorrentías por lluvias y el efecto de la evaporación. Estas recomendaciones pueden llegar a servir para mejorar y complementar resultados o efectuar otros estudios y/o investigaciones que complementen la presente investigación.

LITERATURA CITADA

- [1] Rueda J. Estudio de la hidrodinámica y sus mecanismos forzadores en la bahía de Cartagena. Cartagena D.T.; 2010.
- [2] Hsu M, Kuo AY, Kuo J, Liu W. Procedure to Calibrate and Verify Numerical Models of Estuarine Hydrodynamics. *Journal of Hydraulic Engineering* 1999;125(2):166-182.
- [3] Matsuno T, Shigeoka M, Tamaki A, Nagata T, Nishimura K. Distributions of water masses and currents in Tachibana Bay, west of Ari-Ake Sound Kyushu Japan. *Journal of Oceanography* 1999;55:515-529.
- [4] Hibmaa A, Stivea MJF, Wang ZB. Estuarine morphodynamics. *Coastal Engineering* 2004;51:765-778.
- [5] Lozano Y, Medellín J, Navas, G. Contexto climático y oceanográfico del mar Caribe colombiano. En: *Biodiversidad del margen continental del Caribe colombiano*, Serie de Publicaciones Especiales Invemar, N° 20, Invemar (Eds.), pp. 53-81; 2010.
- [6] Palacio C, García F, García U. Calibración de un modelo hidrodinámico 2D para la bahía

- de Cartagena. Dyna, N° 164, pp. 152-166; 2010.
- [7] Lonin S y Giraldo L. Circulación de las aguas y transporte de contaminantes en la bahía interna de Cartagena. Bol. Cient. CIOH 1995;16:25-56.
- [8] Tuchkovenko YS, Lonin S, Calero LA. Modelo de eutroficación de la bahía de Cartagena y su aplicación práctica. Bol. Cient. CIOH 2002;20:28-44.
- [9] Molares R, Mestres M. La influencia de la descarga del Canal del Dique en los niveles del mar de la bahía de Cartagena-Colombia. Bol. Cient. CIOH 2012;30:13-28.
- [10] Molares R, Mestres M. 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 2012;30:53-74.
- [11] Pagliardini JL, Vernet G, Gómez M. Síntesis del proyecto bahía de Cartagena. Bol. Cient. CIOH 1982;4:49-110.
- [12] Lonin S, Parra C, Andrade C, Thomas Y. Patrones de la pluma turbia del Canal del Dique en la bahía de Cartagena. Bol. Cient. 2004;22:77-89.
- [13] Aguilera M. El Canal del Dique y su subregión: una economía basada en la riqueza hídrica. Banco de la República. Bolívar: Cartagena de Indias. Vol. 72; 2006, 87 pp.
- [14] Garay J, Giraldo L. Influencia de los aportes de materia orgánica externa y autóctona en el decrecimiento de los niveles de oxígeno disuelto en la bahía de Cartagena. Bol. Cient. CIOH 1998;18:1-13.
- [15] Zambrana B, Marín G. Estado de los estuarios y lagunas costeras en Colombia año 2000. Informe del estado de los ambientes marinos y costeros en Colombia: año 2000: 70 83; 2000.
- [16] Gómez A, Osorio A, Toro F, Osorio J, Álvarez O. Efecto del cambio de los caudales del Canal del Dique sobre el patrón de transporte horizontal en la bahía de Barbacoas. Bol. Cient. CIOH 2009;27:90-111.
- [17] Ordóñez JI, Cubillos Peña CE, Forero G. Balance hídrico y sedimentológico del Canal del Dique y sus efectos sobre la sedimentación de la bahía de Cartagena. Laboratorio de ensayos hidráulicos, Universidad Nacional de Colombia; 2007. Pp. 1-18.
- [18] Franco E, Gómez J. Evolución de la línea de costa del litoral antioqueño. Aspectos geomorfológicos, sector: río Necoclí-Turbo. Trabajo de grado; 1996. 106 pp.
- [19] Valdés C. Unidades de Paisaje. En: Lineamientos del ordenamiento territorial del distrito turístico y cultural de Cartagena de Indias. Cartagena; 2001. 206 pp.
- [20] Urbano JE. Masas de agua del Caribe colombiano. Bol. Cient. CIOH 1993;14:3-30.