

Estimación del campo de transporte neto de sedimentos en el fondo de Bahía Colombia con base en análisis de tendencia del tamaño de grano

Alexandra María Álvarez L.¹ & Gladys Rocío Bernal F.¹

*1. Escuela de Geociencias y Medio Ambiente,
Universidad Nacional de Colombia - Medellín
amalvar4@unalmed.edu.co
gbernal@unalmed.edu.co*

Recibido para evaluación: 27 de Agosto de 2007 / Aceptación: 18 de Septiembre de 2007 / Versión Final: 16 de Octubre de 2007

Resumen

Se estudian los sedimentos superficiales del fondo marino en la zona de Bahía Colombia (Golfo de Urabá), con el objeto de estimar los patrones de transporte neto de sedimentos, que establecen zonas de deposición y transporte. Para ello, se determinó la distribución granulométrica en cada sitio de muestreo, por medio de tamizado en seco y el método de la pipeta, aplicando el método de los momentos para estimar la media, la selección y la asimetría. Se implementó el método de Leroux (1994 a,b), que integra estos parámetros sedimentológicos en grupos de cinco estaciones, para calcular el azimuth medio y una magnitud relativa del vector de transporte neto. Las direcciones de transporte encontradas muestran que los sitios de depósito de sedimentos se presentan en la zona sur de la bahía, en la zona oriental y al frente de las bocas del río Atrato. Este patrón se relaciona con la circulación superficial de la época de verano (Chevillot et al., 1993 y Montoya y Toro, 2006) y con las zonas de acumulación definidas por comparaciones batimétricas en el tiempo (Molina, Molina y Chevillot, 1992). Los resultados obtenidos son una primera aproximación al transporte de fondo en Bahía Colombia.

Abstract

Sea Floor surface sediments are studied over the region of Bahía Colombia (Urabá Gulf), with the purpose of finding net sediment transport patterns, establishing deposition and transport areas. The pipette method and dry sieving were carried out, and grain size distributions were determined at each sampling site. Moment methods was employed to calculate mean, selection and skewness. In order to estimate relative magnitude and direction of net transport vectors, sedimentological parameters were arranged in five-station groups after Leroux s method (1994 a,b). The identified transport directions show that deposition occurs over the southern and eastern portions of the bay and in front of the Atrato s mouth. This pattern relates to the surface dry season circulation (Chevillot et al., 1993 y Montoya y Toro, 2006) and to accumulation areas defined by bathymetric comparisons through time (Molina, Molina y Chevillot, 1992). These results are a first approach of sea floor transport on Bahía Colombia.

Key Words: Sediment Transport, Grain Size, Marine Sediments, Gulf of Urabá, Colombian Caribbean

Palabras Clave: Transporte de sedimentos, Granulometría, sedimentos marinos, Golfo de Urabá, Caribe Colombiano.

1. Introducción

Los estudios de transporte de sedimentos del lecho marino se realizan con el objeto de determinar fuentes, rutas y zonas de deposición, útiles en ingeniería de costas e ingeniería ambiental, debido a que permiten establecer los patrones de sedimentación y transporte de contaminantes. Los modelos que determinan los vectores de transporte neto de sedimentos basados en las características del tamaño del grano comenzaron a desarrollarse a comienzos de la década de los ochenta por MacLaren (1981) y MacLaren y Bowles (1985). Posteriormente fueron evolucionados por Gao y Collins (1992, 1994) y LeRoux (1994 a,b), quienes propusieron metodologías para su implementación, por medio de las cuales se obtiene la dirección del vector medio de transporte en un periodo de sedimentación.

Distintas metodologías para este modelo han sido implementadas satisfactoriamente en Golfo y Bahías, tales como el Puerto de Yangpu (Gao y Collins, 1992); el Golfo de California (Carriquiry y Sánchez, 1999; Carriquiry, Sánchez y Camacho, 2001); el Estrecho de Bohai (Cheng, Gao y Bokuniewicz, 2004); la bahía de Todos los Santos (Pérez y Chee, 1984) y Puerto de Lirquén (LeRoux et al., 2002). En estas localidades se establecieron mapas de los campos de vectores de transporte neto de sedimentos a partir de las características granulométricas.

En Bahía Colombia, ubicada en el sector sur del Golfo de Urabá, se presentan importantes problemas de sedimentación producto de la descarga de los ríos y los procesos de erosión - sedimentación. La alta producción de sedimentos en la zona de Bahía Colombia está relacionada con la intervención antrópica, debida principalmente a cambios en el uso de las tierras, los cauces de los ríos y la deforestación, que han modificado las tasas de transporte y la acción del oleaje en las costas (CORPOURABA - Universidad Nacional, 1998). Esta situación preocupa a las unidades ambientales, por la degradación continua del ambiente, y a la industria agrícola, por ser ésta una zona de tránsito de 70 buques de más de 80 ton dispuestos a transportar el banano, el producto de exportación de la región (CCO, 2007).

Con el fin de contribuir al conocimiento necesario para el manejo de la problemática de sedimentación en Bahía Colombia, se

implementó el modelo de cuantificación del campo de vectores de transporte neto de sedimentos basado en la granulometría. Hasta el momento, en el Golfo de Urabá se cuenta con estudios en la franja litoral, tales como Aristizábal, Betancur y Vásquez (1989); Molina, Molina y Chevillot (1992); Correa, (1992); Franco y Gómez (1996); CORPOURABA - Universidad Nacional (1998); y Correa y Vernet (2004). En estos se hicieron levantamientos de la línea de costa y se determinaron las franjas de erosión y sedimentación y sus posibles causas. En cuanto al cuerpo de agua del Golfo, Molina, Molina y Chevillot (1992) hicieron una comparación entre mapas batimétricos antiguos y recientes de la que concluyeron que, a diferencia de la zona costera, en el fondo de la Bahía dominan los procesos de deposición.

Definir el campo de los vectores netos de transporte de fondo es relevante porque es una aproximación a las condiciones de largo plazo resultantes de la acción de corrientes de fondo, variables en el tiempo de acuerdo con cambios en los vientos, olas y mareas. Por tanto, los resultados obtenidos por este tipo de metodologías permiten discutir los efectos reales de la circulación en la distribución de los sedimentos del fondo. En este trabajo se implementa el modelo de LeRoux (1994 a,b) como una primera aproximación a la cuantificación del transporte de fondo de Bahía Colombia y se hace un análisis de la significancia de los resultados obtenidos.

2. Zona de Estudio

Bahía Colombia se encuentra ubicada en la zona noroccidental de Colombia, en jurisdicción del Departamento de Antioquia, en la parte sur del Golfo de Urabá. Está separada del resto del Golfo por un estrecho formado por los depósitos del delta del río Atrato (Figura 1). Se caracteriza por ser una zona de manglares y marismas, dominada por la acción de los ríos que a ésta afluuyen, dentro de los que se encuentran algunos brazos del Río Atrato y el Río León. Estos ríos, combinados con la acción de los vientos y las mareas imponen un sistema de circulación que afecta los procesos de sedimentación de la bahía (Montoya y Toro, 2006).

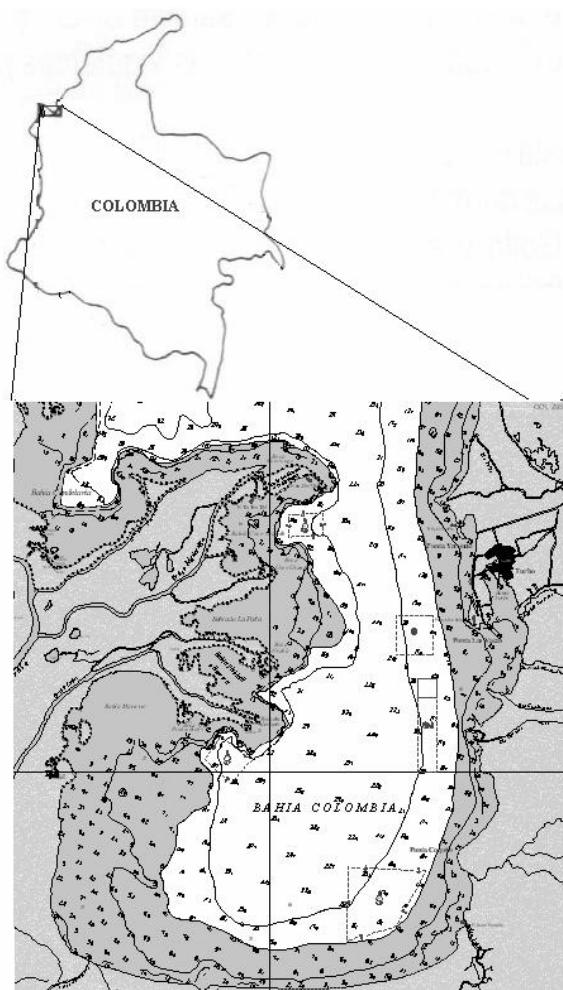


Figura 1. Localización de la zona de estudio. (Modificado de Molina, Molina y Chevillot (1992)).

Las condiciones climáticas de la zona se deben a la migración de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), lo que produce una presencia dominante de la lluvia a lo largo de la mayor parte del año. Así, entre los meses de abril a noviembre la precipitación es más alta, con vientos alisios provenientes del suroeste, que penetran por la cuenca del Río Atrato desde la costa chocoana. La época seca ocurre en los meses de enero, febrero y marzo, con una transición en diciembre, y vientos alisios provenientes del noreste, desde el Mar Caribe (Lonin y Vásquez, 2005; INVEMAR, 2003; Molina, Molina y Chevillot (1992) y Montoya y Toro, 2006).

Las fuentes aluviales en el Golfo de Urabá se caracterizan por tener pequeñas cuencas y alta producción de sedimentos por área, tal como se muestra en la Tabla I (Restrepo y Kjerfve, 2000). El río Atrato es el que mayor cantidad de sedimentos aporta al Golfo de Urabá, con una descarga 15 veces mayor que el Río León, el segundo en importancia. Ambos ríos desembocan en el área de estudio.

En los estudios sobre erosión y sedimentación costeras se ha encontrado que la zona sometida a mayores cambios se encuentra en el litoral del Río Turbo, debido al cambio en su cauce, que produjo la formación de un nuevo delta, denominado Punta Yarumal, cuya formación condujo a intensos procesos de erosión en Punta de las vacas, al sur del mismo. Además, según Molina, Molina y Chevillot (1992), el delta del Río Atrato muestra alta variabilidad entre procesos de erosión en algunos de sus brazos, con zonas de acreción menos importantes en los frentes. En contraste, en la zona sur de la bahía, se determinó el dominio de la estabilidad en el litoral, debido a que la zona está conformada principalmente por manglares y ciénagas (Velásquez y Rave, 1996).

Tabla I. Producción de sedimentos ríos del Golfo de Urabá (Fuente: Restrepo y Kjerfve, 2000)

Río	Área de la cuenca ($\times 10^3 \text{ km}^2$)	Lluvia anual (mm)	Descarga de agua ($\text{km}^3 \text{ año}^{-1}$)	Descarga de sedimentos ($\times 10^6 \text{ t año}^{-1}$)	Producción de sedimento ($\text{t km}^{-2} \text{ año}^{-1}$)	Período de registro
Atrato	35.7	5318	81.08	11.26	315	1982–1993
Chigorodó	0.1	2485	0.46	0.2153	1088	1977–1993
León	0.7	2485	2.01	0.7701	1007	1978–1993
Zungo	0.05	2485	0.07	0.0292	584	1977–1993
Apartadó	0.16	2485	0.14	0.062	585	1984–1993
Carepa	0.15	2485	0.16	0.3175	2048	1978–1993
Curralao	0.23	2485	0.31	0.2373	1023	1979–1993
Guadalito	0.08	2485	0.08	0.031	369	1979–1993

Según Chevillot et al. (1993) la dirección del viento afecta la circulación en la bahía, puesto que cuando se presentan los vientos provenientes del norte, durante la época seca, la pluma turbia permanece cerca de las bocas de los ríos, entrando parte de ésta a Bahía Colombia, lo cual es corroborado en Montoya y Toro (2006). Esto explica que en esta época se presente una circulación con dirección norte - sur por la parte occidental de la bahía y saliendo hacia el norte por el oriente (Chevillot et al., 1993). Cuando los vientos provienen del suroeste, la pluma turbia se orienta en dirección noreste, permaneciendo la zona de Bahía Colombia con salinidades altas en esta época, (Montoya y Toro, 2006).

3. Datos y Métodos

Las muestras empleadas para este estudio se obtuvieron durante la campaña de mediciones oceanográficas realizada en lancha en el mes de agosto de 2006 en la zona de Bahía Colombia, en la cual se recolectaron 41 muestras de sedimentos superficial del fondo marino (ver Figura 2). Este muestreo se realizó con una draga tipo Ekman de acero inoxidable, con medidas de 0.15 m x 0.15 m x 0.15 m, separando los centímetros 1 y 2 en bolsas sellables para su posterior almacenamiento y refrigeración.

Las muestras fueron llevadas al laboratorio de Rocas Sedimentarias de la Facultad de Minas, donde fueron secadas a una temperatura no mayor de 50°C. Se determinó la granulometría del primer centímetro empleando el método de la pipeta para la fracción de limos y arcillas, tomando medidas cada 1 phi, y tamizaje en seco para la fracción de arenas (Tucker, 1988).

Como las distribuciones del tamaño de los sedimentos representan una curva normal, las características granulométricas de la media, la selección y la asimetría, se obtuvo por el método de los momentos (Tucker, 1988). La interpretación espacial de estos resultados se hizo por medio de gráficas de interpolación realizadas con el programa Surfer 7.0, empleando kriging como método de interpolación. Con los datos de los parámetros del tamaño del grano se procedió a implementar el método de dispersión de sedimentos, por medio de una rutina en MATLAB®, diseñada de acuerdo con la metodología expuesta por LeRoux (1994 a,b).

El método de transporte de sedimentos se basa en la integración de los parámetros del tamaño del grano, la selección, σ , la media,

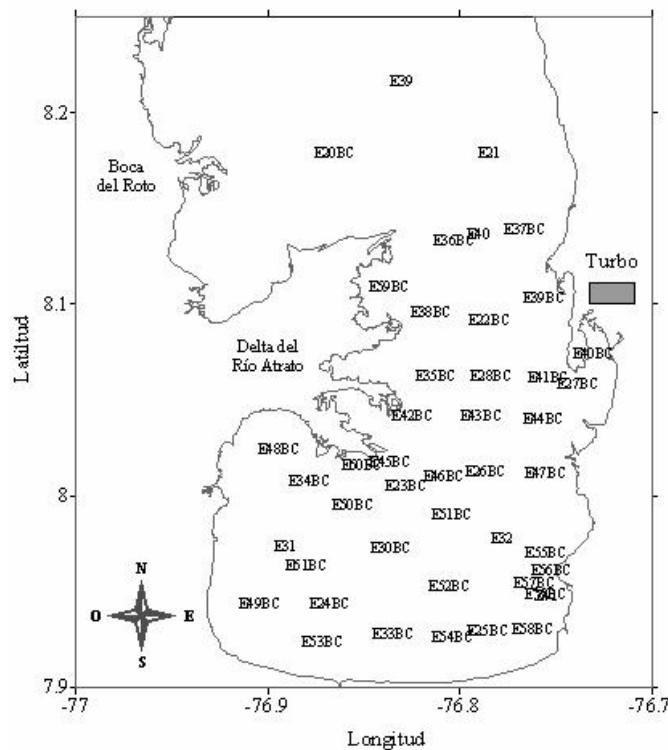


Figura 2. Estaciones muestreadas campaña Bahía Colombia.

μ , y la asimetría, Sk , en grupos de cinco estaciones, empleadas para calcular el azimuth medio y la magnitud del vector. Este tiene las siguientes suposiciones básicas: 1) Los cambios espaciales en los parámetros siguen tendencias como resultado de los procesos de transporte; 2) El modelo es aplicable cuando se da el transporte de sedimentos a lo largo de frentes amplios y unidireccionales; 3) El gradiente definido por los parámetros del tamaño del grano es constante sobre el área que comprenden los cinco sitios de muestreo, y 4) Los tres parámetros granulométricos se consideran de igual importancia. La última suposición no es cierta en la realidad, pero según Leroux (1994) es imposible cuantificar la importancia relativa debido a la complejidad de los procesos de transporte.

Para determinar el vector de transporte, se cuenta con cuatro tipos de tendencias del tamaño del grano, expresados en término de las unidades ϕ (LeRoux, 1994a), dados por:

Tipo 1: $\sigma_1^2 > \sigma_2^2 ; \mu_1 < \mu_2 ; Sk_1 > Sk_2$

Tipo 2: $\sigma_1^2 > \sigma_2^2 ; \mu_1 > \mu_2 ; Sk_1 < Sk_2$

Tipo 3: $\sigma_1^2 > \sigma_2^2$; $\mu_1 > \mu_2$; $Sk_1 > Sk_2$

Tipo 4: $\sigma_1^2 > \sigma_2^2$; $\mu_1 < \mu_2$; $Sk_1 < Sk_2$

Donde los subíndices 1 y 2 indican la localización de los sitios de las muestras con respecto a la dirección de transporte (el transporte va de 1 a 2).

Una estación central se compara con cuatro estaciones cercanas, satelitales, que deberán estar posicionadas en o cerca de los cuatro cuadrantes. Para efectos de comparación de cada una de las estaciones estudiadas, éstas deben ser localizadas por medio de técnicas trigonométricas, en los radiales principales (con las direcciones 360° , 90° , 180° y 270°). La magnitud y la dirección del vector de transporte pueden ser determinadas por las ecuaciones vectoriales ajustadas (LeRoux, 1994a).

$$\Omega = \sqrt{\left[\sum (f \sin \phi) \right]^2 + \left[\sum (f \cos \phi) \right]^2} + 1 - \frac{1}{\sqrt{2} \sin(45 + \theta)} \quad (1)$$

$$\Theta = \tan^{-1} \frac{\sum (f \sin \phi)}{\sum (f \cos \phi)} \quad (2)$$

en donde ϕ es el ángulo de los radiales principales y f es el peso relativo de los parámetros de tamaño de grano en cada dirección.

Para no crear distorsión del vector medio y de la magnitud, los parámetros del tamaño del grano tienen que ser integrados de tal manera que cada uno tenga igual importancia. Como los valores de los tres parámetros tienen rangos diferentes, ellos no pueden ser comparados directamente, y es entonces necesario equilibrarlos para dar a cada parámetro el mismo rango de valores, así:

$$\sigma^2 n = \frac{33.33}{\sigma_{\max}^2 - \sigma_{\min}^2} \left(\sigma^2 - \sigma_{\min}^2 \right) \quad (3)$$

donde n es el valor ajustado para σ^2 y los subíndices \max y \min indican los valores máximos y mínimos del coeficiente de selección para las cinco estaciones de cada grupo.

Los valores convertidos de todos los 3 parámetros estarán ahora variando entre 0 y 33.33, entonces pueden ser adicionados para dar un valor combinado o integrado, ε , en el que cada parámetro tiene el mismo peso (LeRoux, 1994a):

$$\begin{aligned} \varepsilon = & \frac{33.33}{\sigma_{\max}^2 - \sigma_{\min}^2} \left(\sigma^2 - \sigma_{\min}^2 \right) + \frac{33.33}{\mu_{\max}^2 - \mu_{\min}^2} \left(\mu^2 - \mu_{\min}^2 \right) \\ & + \frac{33.33}{Sk_{\max}^2 - Sk_{\min}^2} \left(Sk^2 - Sk_{\min}^2 \right) \end{aligned} \quad (4)$$

Cada uno de los componentes de esta suma se ajustan de acuerdo con el tipo de transporte por considerar. La dirección de transporte estará hacia donde se encuentre el valor mayor de ε .

Para Bahía Colombia, de las 41 estaciones de muestreo se escogieron aquellas que cumplían la condición de tener 4 estaciones satelitales distribuidas en los radios principales a $\pm 45^\circ$ de cada uno. Finalmente se determinaron 18 vectores para cada uno de los tipos de transporte. De acuerdo con el método, la magnitud para cada tipo es unitaria. Para definir un vector medio resultante entre los tipos de transporte, se siguió la metodología expuesta en Carriquiry y Sánchez (1999). Se usó una técnica de suavizado consistente en promediar los tipos de transporte y una prueba de significancia estadística para los vectores medios transporte, de acuerdo con Gao y Collins (1992, 1994) y LeRoux (1994b). De este modo, la magnitud de los vectores medios resultantes es proporcional a la tendencia del transporte en esa dirección, pero adimensional.

4. Resultados

A continuación se presentan los resultados de la estimación de la media, la selección y la asimetría, obtenidos por el método de los momentos (Tucker, 1988), para las distribuciones de los tamaños de los granos en el fondo marino de Bahía Colombia. Se presentan además, los resultados del modelo de transporte empleando la metodología propuesta.

4.1. Características granulométricas

De acuerdo con los resultados del tamaño medio en la zona de Bahía Colombia (Figura 3), los sedimentos en el fondo marino van de arenas a limos de tamaño medio. La mayoría pertenecen al rango entre 6 phi y 7 phi, es decir, existe un dominio de los lodos en casi toda el área de Bahía Colombia, exceptuando la margen sur-occidental, el frente del delta del río León y los frentes

de algunas bocas del río Atrato a la altura de Turbo, donde se encuentran acumulaciones de arenas.

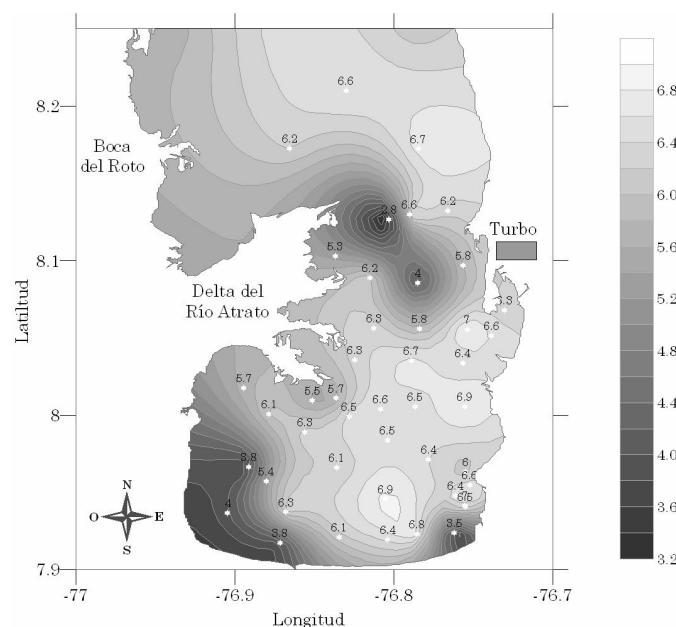


Figura 3. Distribución de la media en Bahía Colombia, en unidades phi.

Según la desviación estándar, los sedimentos van de moderadamente seleccionados a muy pobemente seleccionados, es decir que en estos sedimentos se presentan combinaciones entre lodos y arenas finas (Figura 4). Los valores más comunes están entre 1.0 y 2.0, correspondientes al rango pobemente seleccionados (Tucker, 1988). A su vez, el rango total de asimetría en el Golfo se presenta entre -1.7 y 2.0 (Figura 5), correspondiente a muy negativamente asimétrico y muy positivamente asimétrico, es decir, el límite negativo corresponde a los casos donde dominan los finos pero la curva contiene un exceso de gruesos con respecto a una distribución Normal, y el límite más positivo corresponde a sedimentos más gruesos con un exceso de finos.

La zona arenosa de la esquina suroccidental es pobemente seleccionada y fuertemente asimétrica (con exceso de finos respecto a la distribución normal). La zona arenosa al frente del río León es muy pobemente seleccionada y también positivamente asimétrica. En tanto que la zona arenosa al frente de Turbo está ligeramente mejor seleccionada que las anteriores.

La zona central de Bahía Colombia, la más profunda y con sedimentos más finos, es pobemente seleccionada y negativamente asimétrica (contiene un exceso de gruesos).

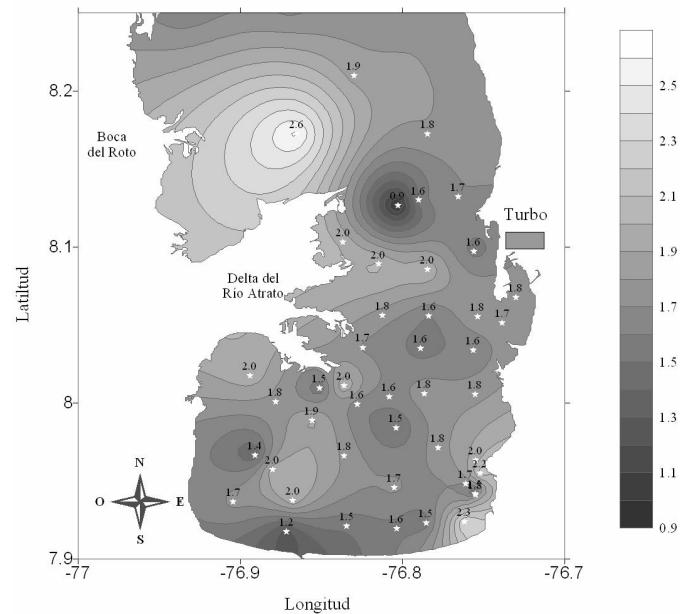


Figura 4. Distribución de la desviación estándar en Bahía Colombia, en unidades phi.

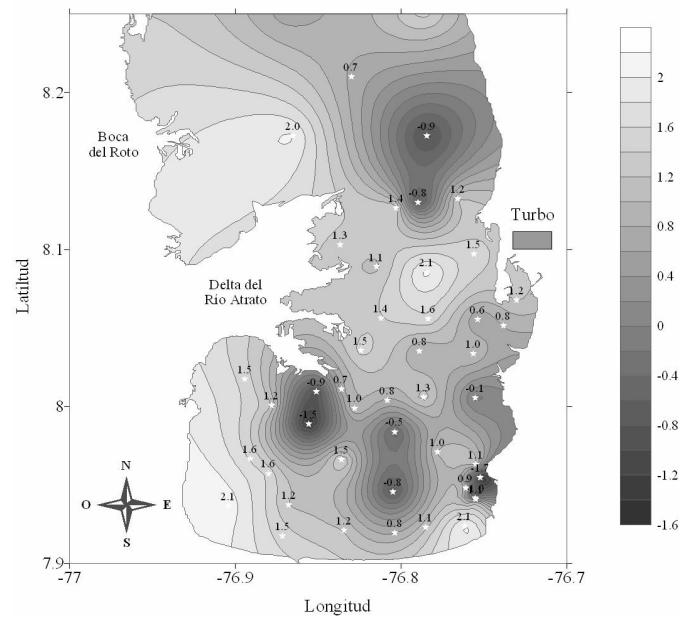


Figura 5. Distribución de la asimetría en Bahía Colombia, en unidades phi.

Con la estación 3IBC (ver Figuras 2 y 6), se muestra un ejemplo de como se presenta la distribución Normal de los sedimentos para una muestra de arenas finas, con una media de 3.8 phi, una desviación estándar de 1.4, correspondiente al rango pobemente seleccionado, y una asimetría de 1.58, correspondiente al rango muy positivamente asimétrico.

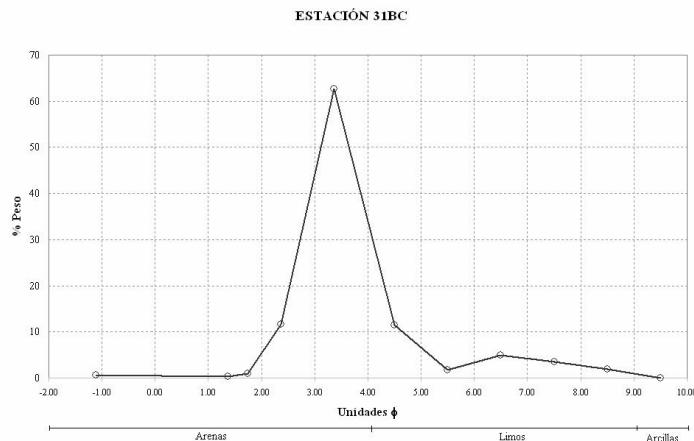


Figura 6. Distribución granulométrica de la estación 3IBC

4.2. Método de dispersión de los sedimentos

En la Figura 7 se presenta el mapa de vectores promedio de transporte de sedimentos de fondo estimado por medio del modelo de patrones de sedimentos a partir de las características del grano, de acuerdo con la metodología propuesta por LeRoux (1994 a,b). En él se presentan las estaciones consideradas, los vectores de transporte obtenidos empleando el método antes descrito; las zonas de deposición de sedimentos demarcadas de acuerdo con los resultados y las tendencias generales estimadas a partir de los vectores de transporte neto obtenidos.

Se observa que existen direcciones dominantes en el transporte hacia las márgenes sur y oriental de la bahía. Además, se observa una zona de depósito de sedimentos al frente del delta del Río Atrato. Estas direcciones de transporte se dan en general hacia las zonas con mejor selección y mayor presencia de arenas (ver Figuras 3 y 4). Así mismo, se evidencia un transporte dominante desde el delta del Río Atrato hacia el sur y oriente de la Bahía, interrumpido localmente por los aportes del Río León.

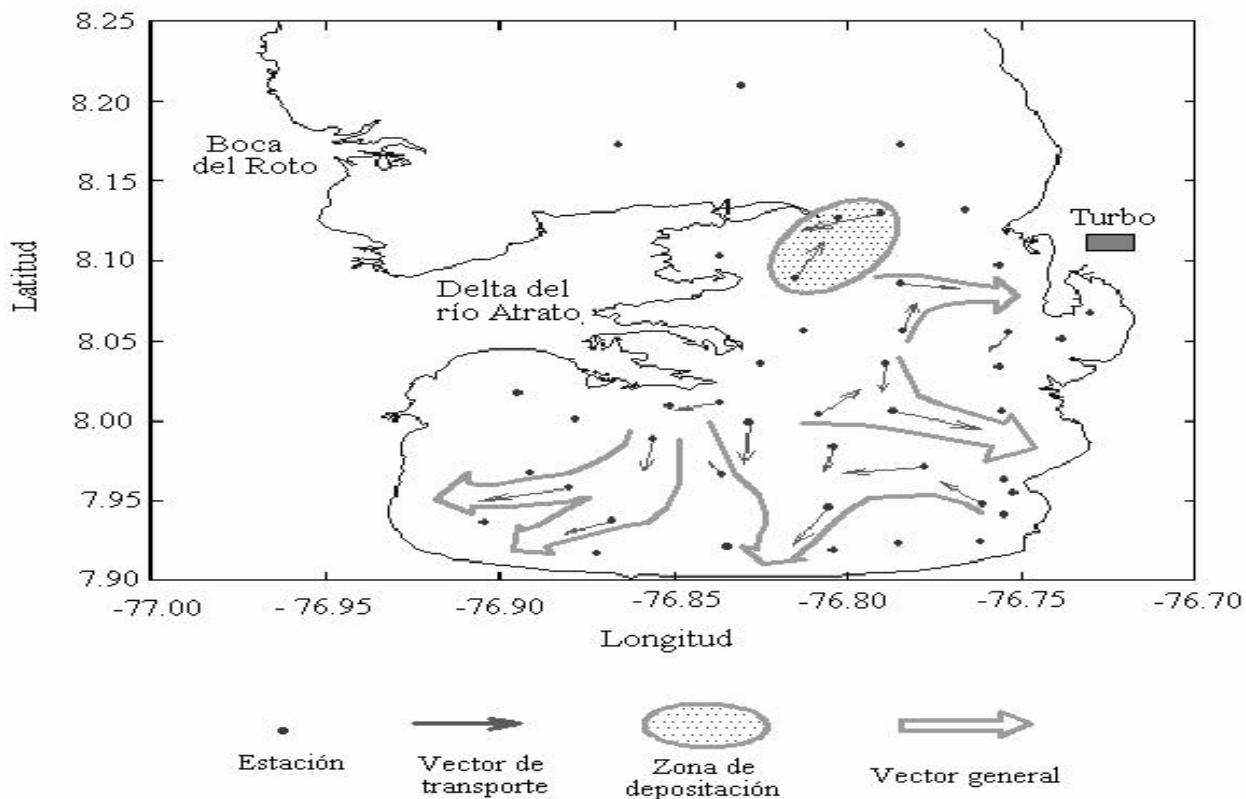


Figura 7. Vectores de transporte neto de sedimentos de fondo en Bahía Colombia.

5. Discusión

De acuerdo con los resultados obtenidos en la distribución granulométrica de Bahía Colombia, existen tres zonas de acumulación de arenas finas mal seleccionadas, localizadas en los frentes de los deltas del Río Atrato y del Río León y en la zona sur

occidental. La zona central de la bahía presenta preferencialmente sedimentos finos. Las direcciones de transporte de fondo medio se dirigen hacia las zonas de acumulación de arenas.

No se han publicado resultados sobre las corrientes de fondo en Bahía Colombia. Sin embargo, la dispersión de los sedimentos del piso marino se relaciona satisfactoriamente con la circulación superficial, tal como se describe en Molina, Molina y Chevillot (1992); Chevillot et al. (1993) y Montoya y Toro (2006). Esto es, de acuerdo con lo encontrado en este estudio, la dirección del transporte neto de sedimentos va de norte a sur, desde el delta del Río Atrato.

Por otro lado, Molina, Molina y Chevillot (1992) compararon distintos cortes de batimetrías levantadas en 1938 y en 1983 y encontraron tendencias a la sedimentación hacia los bordes de la cuenca, con acumulaciones de hasta 4 m en el borde oriental y 2 m en el occidental de la Bahía durante los últimos 45 años. Aunque la comparación de mapas presenta problemas de precisión debidos a los distintos métodos de los levantamientos batimétricos, son muy buenos indicativos de los cambios morfológicos y soportan los resultados obtenidos por el método de vectores de transporte netos.

En general, el Golfo de Urabá y especialmente la zona de Bahía Colombia, presentan corrientes superficiales muy fuertes condicionadas principalmente por la entrada del Río Atrato, la que a su vez se ve afectada por la dirección de los vientos (Montoya y Toro, 2006), y que finalmente condiciona la estructura hidrodinámica en el golfo. Este tipo de resultados también son obtenidos en estudios anteriores (Gao y Collins, 1992; Carriquiry y Sánchez, 1999; Carriquiry, Sánchez y Camacho, 2001; Cheng, Gao y Bokuniewicz, 2004; Pérez y Chee, 1984; LeRoux et al., 2002), en los cuales se reportan comportamientos de la circulación de acuerdo al que describe la hidrodinámica.

Para discutir la validez de los resultados obtenidos por los

métodos de tendencia de tamaño de grano, es importante abordar aspectos como el método de muestreo, la densidad de las estaciones, el análisis del tamaño de grano, los tipos de tendencia de transporte, los pesos relativos de los parámetros del tamaño de grano y el filtrado de los datos (Le Roux y Rojas, 2007). El método de muestreo empleado en este trabajo utilizó un tipo de draga que no genera una perturbación del sedimento, y se tuvo el cuidado de tomar el primer centímetro, con el fin de estudiar la sedimentación más reciente y, aproximadamente, el mismo período en todas las muestras. Sin embargo, para mejorar este muestreo habría que tener en cuenta las tasas de sedimentación en cada zona y las formas del lecho (en el caso de rizaduras de gran longitud de onda, la caja debería ser más grande para tomar un sedimento promedio). Las técnicas de análisis granulométrico seguidas son estándares. Según Le Roux y Rojas (2007), éstas no parecen jugar un papel importante en el resultado de las tendencias, pero se requiere mayor estudio hacia el futuro, especialmente en lo referente a las distribuciones estadísticas de los tamaños.

En cuanto a la distancia óptima entre estaciones, Le Roux y Rojas (2007) indican que la separación debe variar entre 50m y 250m para obtener resultados óptimos, y mencionan que en las plataformas continentales estas distancias podrían ser de 1 km, aunque faltan estudios específicos. En este estudio se empleó en promedio distancias entre muestras de 1.2 km. Sin embargo, en otras localidades se ha implementado esta metodología con distancias aún mayores, obteniendo buenos resultados, como es el caso de Carriquiry y Sánchez (1999) y Carriquiry, Sánchez y Camacho (2001), quienes usan distancias entre estaciones de 6.5 km o Gao y Collins (1992), quienes emplearon una distancia entre estaciones de 2.15 km. Para Bahía Colombia, hacer muestreos con resolución de al menos 250 m cuadruplicaría el tiempo y costos de la investigación.

Los resultados obtenidos en este trabajo, entonces, deben entenderse como una primera aproximación a la estimación del transporte de fondo, con limitaciones propias de los recursos disponibles. Hacia el futuro sería importante hacer un estudio más detallado, donde se mejoren aspectos del muestreo y se hagan contribuciones al modelo empleado. Estas contribuciones pueden estar encaminadas a la elección del tipo de tendencia y a los factores de ponderación que se le deben dar a los parámetros considerados.

6. Conclusiones

La distribución de la media establece que se encuentran tres zonas de deposición de arenas, en los frentes de las bocas del Río Atrato, del Río León y en la zona sur-occidental de la Bahía. Los finos dominan principalmente en la zona central, en la región más profunda de la bahía. La selección se reduce en estas zonas de deposición de las arena y finos, y la asimetría se hace más positiva en las zonas de arenas y más negativa en las zonas de finos.

Por medio del modelo de vectores de transporte neto de sedimentos se encontró que los patrones de transporte tienen direcciones dominantes de norte a sur, hacia el oriente y hacia el frente del delta del Río Atrato.

Las direcciones de transporte neto encontradas presentan un patrón que se relaciona con el descrito hasta ahora en los estudios de circulación superficial de Chevillot et al. (1993) y Montoya y Toro (2006). Así el transporte de fondo en Bahía Colombia está influenciado por la dirección de la circulación superficial, y muestra que prevalecen las direcciones impuestas por las condiciones climáticas secas.

Los vectores de transporte medio encontrados en este trabajo ilustran los resultados que se pueden ser obtener aplicando una metodología de tendencia de tamaños, pero dejan abierta una línea de trabajo a futuro.

Agradecimientos

Este trabajo se llevó a cabo en el marco del proyecto de investigación Estudio de la relación entre la dinámica oceanográfica del Golfo de Urabá, la dispersión de contaminantes orgánicos y de sedimentos y el planteamiento de posibles acciones de manejo. Los autores agradecen a Colciencias, la Universidad de Medellín y Augura por el patrocinio proporcionado durante la ejecución de esta investigación. Y a todos los miembros del grupo de trabajo, el personal, compañeros y amigos de la Universidad Nacional, sede Medellín, por su apoyo en gestión, equipos, laboratorios y otras contribuciones.

Referencias

- Aristizábal, O., J. Betancur y C. Vásquez. 1989. Erosión y sedimentación de línea de costa entre Turbo y Necoclí, Golfo de Urabá. Proyecto de Grado de Geología, EAFIT, 345 P.
- Bernal, G., Montoya, L. J., Garizábal, C. y Toro B., M. 2005. La complejidad de la dimensión en la problemática del Golfo de Urabá, Colombia. Gestión y Ambiente, Vol. 8. I: pp. 123-135.
- Carriquiry J.D. y Sánchez, A. 1999. Sedimentation in the Colorado River delta and Upper Gulf of California after nearly a century of discharge loss. *Marine Geology*, 158: pp. 125-145.
- Carriquiry, J. D., Sánchez, A. y Camacho-Ibar V. F. 2001. Sedimentation in the northern of California after cessation of the Colorado River discharge. *Sedimentary Geology*, 144: pp. 37-62.
- CCO. <http://www.cco.gov.co/ciencias%20naturales/unidad%20nueve.pdf>. Unidad nueve. Características generales de los espacios oceánicos y zonas costeras de Colombia. 28 de julio de 2007.
- Cheng, P., Gao, S. y Bokuniewicz, H. 2004. Net sediment transport patterns over the Bohai Strait based on grain size trend analysis. *Estuarine coastal and Shelf Science*, 60: pp. 203-212
- Chevillot, O., Molina, A., Giraldo, L. y Molina, C. 1993. Estudio geológico e hidrológico del Golfo de Urabá. *Boletín Científico CIOH*, 14: pp. 79-89
- CORPOURABÁ Universidad Nacional. 1998. Evaluación de zonas de erosión críticas en el litoral caribe antioqueño. Informe final. Posgrado Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Medellín, 199 P.
- Correa, I. 1992. Erosión y sedimentación litoral de la línea de costa entre turbo y Necoclí, Golfo de Urabá, Departamento de Antioquia. EAFIT, Medellín, 345 P.
- Correa, I. D. y Vernet, G. 2004. Introducción al problema de la erosión litoral en Urabá (sector Arboletes-Turbo) Costa Caribe Colombiana, *Boletín Investigaciones Marinas y Costeras*, 33. pp. 7-28.
- Franco C, E. y Gómez V., J. F. 1996. Evolución de la línea de costa del litoral Antioqueño. Aspectos geomorfológicos. Sector: Río Necoclí Turbo. Trabajo de Grado. Geología, Medellín, Facultad de Minas, 107 P.

- Gao, S. y Collins, M.B. 1992. Net sediments transport patterns from grain size trends, based upon definition of transport vectors . *Sedimentary Geology*, 81: 47-60.
- Gao, S. y Collins, M.B. 1994. Analysis of grain size trends, for defining sediment transport pathways in marine environments. *Journal of Coastal Research*, 10: pp. 70-78.
- INVEMAR. 2003. Diagnóstico, zonificación y definición de la estructura administrativa de manejo de la unidad ambiental costera del Darién, Caribe Colombiano. Fase I. Caracterización y Diagnóstico. Informe técnico preliminar. Colombia. 698 P.
- LeRoux, J.P. 1994a. An alternative approach to the identification of the end sediment transport paths based on grain size trends. *Sedimentary Geology*, Vol. 94: pp. 97-107.
- LeRoux, J.P. 1994b. A spreadsheet template for determining sediment transport vectors from grain size parameters. *Comput. Geosci.* Vol.20: pp. 433-440.
- LeRoux, J. P, O'Brien, R.D., Rios, F. y Cisternas, M. 2002. Analysis of sediment transport paths using grain-size parameters. *Computers & Geosciences*. Vol. 28: pp. 717-721
- LeRoux, J. P. y Rojas E.M. 2007. Sediment transport patterns determined from grain size parameters: Overview and state of the art. *Sedimentary Geology*, Vol. 202: pp. 473-488
- Lonin, S. y Vásquez A., J. G. 2005. Hidrodinámica y distribución de coniformes en el Golfo de Urabá. *Boletín Científico CIOH*. No. 23: pp. 76-89
- McLaren, P. 1981. An interpretation of trends in grain size measurements. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 51, No. 2: 611-624
- McLaren, P. y Bowles, D. 1985. The effects of sediment transport on grain-size distributions. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 55, No. 4: pp. 457-470
- Molina M., A., Molina M., C. y Chevillot, P. 1992. Percepción remota aplicada para determinar la circulación de las aguas superficiales del Golfo de Urabá y las variaciones de su línea de costa. *Boletín Científico CIOH*. No 11: pp. 43-58
- Montoya, L. J. y Toro B., F. M. 2006. Calibración de un modelo hidrodinámico para el estudio de los patrones de circulación en el golfo de urabá, Colombia. *Avances en Recursos Hídricos*, No. 13: pp. 37-54.
- Pérez, R. y Chee, A. 1984. Transporte de sedimentos en la Bahía de Todos Santos, B. C. *Ciencias Marinas*, 10 (3): pp. 31-52.
- Restrepo, J.D. y Kjerfve B. 2000. Water discharge and sediment load from the Western slopes of the Colombian Andes with focus on Río San Juan. *Journal of Geology*, 108: pp. 17-33.
- Tucker M. 1988. *Techniques in Sedimentology*. Blackwell Scientific Publications. Oxford, 394 P.
- Velázquez, C. F. y Rave A., J. 1996. Dinámica costera y geomorfológico en el Golfo de Urabá antioqueño. Sector Boca Tarena Espiga de Turbo. Trabajo de Grado. Geología, Medellín, Facultad de Minas, 136 P.