

Research Article

Bahía de Cartagena (Colombia): distribución de sedimentos superficiales y ambientes sedimentarios

**Juan C. Restrepo¹, Diana Franco², Jaime Escobar^{3,4}, Iván Darío Correa⁵
Luis Otero¹ & Julio Gutiérrez⁶**

¹Departamento de Física, Grupo de Física Aplicada: Océano y Atmosfera, Barranquilla
Universidad del Norte (UNINORTE), km 5 vía Puerto Colombia, Colombia

²Instituto Colombiano del Petróleo, Grupo de Investigación en Estratigrafía
Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia

³Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Norte (UNINORTE)
Barranquilla, Colombia

⁴Center for Tropical Paleocology and Archeology (CTPA)
Smithsonian Tropical Research Institute (STRI), Panamá

⁵Grupo de Ciencias del Mar, Departamento de Geología
Universidad Eafit, Medellín, Colombia

⁶Área de Manejo Integral de Zonas Costeras, Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas
Dirección General Marítima, Cartagena, Colombia

RESUMEN. Se analizó la distribución espacial y las principales características texturales de 234 muestras de sedimentos superficiales de la bahía de Cartagena. Para caracterizar los ambientes de depósito en el fondo de la bahía se aplicaron tres funciones discriminantes para diferenciar entre: (i) depósitos de playa y marino somero agitado, (ii) depósitos fluviales y marino someros, y (iii) depósitos fluviales influenciados por corrientes de turbidez. Los sedimentos predominantes fueron lodos medios ($5,35 \pm 1,2 \varphi$), pobremente clasificados ($\sigma = 1,63 \pm 0,8$), con notable asimetría ($S_k = -0,052 \pm 0,2$) y curtosis (k) de $0,84 \pm 0,4$. Se encontró dos tipos principales de depósitos recientes en la bahía de Cartagena: marino somero agitado, de dominio fluvial, y depósitos de corrientes de turbidez, de dominio fluvial. Los contenidos más bajos de arena (<5%) se encontraron a lo largo de un eje latitudinal que va desde el prodelta del Canal del Dique hasta el extremo occidental de isla de Tierrabomba. Los contenidos de CaCO_3 de los depósitos sedimentarios fueron menores al 10%. Los sedimentos calcáreos autógenos han sido cubiertos por sedimentos finos de origen terrígeno transportados por el Canal del Dique, el cual tiene un papel más activo y predominante en la sedimentación de la bahía de lo que se ha señalado previamente.

Palabras clave: sedimento superficial, análisis textural, ambientes sedimentarios, bahía de Cartagena, Canal del Dique, Colombia.

Cartagena Bay (Colombia): superficial sediments distribution and sedimentary environments

ABSTRACT. We studied the spatial distribution and textural characteristics of 234 surface sediment samples from the Bay of Cartagena, Colombia, to understand sedimentation processes over the last few decades. We used three discriminant functions to characterize depositional environments and to differentiate among: (i) beach deposits and sediments of high-energy, shallow marine environments, (ii) fluvial deposits and sediments of shallow marine environments, and (iii) fluvial deposits influenced by turbidity currents. The predominant sediment type is a medium-size ($5.35 \pm 1.2 \varphi$), poorly sorted ($\sigma = 1.63 \pm 0.8$) mud, with a noticeable asymmetry ($S_k = -0.052 \pm 0.2$) and kurtosis (k) of 0.84 ± 0.4 . There were two main superficial sediments types in the Bay of Cartagena: (1) sediments of high-energy, shallow marine environments with high fluvial influence, and (2) turbidity current deposits with high fluvial influence. Sediments with the lowest sand content (<5%) are located along a latitudinal axis running from the Dike Channel prodelta to the western end of Tierrabomba Island. The CaCO_3 content of the sediments is <10%. Autogenous calcareous sediments are

covered by fine terrigenous sediment transported through the Dike Canal, which has a more active and dominant role in the Bay's sediment deposition than previously reported.

Keywords: surface sediment, textural analysis, sedimentary environments, Cartagena Bay, Dike Channel, Colombia.

Corresponding author: Juan Camilo Restrepo (restrepcj@uninorte.edu.co)

INTRODUCCION

Su carácter colonial, playas extensas y variados paisajes litorales (*e.g.*, acantilados, manglares, arrecifes de coral) han hecho de Cartagena de Indias (Colombia) (Fig. 1) uno de los destinos turísticos más visitados en Latinoamérica. En la última década la ciudad también registró un aumento significativo en sus actividades comerciales y portuarias. Esta última, con un incremento del 138% en la carga movilizada por vía marítima entre los años 2000 (3.8×10^6 ton año⁻¹) y 2008 (9.1×10^6 ton año⁻¹) (SPRC, 2009). El notable aumento en el tráfico marítimo comercial ha obligado a la realización de dragados y a la rectificación del canal de acceso para mantener la navegabilidad en la bahía de Cartagena (MITCH, 1973; LEH-MINTRANSPORTE, 1988; Universidad Nacional de Colombia, 2002, 2007), lo cual ha generado un interés creciente en profundizar el conocimiento sobre aspectos geológicos básicos, incluyendo: (1) el origen, composición y distribución de sus depósitos recientes de sedimentos, y (2) la importancia de los aportes fluviales del Canal del Dique en los procesos de sedimentación de la bahía (*e.g.*, Vernet *et al.*, 1984; Leble & Cuignon, 1987; CIOH, 1988; LEH-MINTRANSPORTE, 1988; Andrade *et al.*, 2004). Estos estudios han evidenciado, entre otros aspectos, el predominio progresivo de los sedimentos terrígenos, la notable influencia de los aportes fluviales del Canal del Dique y el aumento de las tasas de sedimentación en sitios específicos dentro de la bahía y sobre la plataforma continental al frente de Cartagena. Los análisis texturales y de contenido de CaCO₃ de los sedimentos marinos superficiales, en el sector del archipiélago de las Islas del Rosario (localizado al suroccidente de la bahía de Cartagena), muestran también la progresión de facies de sedimentos terrígenos, en detrimento de las facies carbonatadas, como resultado del aumento progresivo en los aportes continentales del Canal del Dique (Leble & Cuignon, 1987). Por su parte, el análisis de la distribución espacial de los sedimentos superficiales y la acumulación que surge de la comparación de levantamientos batimétricos efectuados entre 1935 y 2004, indican que su repartición al interior de la bahía está controlada por la Escollera de Bocagrande, que

limita la entrada de sedimentos provenientes de la plataforma y del Canal del Dique, cuyos sedimentos finos han cubierto los fondos arenosos y han avanzado cerca de 1 km hacia el norte del delta que se forma en la boca del Canal del Dique (Andrade *et al.*, 2004).

De acuerdo con Sahu (1964), cada ambiente de depósito tiene un rango específico de condiciones de energía que varían temporal y espacialmente. Los ambientes de depositación también dependen de la disponibilidad de fuentes de material sedimentario, por lo que la variabilidad espacial de la composición y las propiedades texturales de los sedimentos pueden reflejar las condiciones ambientales bajo las cuales se forman los diferentes tipos de depósitos (Krumbein & Sloss, 1963; Shepard, 1963). En este contexto, el análisis de las características texturales del sedimento proporciona información sobre su origen, patrones de transporte y depositación (Folk & Ward, 1957; Friedman, 1962, 1979), lo cual ha permitido emplear los parámetros texturales para analizar la evolución morfológica de playas (*e.g.*, Guillén & Jiménez, 1994; Reed & Wells, 2000; Pontee *et al.*, 2004), determinar los límites de eventos de transgresión marina (*e.g.*, Klingebiel & Vernet, 1979; Muñoz *et al.*, 1997), y describir las propiedades sedimentarias de los ambientes costeros y sus relaciones con procesos deltaicos y estuarinos (*e.g.*, Rohas, 1985; Andrade *et al.*, 2004; Minh-Duc *et al.*, 2007). Por ejemplo, los análisis granulométricos permitieron a Rohas (1985) identificar diez facies texturales en el estuario Queule (Chile), y caracterizar su parte inferior como un sector de alta energía cinética caracterizado por sedimentos arenosos bien seleccionados. En contraste, las zonas estuarinas media y superior se caracterizaron por sus bajos niveles de energía y sedimentos finos con altos contenidos orgánicos. En el mismo contexto, las direcciones netas de transporte de sedimentos en el delta del río Red (Vietnam) se determinaron por métodos vectoriales, usando la información de tamaño de grano (D_{50} , S_o , contenido de arenas, limo y arcillas) obtenida de 564 muestras de sedimento superficial (Minh-Duc *et al.*, 2007).

El presente estudio considera la distribución espacial de las principales características físicas (tamaño de grano, contenido de carbonato de calcio)

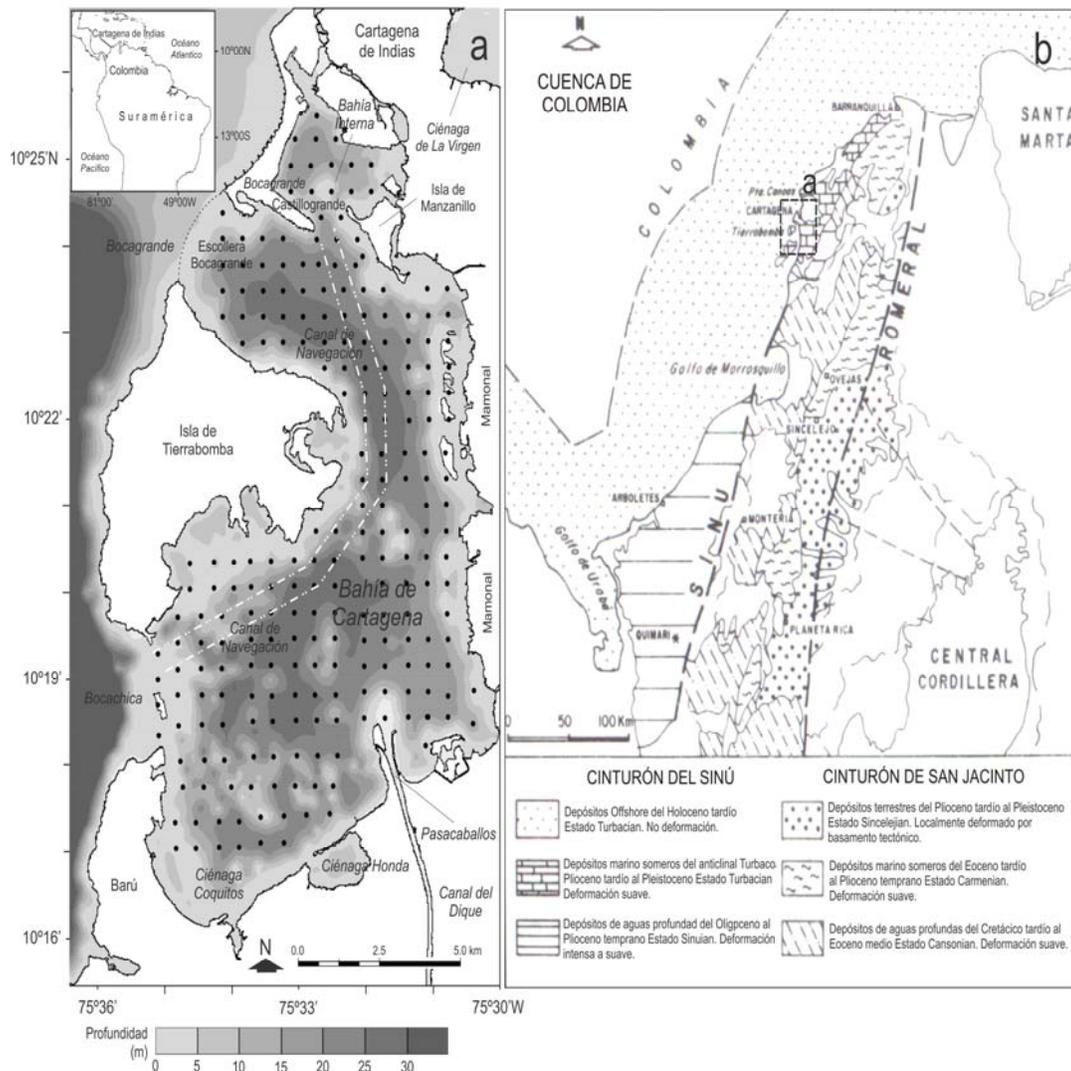


Figura 1. a) Localización de la bahía de Cartagena y estaciones de muestreo (círculos negros), la línea punteada blanca representa el canal navegable hacia el puerto de Cartagena, b) mapa geológico del nor-occidente de Colombia (Adaptado de Duque-Caro, 1980), el recuadro blanco punteado indica la localización general del área de estudio.

de los sedimentos superficiales del fondo de la bahía de Cartagena, y utiliza esta información para: (i) interpretar los ambientes y patrones de sedimentación dominantes, (ii) evaluar la influencia del Canal del Dique en los procesos sedimentarios y, (iii) estimar la variabilidad de la distribución espacial de los sedimentos del fondo de la bahía de Cartagena durante los últimos 30 años (Klingebiel & Vernet, 1979; CIOH, 1988; Andrade *et al.*, 2004).

Área de estudio

La bahía de Cartagena está localizada al noreste de Sudamérica, Caribe colombiano, entre $10^{\circ}16' - 10^{\circ}26'N$ y $75^{\circ}36' - 75^{\circ}30'W$ (Fig. 1). Está separada del Mar Caribe por la isla de Tierrabomba, y corresponde a

una cuenca somera de $\sim 82 \text{ km}^2$ de extensión, con profundidades promedio y máximas de 16 y 26 m, respectivamente. La bahía se comunica con el Mar Caribe a través de los canales de Bocagrande, por el norte y Bocachica por el sur (Fig. 1). El canal de Bocagrande está limitado por una escollera submarina construida en la época de la Colonia. Sus profundidades varían entre 0,6 y 2,1 m. El canal de Bocachica alcanza profundidades máximas de 15 m en el sitio donde comienza el canal navegable (Fig. 1). La marea en la bahía es mixta, principalmente diurna, con un rango micromareal cuyas variaciones pocas veces exceden 0,5 m (Molares, 2004).

Los aportes fluviales del Canal del Dique (Fig. 1) han tenido una influencia significativa sobre la

hidrodinámica y dinámica sedimentaria de la bahía y la plataforma frontal del área de Cartagena (*e.g.*, Leble & Cuignon, 1987; Andrade *et al.*, 2004; Lonin *et al.*, 2004). Durante noviembre se registran sus mayores descargas de agua y sedimentos, las cuales alcanzan $800 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y $31 \times 10^3 \text{ ton día}^{-1}$, respectivamente; los registros históricos señalan una tasa de transporte de sedimentos de $5.9 \times 10^6 \text{ ton año}^{-1}$ y un caudal medio de $397 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (Restrepo *et al.*, 2005). Se ha determinado también que el canal presenta una alta variabilidad interanual en sus descargas fluviales, y que transporta una amplia proporción de su carga de sedimentos en periodos de tiempo relativamente cortos. Entre 1984 y 1998 el Canal del Dique transportó hacia las bahías de Barbacoas (por el caño Lequerica, ubicado al suroccidente de la bahía de Cartagena) y Cartagena (por la desembocadura principal en Pasacaballos) $\sim 89 \times 10^6 \text{ ton}$ de sedimentos, de los cuales cerca del 50% fueron movilizados durante sólo siete eventos extremos de transporte (Restrepo *et al.*, 2005).

La bahía de Cartagena se ubica en un sector geológicamente activo en el cual las interacciones tectónicas entre las placas Sudamericana, Caribe y Nazca han condicionado la formación de los cinturones plegados del Sinú y San Jacinto, caracterizados por numerosas ocurrencias de diapirismo de lodos, fracturamiento y fallamientos intensivos en el área de Cartagena (Fig. 1) (Verneette, 1978; Klingebiel & Verneette, 1979; Duque-Caro, 1980). Las fallas más importantes en la zona son las de Mamonal (que se extiende 60 km en sentido este-oeste por el área de Mamonal hacia la bahía de Cartagena) y de Henequén, que se extienden 4 km en sentido sur-norte desde el suroccidente de la bahía hasta Mamonal (Reyes *et al.*, 2001). El diapirismo de lodo es de común ocurrencia al norte de la bahía de Cartagena y se caracteriza por el ascenso de arcillas desde formaciones cubiertas a través de domos y chimeneas (Verneette, 1978). En la región también se ha establecido la presencia de dos tipos de sedimentación en la plataforma continental; una detrítica de fuente continental influenciada por la deriva litoral, y otra biogénica asociada con las formaciones arrecifales ubicadas al sur de la bahía de Cartagena (Verneette, 1978).

MATERIALES Y METODOS

Se diseñó una malla con una resolución espacial de 0,5 km para recolectar 234 muestras de sedimento superficial de la bahía de Cartagena (Fig. 1). La campaña de recolección de muestras fue efectuada en noviembre y diciembre de 2009. Las muestras fueron obtenidas por medio de una draga Van Veen operada desde una embarcación equipada con un sistema

GPS/Garmin con una precisión de $\pm 5,0 \text{ m}$. Se realizó la determinación del contenido de CaCO_3 y la caracterización textural de las muestras recolectadas. La preparación de las muestras para los análisis incluyó el secado a 70°C durante 24 h para remover el contenido de humedad y la aplicación de 0,25 g de $(\text{NaPO}_3)_6$ para evitar la floculación de partículas. El contenido de carbonato de calcio se determinó a partir de 0,25 g de muestra de sedimento normalizada con 4 mL de HCl (10%), utilizando un calcímetro de Bernard (Verneette, 1978). La distribución del tamaño de grano de la fracción gruesa ($\geq 63 \mu\text{m}$) se determinó por medio de tamizaje, mientras que para las partículas menores a $63 \mu\text{m}$ se utilizó análisis de difracción laser-Sistema Lumosed. El análisis textural de las muestras de sedimento se realizó por medio del programa GRADISTAT (Blott & Kenneth, 2001), que calcula mediante los métodos de Folk y de momentos los parámetros de tamaño de grano (*i.e.*, media, selección, asimetría y curtosis).

Las funciones discriminantes propuestas por Sahu (1964) fueron aplicadas a los resultados del análisis granulométrico para caracterizar el escenario de depósito de las muestras de sedimento superficial recolectadas en la bahía de Cartagena. Sahu (1964) analizó diferentes ambientes de depósito como corrientes de turbidez, ambientes deltaicos, depósitos de playa, planicies de inundación, ríos, litoral marino somero, depósitos de duna y planicies eólicas, para obtener funciones discriminantes que pueden ser utilizadas para clasificar los ambientes de depósito. Estas funciones fueron obtenidas por medio de un estudio cuantitativo de métodos de discriminación de diferentes mecanismos y ambientes de sedimentación, suponiendo que la distribución de tamaño de grano de los sedimentos clásticos refleja el factor de fluidez del medio y la energía del ambiente de depósito (Sahu, 1964). Estas funciones discriminantes han sido utilizadas de manera satisfactoria en diferentes ambientes litorales, encontrando compatibilidades superiores al 70% entre los ambientes discriminados y las observaciones de campo de los depósitos de sedimento (*e.g.*, Ali *et al.*, 1987; Alsharhan & El-Sammak, 2004; Cupul-Magaña *et al.*, 2006). Sahu (1964) utilizó la ecuación general (Ec. 1):

$$Y_1 = \lambda^1 X_1 + \lambda^2 X_2 + \dots + \lambda^p X_p \quad (1)$$

para el caso de p variables normalmente distribuidas (X_1, X_2, \dots, X_p), y coeficientes $\lambda^1, \lambda^2, \dots, \lambda^p$, con la función discriminante Y linealmente relacionada con las variables. Los coeficientes son seleccionados para que la relación de la diferencia entre medias de las muestras de la desviación estándar dentro de los dos ambientes de depósito, sea maximizada. Considerando

las características del área de estudio (*i.e.*, ambiente marino semi-cerrado con aportes fluviales del Canal del Dique), y que uno de los objetivos de estudio consiste en evaluar la reciente influencia del Canal del Dique en los procesos sedimentarios (relación depósitos marinos/depósitos fluviales), se seleccionaron aquellas funciones que permitieron discriminar entre (i) depósitos de playa y marino somero agitado (Ec. 2), (ii) proceso fluvial (deltaico) y marino somero (Ec. 3), y (iii) depositación fluvial y corrientes de turbidez (Ec. 4) (Sahu, 1964).

$$Y_2 = 15,534M_z + 65,7091\sigma^2 + 18,1071Sk_1 + 18,5034Kg \quad (2)$$

$$Y_3 = 0,2852M_z - 8,7604\sigma^2 - 4,8932Sk_1 + 0,0482Kg \quad (3)$$

$$Y_4 = 0,7215M_z - 0,4030\sigma^2 + 6,7322Sk_1 + 5,2927Kg \quad (4)$$

donde M_z es el tamaño medio de grano, σ^2 es la selección, Sk_1 es la asimetría y Kg es la curtosis. Si $Y_2 < 65,365$ se sugiere un depósito de playa, si $Y_2 > 65,356$ corresponde a un depósito marino somero agitado (Ec. 1). Si $Y_3 < -7,419$ la muestra fue depositada mediante procesos fluviales (deltaico), si $Y_3 > -7,419$ fue depositada por procesos marinos someros (Ec. 2). Finalmente, si $Y_4 < 9,8433$ la muestra se identifica como depósito de corrientes turbidíticas, y si $Y_4 > 9,8433$ corresponde a un depósito fluvial (Ec. 3) (Sahu, 1964).

RESULTADOS

El tamaño medio de grano del sedimento fluctuó entre $-0,54 \phi$ y $6,43 \phi$, con predominancia de lodos medios ($5,35 \pm 1,2 \phi$). Solo el 11,5% de las muestras fueron clasificadas como arenas o gravas ($\phi < 4$). Los valores de selección mostraron sedimentos entre muy pobremente seleccionados y muy bien seleccionados, con un marcado dominio de sedimentos pobremente seleccionados ($\sigma = 1,63 \pm 0,8$). Los sedimentos muestran una notable simetría ($S_k = -0,052 \pm 0,2$), con solo 27 muestras asimétricas hacia los gruesos y siete muestras asimétricas hacia los finos. La mayoría de los sedimentos se clasificaron notoriamente leptocúrticos y platicúrticos, con una curtosis (k) media de $0,84 \pm 0,4$ (Tabla 1, Fig. 2).

Dispersión de los parámetros de tamaño de grano

El tamaño medio de grano y la selección de los sedimentos mostraron una relación inversa, útil para identificar tres asociaciones de sedimentos superficiales. La primera está conformado por arenas medias a gravas ($0 < \phi < 2$), pobremente seleccionadas; un segundo grupo conformado por arenas finas a lodos gruesos ($2 < \phi < 5$), pobremente

seleccionadas. Finalmente, la mayoría de muestras estuvieron conformadas por lodos de tamaño medio ($5 < \phi < 6$), pobremente clasificados (Figs. 2a, 3a y 3b). La relación entre asimetría y curtosis se concentró hacia los valores medios de asimetría; la mayoría de las muestras se clasificaron como simétricas con curtosis de mesocúrtica a platicúrtica. Además, se presentó un grupo de muestras asimétricas hacia los gruesos (-) con curtosis de leptocúrtica a platicúrtica (Figs. 2b, 3c y 3d). La relación entre asimetría y selección mostró dos grandes agrupamientos en las muestras de sedimento. La mayor cantidad se clasificó como simétricas pobremente seleccionadas; el segundo grupo fue conformado por sedimentos asimétricos hacia los gruesos (-) muy pobremente clasificados. También se determinó un pequeño conjunto de muestras (<3%) con asimetría hacia los finos (+), pobremente seleccionadas (Fig. 2c, 3b y 3c).

Ambientes de depositación de los sedimentos

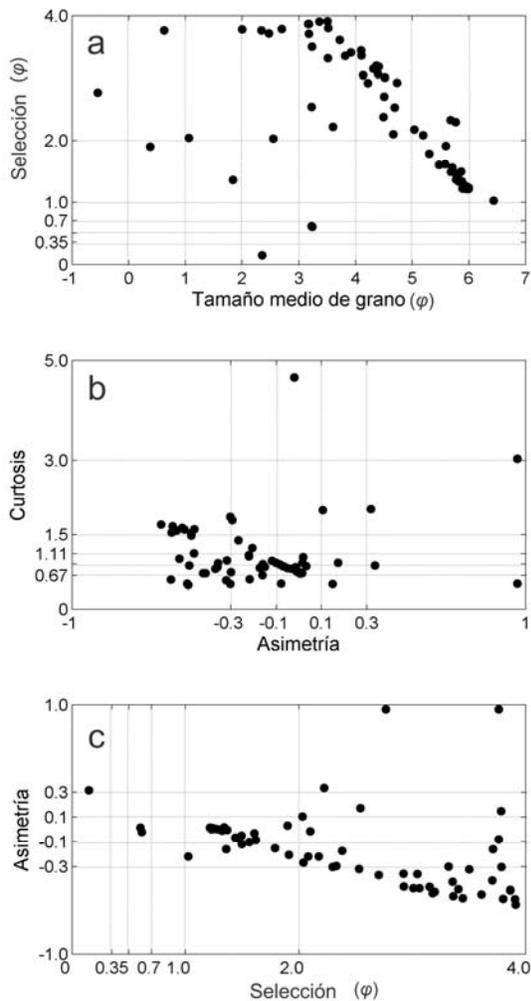
Agrupar los resultados de la aplicación de las funciones discriminantes en gráficos bivariantes permitió refinar el método de discriminación en relación con el ambiente de depósito (Fig. 4). El 100% y el 98% de las muestras de sedimentos fueron discriminadas como depósitos de ambientes de tipo marino somero (Y2) y de corrientes turbidíticas (Y4), respectivamente (Fig. 4). En consecuencia, este tipo de ambientes de depósito son predominantes en toda la bahía de Cartagena. Por su parte, los valores de Y3 indican que la mayoría de los sedimentos (~99%) han sido depositados por procesos fluviales (deltaicos); se estima que sólo la depositación de dos muestras (< 2%) fue influenciada por procesos marinos someros. Por lo anterior, se considera que actualmente la depositación fluvial es el proceso de sedimentación dominante en la bahía de Cartagena. Cuando se compararon los tipos de depósitos sedimentarios (Y2 y Y4) con los mecanismos de depositación (Y3) se identificaron dos grandes ambientes de depositación para la bahía de Cartagena: (1) depósito marino somero agitado de dominio fluvial (deltaico), y (2) depósito de corrientes de turbidez de dominio fluvial (deltaico). Muy pocas muestras de sedimento (<3%) fueron discriminadas en ambientes de depositación diferentes (Fig. 4).

Patrones de distribución superficial de los sedimentos

Los parámetros texturales, contenidos de carbonato de calcio (% CaCO_3) y porcentaje de arena de cada muestra fueron procesados por medio de una interpolación espacial (Kriging por deriva), para determinar los patrones de distribución superficial de

Tabla 1. Síntesis de las características texturales de los sedimentos superficiales de la bahía de Cartagena.

Características texturales	Parámetros estadísticos			
	Promedio	Desviación estándar	Valor máximo	Valor mínimo
Tamaño de grano (ϕ)	5,35	1,25	6,43	-0,54
Selección (σ)	1,63	0,83	3,91	0,14
Asimetría (S_k)	-0,05	0,20	0,96	-0,61
Curtosis (k)	0,84	0,42	4,65	0,47
Grava (%)	4,42	12,15	100,0	0,00
Arena (%)	7,59	16,93	97,4	0,00
Lodo (%)	87,69	22,59	100,0	0,00

**Figura 2.** Gráficas bivariantes entre a) tamaño medio de grano y selección, b) asimetría y curtosis, c) selección y asimetría.

los sedimentos en la bahía de Cartagena, en términos de sus características y composición textural (gruesos/

finos) y génesis (litoclástico/ bioclástico) (Figs. 3 y 5). Se identificó que el material grueso granular, representado por concentraciones de arenas mayores a 60%, se encuentra en la franja centro-sur oriental de la isla de Tierrabomba, en Manzanillo, norte de Mamonal, así como al sur de la escollera de Bocagrande y en el sector de Bocachica (Fig. 3a). Estos sectores también se caracterizan por la presencia de material pobremente seleccionado y con asimetría hacia los gruesos (Figs. 3b y 3c). En el prodelta del Canal del Dique y en la Ciénaga Coquitos se identificaron depósitos con contenidos intermedios de arena (25-50%), pobremente clasificados, simétricos y mesocúrticos (Figs. 3 y 5a). Sin embargo, la bahía de Cartagena está dominada por material finogranular (limos y arcillas) con contenidos de arena inferiores al 10%, pobremente seleccionado, simétricos y mesocúrticos (Fig. 3). Los contenidos más bajos de arena (<5%) se encontraron a lo largo del eje latitudinal sur-norte que va desde el prodelta del Canal del Dique hasta el extremo oriental de la isla de Tierrabomba, en la parte central de la bahía, en la bahía interna y en el extremo más septentrional de la bahía de Cartagena (Fig. 5a). A lo largo de este eje latitudinal, en las zonas más profundas de la bahía, se observan nodos de depósito, caracterizados por material pobremente seleccionado, con simetría hacia los gruesos y platicúrticos (Fig. 3). La bahía interna (con excepción de la zona ubicada al norte de la isla de Manzanillo) está dominada por material fino, pobremente seleccionado, simétrico y mesocúrtico (Fig. 3).

Se determinó una relación entre los patrones de distribución espacial de los contenidos de arena y CaCO_3 (Fig. 5). Los mayores contenidos de este último se pueden apreciar en dos estrechas franjas litorales, una latitudinal ubicada desde Bocachica

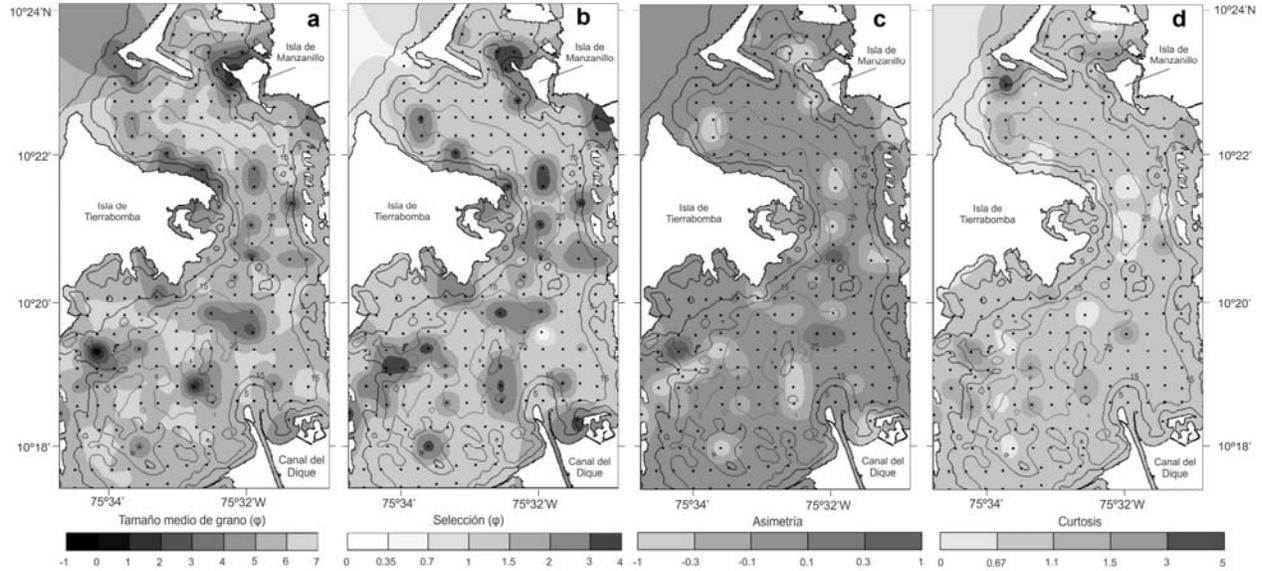


Figura 3. Distribución espacial de a) tamaño medio de grano, b) selección, c) asimetría, d) curtosis en la bahía de Cartagena. Las líneas delgadas representan las isobatas de 5, 15, y 25 m.

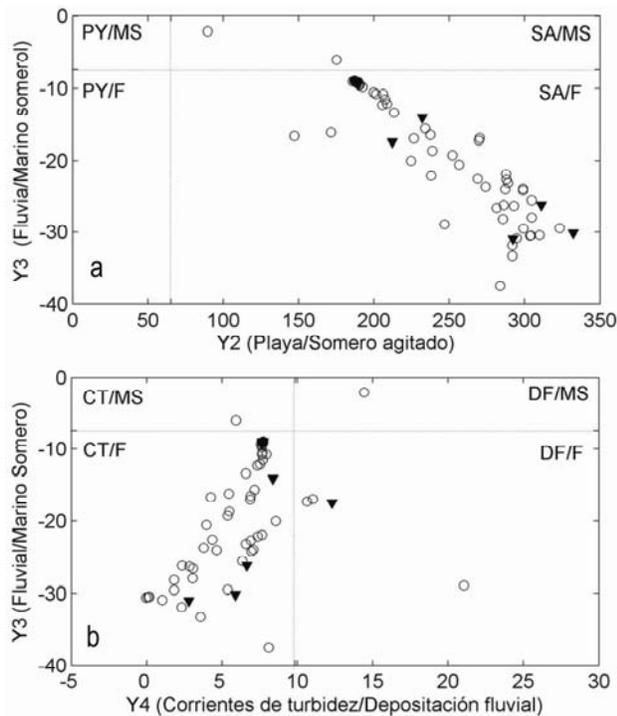


Figura 4. Relaciones entre funciones discriminantes a) Y2-Y3, y b) Y4-Y3. Se diferencian los ambientes sedimentarios de la bahía de Cartagena: playa (PY), somero agitado (SA), fluvial (F), marino somero (MS), corrientes de turbidez (CT), y deposición fluvial (DF).

hasta la costa centro-sur oriental de la isla de Tierrabomba y otra con dirección NW desde

Manzanillo hasta la espiga de Castillogrande, en la entrada a la bahía interna (Fig. 5b). Estas zonas se caracterizan por sedimentos con tamaño de grano de medio a grueso, pobremente seleccionados y con simetría hacia los gruesos (Fig. 3). Por el contrario, las menores concentraciones de CaCO_3 se encuentran en la parte central de la bahía y el prodelta del Canal del Dique (Fig. 5b), donde se presenta un dominio de sedimentos de tamaño fino y simétricos, pero con presencia de algunos nodos de depósito de tamaño de grano grueso, pobremente seleccionados, y con simetría hacia los gruesos (Fig. 3). En general, los contenidos de CaCO_3 de los depósitos sedimentarios de la bahía son menores al 10%, indicando que la mayoría son de origen litoclástico (terrigenos).

DISCUSION

Los parámetros texturales, particularmente el tamaño medio de grano, dependen de los procesos oceanográficos/fluviales predominantes y la morfología del fondo de la bahía. Mientras que la distribución y variabilidad espacial de las características texturales de los sedimentos está relacionada con la energía de los agentes de transporte (magnitud y variabilidad), la morfología submarina regula los flujos de masas de agua y energía. La bahía de Cartagena está conformada principalmente por lodos litoclásticos pobremente clasificados, con una distribución de tamaño de grano mayormente simé-

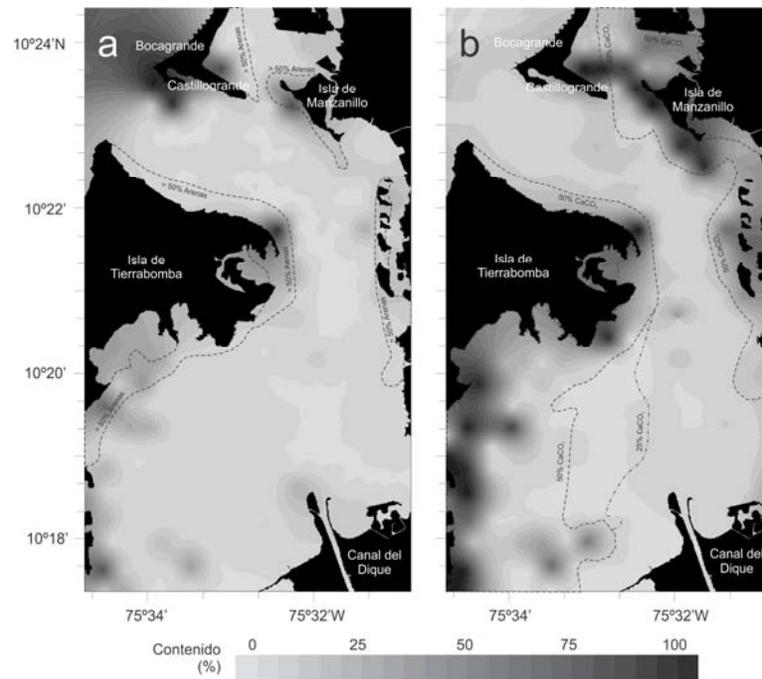


Figura 5. Distribución espacial de los sedimentos superficiales de la bahía de Cartagena. a) contenido de arenas (%), y b) contenido de CaCO_3 (%). Las líneas negras punteadas indican contenidos específicos (%) de arena y CaCO_3 reportados por Pagliardini *et al.* (1982).

trica y mesocúrtica-platicúrtica (Tabla 1, Figs. 2 y 3). Los otros grupos representativos lo constituyen (i) arenas finas y lodos gruesos biolitolásticos asimétricos hacia los finos, y (ii) arenas medias y gravas bioclásticas asimétricas hacia los gruesos (Figs. 2 y 3). Estos dos últimos presentan distribuciones de tamaño de grano pobremente seleccionadas, leptocúrticas – platicúrticas y están localizados sobre el sector adyacente a la costa central y suroriental de Tierrabomba, la isla de Manzanillo y los bancos centrales de la bahía de Cartagena (Figs. 3 y 5).

La circulación de la bahía de Cartagena está dominada principalmente por el régimen de vientos, la estratificación salina causada por el flujo de agua dulce proveniente del Canal del Dique y por las variaciones del nivel del mar (rango micromareal) (Lonin & Giraldo, 1996, 1997). Durante la época seca (diciembre-abril) el Canal del Dique registra sus caudales más bajos ($\sim 180 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) y se experimentan vientos estables provenientes del noreste (alisios) con velocidades de $\sim 8 \text{ m s}^{-1}$; en la época de transición (abril-julio) los caudales del Canal del Dique aumentan ligeramente ($\sim 250 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), pero se presentan vientos menos intensos ($\sim 5 \text{ m s}^{-1}$) de dirección variable (norte, noreste, este y sureste); y en la época húmeda, entre agosto y noviembre, aunque los caudales del Canal del Dique se incrementan de

manera significativa ($>400 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), se experimentan vientos débiles provenientes principalmente del suroeste (Lonin & Giraldo, 1996; Molares, 2004). Los vientos intensos de la época seca coinciden con los bajos caudales del Canal del Dique, mientras que los vientos débiles y variables de la época húmeda se combinan con sus altas descargas fluviales. Como resultado de estas condiciones hidrodinámicas, la bahía de Cartagena ha sido catalogada como un sistema de moderada-baja energía. Además, su morfología submarina (Fig. 6) restringe el intercambio de masas de agua provenientes del Mar Caribe y contribuye de manera significativa a la disipación del oleaje incidente (Lonin *et al.*, 2004; Molares, 2004).

Las condiciones de moderada-baja energía en los principales agentes morfodinámicos y la variabilidad estacional en los patrones de circulación de la bahía, han originado diferencias en los patrones de distribución espacial de los sedimentos superficiales (Fig. 3), y han determinado la conformación de un ambiente sedimentario caracterizado por la pobre selección del material (Fig. 2). Por medio de la aplicación de un modelo hidrodinámico calibrado (J. Rueda *com. pers.*) identificaron tres patrones de circulación en la bahía de Cartagena durante la temporada seca; dos de ellos en los bordes litorales de Tierrabomba y Mamonal, con corrientes de magnitud

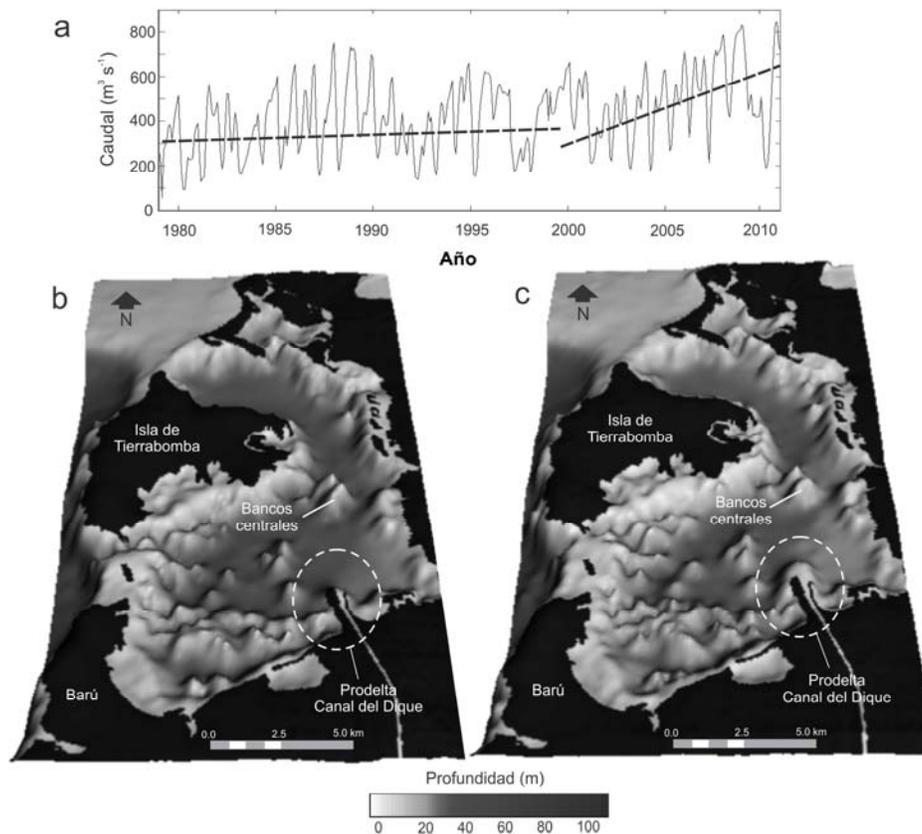


Figura 6. a) Caudales medios mensuales del Canal del Dique (Estación Santa Helena, 1979-2010), la línea punteada representa la tendencia interanual; modelos digitales de terreno elaborados a partir de información batimétrica de b) 1997 y c) 2009. El círculo blanco punteado destaca el área de influencia del prodelta del Canal del Dique.

0.1-0.2 m s^{-1} y dirección norte-sur, y un contraflujo en la parte central de la bahía en dirección sur-norte, con velocidades $<0,05 \text{ m s}^{-1}$. En la época de transición estos patrones se debilitan y el área de influencia del contraflujo central se reduce hasta la zona intermedia de la bahía (*i.e.*, bancos centrales en Figs. 1 y 6). Por el contrario, durante la época húmeda el contraflujo llega hasta la bahía interna y Bocagrande, en el norte de la bahía, con corrientes débiles ($<0,05 \text{ m s}^{-1}$) pero persistentes; además, en este periodo las corrientes de borde litoral invierten su dirección y muestran un patrón predominante sur-norte (J. Rueda *com. pers.*). Las corrientes de borde litoral, más intensas y variables que el flujo central, han contribuido a la depositación de gravas y arenas bioclásticas y biolitoclásticas, pobremente seleccionadas, en una franja cercana a la isla de Tierrabomba, isla de Manzanillo, norte de Mamonal y sector de Bocachica (Figs. 3 y 5). Por su parte, el persistente flujo que se dirige desde el sur hacia el norte de la bahía, y que es controlado por los aportes del Canal del Dique, ha favorecido el transporte y la depositación de material finogranular (lodos litoclásticos), pobremente selec-

cionado, simétrico y mesocúrtico, en la mayor parte de la bahía de Cartagena (Figs. 3 y 5). Estos lodos requieren menor energía para su transporte y gradación; por lo tanto, se encuentran mejor seleccionados debido a la acción persistente y continuada de los agentes de transporte. Además, las condiciones de transporte determinan que los sedimentos transportados a lo largo de distancias relativamente largas estén mejor clasificados que aquellos que experimentan procesos de meteorización *in situ* (Shepard, 1963; Sahu, 1964). Estos últimos, por la diversidad en el tamaño de grano generan muestras platicúrticas y leptocúrticas, como es el caso de los sedimentos depositados en el este de Tierrabomba, sur de la bahía e isla de Manzanillo (Fig. 3). En época de altas descargas fluviales se presenta una circulación convectiva con dirección norte, en la que las aguas dulces del Canal del Dique cubren la totalidad de la bahía con un espesor promedio de 15 m, que alcanza hasta 22 m de profundidad en la desembocadura del canal y 5 m en Bocachica (Cormagdalena, 2004). En este periodo los aportes sólidos del Canal del Dique pueden llegar hasta $31 \times 10^3 \text{ ton día}^{-1}$ de sedimentos en

suspensión (Restrepo *et al.*, 2005), este flujo tiene alta capacidad para transportar y seleccionar material finogranular hacia el interior de la bahía de Cartagena. Aunque en épocas secas y de transición, la extensión de esta circulación convectiva disminuye, y por ende la corriente de contraflujo sur-norte se extiende solo hasta la zona central de la bahía; por lo tanto, los aportes del Canal del Dique tienen un papel determinante en los patrones de distribución de los sedimentos superficiales.

Martínez *et al.* (2010) establecieron que en la bahía de Cartagena hacia ~2.2 ka AP se presentaba una sedimentación de naturaleza autógena, dominada por limos arcillosos carbonatados y con presencia de parches de arrecife. Sin embargo, una progradación de origen clástico comenzó a presentarse como consecuencia de una dinámica litoral más activa de la espiga de Bocagrande (Burel & Vernet, 1981). Hace 30 años, Pagliardini *et al.* (1982) indicaron que, aunque los sedimentos de la bahía de Cartagena eran de tamaño muy variado, se presentaba un dominio de arenas calcáreas (bioclásticas) en zonas infralitorales de pendiente suave como Bocagrande, Castillogrande y norte de Tierrabomba (Fig. 5). Aunque para esa época, Pagliardini *et al.* (1982) también establecieron la presencia de lodos en una proporción importante dentro de la bahía y señalaron que no constituían el material dominante, que su distribución estaba limitada a zonas profundas y protegidas por islotes, y que provenían fundamentalmente de los aportes fluviales del río Magdalena (cuya desembocadura en el mar Caribe está localizada 120 km al noreste de la bahía de Cartagena, en Barranquilla, Fig. 1b). Por el contrario, Pagliardini *et al.* (1982) consideraron que el efecto del Canal del Dique, en los procesos de sedimentación de la bahía, era limitado ya que presentaba un caudal relativamente bajo ($<100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) y la mayoría de su carga sedimentaria se depositaba en la boca de Pasacaballos. Posteriormente, como resultado del incremento en los aportes sedimentarios del Canal del Dique y la formación de barras laterales de ~1 km en la desembocadura, la bahía de Cartagena experimentó un cambio de un sistema marino-estuarino hacia un sistema deltaico, caracterizado por la progresión reciente de facies terrígenas sobre facies carbonáceas y de plataforma (Andrade *et al.*, 2004). Hasta ahora, ningún estudio sedimentológico efectuado en la bahía de Cartagena (*e.g.*, MITCH, 1973; Klingebiel & Vernet, 1979; Pagliardini *et al.*, 1982; Vernet *et al.*, 1984; Andrade *et al.*, 2004) había reportado la presencia de arenas litoclásticas en la desembocadura del Canal del Dique y la progresión de sedimentos finos hacia el sector suroriental de Tierrabomba y la bahía interna, en el extremo más

septentrional de la bahía de Cartagena. Como resultado del cambio en los patrones de sedimentación la franja de arenas carbonáceas que rodea la isla de Tierrabomba se ha hecho más estrecha (Fig. 5b) y los fondos carbonatados que caracterizaban la bahía interna de Cartagena han sido cubiertos casi por completo y se encuentran suprayacidos por lodos litoclásticos.

El contenido de CaCO_3 de las muestras de sedimento señala que la fracción gruesa fue originada por la descomposición de material biológico de las terrazas de Tierrabomba, norte de Mamonal, de la isla de Manzanillo y Barú, formadas durante el último nivel transgresivo del mar (~3.6 -1.7 ka BP) (Burel & Vernet, 1981; Martínez *et al.*, 2010). La presencia de arenas calcáreas ha sido explicada como resultado de la erosión de estas formaciones detríticas (Pagliardini *et al.*, 1982; Martínez *et al.*, 2010), el transporte mínimo de las partículas erodadas explica el amplio rango (muy pobremente seleccionados) en el tamaño de los sedimentos calcáreos y su escaso grado de erosión. En consecuencia, la asimetría hacia los gruesos que presentan estas arenas biolitoclásticas podría considerarse como un indicador de ambientes erosivos recientes. A lo largo de los últimos 30 años estos procesos erosivos han sido reportados en la bahía de Cartagena (Pagliardini *et al.*, 1982; Andrade *et al.*, 1988, 2004), y por consiguiente han participado activamente en la sedimentación calcárea en zonas específicas de la bahía (Fig. 5). Actualmente, el bajo contenido de CaCO_3 en los sedimentos de la bahía (Fig. 5) está determinado por los aportes de sedimentos en suspensión provenientes de la plataforma, que entran por Bocagrande y se distribuyen el sector norte de Tierrabomba, escorrentía por lluvia, posible ocurrencia de diapirismo de lodo y descargas fluviales del Canal del Dique. Se considera que los aportes fluviales del Canal del Dique constituyen la principal causa en la reducción de los contenidos de CaCO_3 , porque (i) los aportes de deriva continental están bastante limitados por la escollera de Bocagrande y se acumulan en las playas al norte de Bocagrande (Andrade *et al.*, 1988), (ii) la precipitación es relativamente baja ($<1200 \text{ mm año}^{-1}$) y los aportes por escorrentía están limitados al sector oriental de la bahía (Pagliardini *et al.*, 1982), (iii) no existen estudios que hayan reportado diapiros de lodo en la bahía de Cartagena o rasgos geomorfológicos asociados a este tipo de procesos (Klingebiel & Vernet, 1979; Pagliardini *et al.*, 1982; Vernet *et al.*, 1984; Andrade *et al.*, 2004) y porque los posibles aportes de material clástico finogranular generados por procesos de deriva litoral, escorrentía por lluvia y diapirismo de lodo, serían marginales al compararlos

con los aportes de sedimento en suspensión provenientes del Canal del Dique ($5,7 \text{ ton año}^{-1}$) (Restrepo *et al.*, 2005).

Los análisis de funciones discriminantes confirman la existencia de un ambiente de sedimentación reciente de dominio fluvial en la bahía. El dominio de este ambiente explica que el tamaño de grano y el contenido de CaCO_3 disminuyan hacia el interior de la bahía, mostrando una significativa reducción de las áreas dominadas por sedimentos calcáreos autógenos, los cuales han sido cubiertos de manera progresiva desde 1980 (*e.g.*, Pagliardini *et al.*, 1982; CIOH, 1988) por sedimentos finos de origen terrígeno transportados por el Canal del Dique (Fig. 5). La interacción de los ambientes marino y fluvial desde que el corte Paricuica (1924), en Pasacaballos, unió las aguas del Canal del Dique con la bahía de Cartagena (Cormagdalena, 2004), propiciando la formación de un ambiente sedimentario mixto con atributos dominantes del fluvial: (i) depósito de corrientes de turbidez de dominio fluvial y (ii) depósito marino somero agitado de dominio fluvial (Fig. 3). Las corrientes de turbidez generan depósitos caracterizados por una estratificación gradual, como resultado de una sedimentación pulsatoria relativamente rápida en condiciones tectónicas inestables (Krumblein & Sloss, 1963). A pequeña escala estas corrientes de turbidez se pueden producir como resultado de la reacomodación de sedimentos no consolidados en prodeltas o de la resuspensión de depósitos recientes (mouth-bar material), en zonas de desembocadura con pendiente moderada (Inram & Sivitsky, 2000). Aun cuando no existen referencias de este tipo de corrientes en el área de estudio y que la ocurrencia de flujos turbidíticos asociados a descargas fluviales es un proceso excepcional (Inram & Sivitsky, 2000), la presencia de fallas en la bahía (Fig. 1b) y el carácter pulsatorio y repentino de los aportes fluviales del Canal del Dique (Restrepo *et al.*, 2005) podrían generar depósitos de estratificación gradual, generados en condiciones de alta energía, similares a los producidos por corrientes turbidíticas. Este tipo de depósitos serían los que se están identificando como depósitos de turbidez por medio del análisis de funciones discriminantes de Sahu (1964). De otro lado, la distribución de los sedimentos superficiales de la bahía de Cartagena está marcada por la reciente dinámica fluvial y morfológica del delta del Canal del Dique. Aun cuando el corte Paricuica unió el canal con la bahía de Cartagena en 1924, sólo hacia finales de la década de los 70' comenzó a formarse la parte subacuosa del delta, la cual se consolidó hacia mediados de la década de los 90' (Cormagdalena, 2004). El proceso de conformación del delta se ha

acentuado en dicha década, debido al incremento significativo de los aportes fluviales (Fig. 6). El caudal medio mensual aumentó de $300 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ en 1997, hasta cerca de $600 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ en 2010 (Fig. 6a). Como resultado de estos cambios, el prodelta se amplió lateralmente $\sim 1 \text{ km}$ y se extendió $\sim 3 \text{ km}$ hacia el norte (Figs. 6b y 6c). Además, la comparación de información batimétrica (1935, 1977 y 2004) y la datación de núcleos de sedimento obtenidos en Tierrabomba han indicado tasas de sedimentación para la bahía de Cartagena que varían entre $1,2$ y $5,0 \text{ cm año}^{-1}$ (Andrade *et al.*, 2004; Cormagdalena, 2004; Martínez *et al.*, 2010). Estas tasas sugieren que la profundidad media de la bahía ha disminuido entre $\sim 0,8$ - $3,2 \text{ m}$ desde 1934 (Corte Paricuica) como resultado de los procesos de sedimentación. Inclusive, se ha señalado la existencia de depocentros en el sur de la bahía con espesores hasta de 22 m (Andrade *et al.*, 2004).

Una de las consecuencias que debería captar gran atención en el futuro es que los aportes fluviales del Canal del Dique no sólo influyen en los patrones de sedimentación de la bahía de Cartagena, sino también en su grado de contaminación. La presencia dominante de sedimentos provenientes del río Magdalena a través del Canal del Dique constituye una amenaza para la calidad ambiental de la bahía de Cartagena. Vivas-Aguas *et al.* (2010) indican que para el periodo de lluvias de 2009 y el periodo seco de 2010 las concentraciones de sólidos y nutrientes fueron generalmente altas en el área del Canal del Dique, mientras que las concentraciones de hidrocarburos (5 - $9 \mu\text{g L}^{-1}$) determinan un nivel de alerta en la bahía de Cartagena. Además, los estudios de metales pesados desde 2003 indican un aumento en sus concentraciones, superando en algunos casos los valores de riesgo establecidos por normas internacionales (Vivas-Aguas *et al.*, 2010).

CONCLUSIONES

Los procesos sedimentarios de la bahía de Cartagena han experimentado un cambio significativo, particularmente durante los últimos 30 años. La bahía se caracterizaba por una sedimentación autógena dominada por limos y arcillas bioclásticas, pero a partir de 1980 comenzó a reportarse la sustitución de facies carbonáceas por facies terrígenas, como resultado de una mayor dinámica litoral de las espigas de Bocagrande y Castillogrande, y la consolidación del delta del Canal del Dique. Este estudio encontró que actualmente la progresión de facies terrígenas (litoclásticas) no es un proceso aislado, sino por el contrario, un proceso generalizado. Como consecuencia de esta progresión, la bahía está dominada por

lodos litoclásticos pobremente clasificados, con una distribución de tamaño de grano simétrica y mesocúrtica-platicúrtica.

Las características texturales de los sedimentos superficiales de la bahía de Cartagena están determinadas por la dinámica fluvial del Canal del Dique y la hidrodinámica de la bahía, y en menor medida, por los procesos erosivos de las terrazas de Tierrabomba, isla de Manzanillo, norte de Mamonal y Barú. Las condiciones de moderada-baja energía en los principales agentes morfodinámicos y la variabilidad estacional en los patrones de circulación de la bahía, han originado diferencias en los patrones de distribución espacial de los sedimentos superficiales y han determinado la conformación de un ambiente sedimentario caracterizado por la escasa selección del material. Las corrientes de borde litoral han contribuido a la depositación de gravas y arenas bioclásticas y biolitoclásticas muy pobremente seleccionadas. Por su parte, el persistente flujo que se dirige desde el sur hacia el norte de la bahía ha favorecido el transporte y depositación de material finogranular (lodos litoclásticos), pobremente seleccionado, simétrico y mesocúrtico, en la mayor parte de la bahía de Cartagena.

La conexión del Canal del Dique con la bahía de Cartagena fue determinante en sus procesos sedimentarios. Actualmente, la interacción de los ambientes marino y fluvial ha creado un ambiente sedimentario mixto, con atributos dominantes del ambiente fluvial: (i) depósito de corrientes de turbidez de dominio fluvial y (ii) depósito marino somero agitado de dominio fluvial. La interacción de los ambientes de depositación (con dominio fluvial) ha determinado (i) la reducción desde 1980 de las áreas dominadas por sedimentos calcáreos autógenos, ahora cubiertas por sedimentos finos de origen terrígeno transportados por el Canal del Dique; (ii) la presencia de arenas litoclásticas en la desembocadura del Canal del Dique; y la progresión de sedimentos finos hacia (iii) el sector sur-oriental de la isla de Tierrabomba, y (iv) la bahía interna de Cartagena. Como resultado de estos procesos la franja de arenas carbonáceas que rodea la isla de Tierrabomba se ha hecho muy estrecha y los fondos carbonatados que caracterizaban la bahía interna de Cartagena han sido cubiertos casi por completo. En síntesis, los análisis texturales y las funciones discriminantes indican que la evolución reciente de la distribución de los sedimentos superficiales de la bahía de Cartagena está controlada principalmente por la dinámica fluvial y morfológica del Canal del Dique. Estos análisis indican que el Canal del Dique tiene un papel más activo y predominante en la sedimentación de la bahía de Cartagena de lo que había sido señalado previamente.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los revisores, cuyos comentarios permitieron mejorar la versión inicial de este manuscrito. Este artículo constituye un aporte de los grupos de investigación de “Manejo Integrado de Zonas Costeras e Investigación en Estratigrafía”, cuyo trabajo conjunto ha sido posible gracias a la cooperación académica efectuada entre el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (CIOH) y la Universidad Industrial de Santander (UIS) – Instituto Colombiano del Petróleo (ICP). Esta cooperación fue impulsada por los geólogos Alberto Ortíz y Juan Diego Colegial, y el señor CN Juan Manuel Soltau. Los autores expresan su agradecimiento al personal de los Laboratorios de Geología y de Análisis Químicos del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas y el Instituto Colombiano del Petróleo, respectivamente, donde se realizaron los análisis de las muestras.

REFERENCIAS

- Ali, Y., A. Beltagy & M. Lotfy. 1987. Grain size analysis, areal distribution of sediments and environment of deposition of tidal and bottom sediments from Ghardaqa region, Red Sea area. *Bull. Inst. Oceanogr. Fish*, 13: 147-167.
- Alsharhan, A. & A. El-Sammak. 2004. Grain-size analysis and characterization of sedimentary environments of the United Arab Emirates coastal areas. *J. Coast. Res.*, 20: 464-477.
- Andrade, C., F. Arias & Y. Thomas. 1988. Nota sobre la turbidez, circulación y erosión en la región de Cartagena, Colombia. *Bol. Cient. CIOH*, 8: 71-81.
- Andrade, C., Y. Thomas, S. Lonin, C. Parra, S. Kunesch, L. Menanteau, A. Andriau, C. Piñeros & S. Velasco. 2004. Aspectos morfodinámicos de la bahía de Cartagena. *Bol. Cient. CIOH*, 22: 90-104.
- Blott, S.J. & P. Kenneth. 2001. Gradistat: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surf. Proc. Land.*, 26: 1237-1248.
- Burel, T. & G. Vernet. 1981. Evidencias de cambios del nivel del mar en el Cuaternario de la región de Cartagena. 1er Seminario sobre el Cuaternario en Colombia. *Rev., CIAF*, 6 (1-3): 77-92.
- Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (CIOH). 1988. Estudio geológico litoral del Caribe colombiano Fase III. *Bol. Cient. Isla del Rosario*, 8: 82-102.
- Cormagdalena. 2004. Actualización del plan de manejo ambiental de los dragados de limpieza y mantenimiento del Canal del Dique. Cormagdalena – labo-

- ratorio de ensayos hidráulicos de Las Flores. Documento E-063-032-04. Rep. Téc., 73 pp.
- Cupul-Magaña, L., C. Mosso-Aranda, J. Sierra, E. Martí, J. Ferman-Almada, M. Rodilla, J. Gonzáles del Río & A. Sánchez-Arcilla. 2006. Caracterización y patrones de distribución de los sedimentos superficiales en bahía Cullera, España. *Cienc. Mar.*, 32: 617-629.
- Duque-Caro, H. 1980. Geotectónica evolutiva de la región noroccidental colombiana. *Bol. Geol.*, 23(3): 4-37.
- Folk, R. & W. Ward. 1957. Brazos river bar: a study in the significance of grain size parameters. *J. Sed. Petrol.*, 27: 3-26.
- Friedman, G. 1962. On sorting, sorting coefficients and lognormality of the grain size distribution. *J. Geol.*, 70: 737-756.
- Friedman, G. 1979. Differences in size distribution of population of particles among sands of various origins. *Sedimentology*, 26: 3-32.
- Guillén, J. & J. Jiménez. 1994. Processes behind long-shore variations of the sediment grain size in the Ebro Delta COSAD. *J. Coastal Res.*, 8: 201-209.
- Inram, J. & J.P. Syvitsky. 2000. Impact of extreme river events on the coastal ocean. *Oceanography*, 13: 85-92.
- Klingebiel, A. & G. Vernet. 1979. Estudio batimétrico y sedimentológico en la plataforma continental entre Cartagena y la desembocadura del río Magdalena (Colombia). *Bol. Cient. CIOH*, 5: 1-15.
- Krumbein, W. & L. Sloss. 1963. Stratigraphy and sedimentation. W.H. Freeman and Company, New York, 778 pp.
- Laboratorio de Ensayos Hidráulicos-Ministerio de Obras Públicas y del Transporte de Colombia (LEH-MINTRANSPORTE), 1988. Memoria anual de trabajos desarrollados en el laboratorio. Rep. Téc. Bogotá, 158 pp.
- Leble, S. & R. Cuignon. 1987. El archipiélago de las islas del Rosario, estudio morfológico, hidrodinámico y sedimentológico. *Bol. Cient. CIOH*, 7: 37-52.
- Lonin, S. & L. Giraldo. 1996. Circulación de las aguas y transporte de contaminantes en la bahía de Cartagena. *Bol. Cient. CIOH*, 16: 15-26.
- Lonin, S. & L. Giraldo. 1997. Influencia de los efectos térmicos en la circulación de la bahía de Cartagena. *Bol. Cient. CIOH*, 17: 47-56.
- Lonin, S., C. Parra, C. Andrade & T. Yves-Francois. 2004. Patrones de la pluma turbia del Canal del Dique en la bahía de Cartagena. *Bol. Cient. CIOH*, 22: 77-89.
- Martínez, J.I., Y. Yokoyama, A. Gómez, A. Delgado, H. Matsuzaki & E. Rendón. 2010. Late Holocene marine terraces of the Cartagena region, southern Caribbean: the product of neotectonism or a former high stand in sea-level? *J.S. Am. Earth Sci.*, 29: 214-224.
- Minh-Duc, D., M. Trong-Nhuan, Ch. Van Ngoi, T. Nghi, D. Manh-Tien, C. Van Weering & G. Van der Bergh. 2007. Sediment distribution and transport at the nearshore zone of the Red River delta, northern Vietnam. *J. Asian Earth Sci.*, 29: 558-565.
- Misión Técnica Colombo Holandesa (MITCH). 1973. Río Magdalena and Canal del Dique survey Project. Rep. Téc. Bogotá, 329 pp.
- Molares, R. 2004. Clasificación e identificación de los componentes de marea del Caribe colombiano. *Bol. Cient. CIOH*, 22: 105-114.
- Muñoz, A., A. Soria, J. Canudo, A. Casas, A. Gil & M. Mata. 1997. Caracterización estratigráfica y sedimentológica del Albiense marino del borde norte de la Sierra de Caneros: implicaciones paleogeográficas. *Cuadernos de Geología Ibérica*, 22: 139-163.
- Pagliardini, J.M., H. Gomez, S. Gutiérrez, A. Zapata, J. Jurado, G. Garay & G. Vernet. 1982. Síntesis del Proyecto Bahía de Cartagena. *Bol. Cient., CIOH*, 4: 49-110.
- Pontee, N., K. Pye & S. Blott. 2004. Morphodynamic behavior and sedimentary variation of mixed sand and gravel beaches, Suffolk, UK. *J. Coastal Res.*, 20: 256-276.
- Reed, A. & J. Wells. 2000. Sediment distribution patterns offshore of a nourished beach: Atlantic Beach and Fort Macon, North Carolina. *J. Coastal Res.*, 16: 88-98.
- Restrepo, J.D., P. Zapata, J.M. Díaz, J. Garzón-Ferreira, C. García & J.C. Restrepo. 2005. Aportes fluviales al mar caribe y evaluación preliminar del impacto sobre los ecosistemas costeros. In: J.D. Restrepo (ed.). Los sedimentos del río Magdalena: reflejo de la crisis ambiental. Fondo Editorial Universidad EAFIT, pp. 187-215.
- Reyes, G., G. Guzmán, G. Barbosa & G. Zapata. 2001. Geología de las Planchas 23: Cartagena y 29-30: Arjona. Escala 1:100.000. Memoria Explicativa. Instituto de Investigación e Información Geocientífica, Minero Ambiental y Nuclear (INGEOMINAS), 58 pp.
- Rohas, C. 1985. El estuario del río Queule: un ambiente sedimentario en el sur de Chile. *An. Cent. Cienc. Mar Limnol.*, 5: 231-240.
- Sahu, B. 1964. Depositional mechanism from the size analysis of clastic sediments. *J. Sed. Petrol.*, 34: 73-83.
- Shepard, F. 1963. Submarine geology. Harper and Row Publishers, New York, 557 pp.

- Sociedad Portuaria Regional de Cartagena (SPRC). 2009. Actualidad Portuaria-Estadísticas. Reporte Técnico. Cartagena de Indias, D.T. y C. <http://albatros.puerto.cartagena.com/opadmco.nsf/ustRefLinkDoc/6AA2E250E46E9B2F052573B006C9702> Revisado: 12 Septiembre 2011.
- Universidad Nacional de Colombia. 2002. Dinámica fluvial deltaica y litoral del Canal del Dique. Ministerio del Medio Ambiente, Bogotá, 225 pp.
- Universidad Nacional de Colombia. 2007. Estudios e investigaciones de las obras de restauración ambiental y de navegación del Canal del Dique. Informe de Hidrología, Cormagdalena, Bogotá, 44 pp.
- Vernette, J.G. 1978. Cartografía de los fondos en la plataforma continental: estandarización de los criterios sedimentológicos. Bol. Cient., CIOH, 4: 3-13.
- Vernette, J.G., P. Lesueur & A. Klingebiel. 1984. Evolución morfológica y sedimentológica de la flecha litoral del Laguito. Bol. Cient. Bahía de Cartagena, CIOH, 5: 3-23.
- Vivas-Aguas, L., M. Tosic, J. Sanchez, S. Narvaez, B. Cadavid, P. Bautista, J. Betancourt, J. Parra, L. Echeverri & L. Espinosa. 2010. Diagnóstico y evaluación de la calidad ambiental marina en el Caribe y Pacífico colombiano. Red de vigilancia para la conservación y protección de las aguas marinas y costeras de Colombia-REDCAM. Inf. Téc. 2010. INVEMAR, Santa Marta, 208 pp.

Received: 11 November 2011; Accepted: 17 January 2013