

Distribución de parámetros texturales de los sedimentos superficiales en la Bahía de Chetumal: Implicaciones en la inferencia de transporte

**Alberto Sánchez^{1,*}, Teresa Álvarez-Legorreta³, Ricardo Sáenz-Morales³,
Ma. Concepción Ortiz-Hernández³, B. Estela López-Ortiz⁴, Sergio Aguiñiga^{1,2}**

¹ Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, Instituto Politécnico Nacional,
Apartado Postal # 592, La Paz, Baja California Sur, México.

² Becario de la Comisión de Operación y Fomento a las Actividades Académicas (COFAA),
Instituto Politécnico Nacional.

³ El Colegio de la Frontera Sur, Unidad Chetumal, Av. del Centenario Km. 5.5,
77900 Chetumal, Quintana Roo, México.

⁴ Facultad de Biología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Av. Fco. J. Múgica S/N.,
58030, Morelia, Michoacán, México.

* alsanchezg@ipn.mx; alsanchezg13@gmail.com

RESUMEN

El análisis de las tendencias espaciales (tamaño de grano, clasificación y asimetría) fue determinado de 43 estaciones con la finalidad de identificar la trayectoria del transporte de sedimentos en la Bahía de Chetumal, Quintana Roo, México. El análisis estadístico multivariado de componentes principales y el análisis de tendencia del tamaño de grano aplicado a los parámetros texturales del sedimento establecieron que el sedimento mejor clasificado está asociado a las estaciones con un tamaño de grano medio menor y viceversa. Los vectores de transporte sugieren un transporte neto de sedimento en dirección S-SE y S-SO (para el periodo de muestreo), lo que concuerda con la dirección de las corrientes superficiales y de fondo en la Bahía de Chetumal. El depósito de material fino y bien clasificado en la parte central de la bahía tiene buena correlación con el contenido de contaminantes antropogénicos encontrados en otros estudios.

Palabras clave: transporte de sedimento, tendencias espaciales, contaminantes, Bahía de Chetumal, México.

ABSTRACT

The grain-size trend analysis (grain size, sorting and asymmetry) was determined from 43 stations to identify the path of sediment transport in the Chetumal Bay, Quintana Roo. The analysis of principal components and grain size trend analysis were applied to sediment textural parameters. It was established that better sorted sedimentary material is associated with stations with fine grain-size and vice versa. Vectors transport suggests a net transport of sediment in the direction S-SE and S-SW (for the sampling period), which is consistent with the direction of the surface and deep currents in the Chetumal Bay. The preferential deposition of fine and well-sorted material in the central part of the bay has excellent correlation with the contents of anthropogenic pollutants found in other studies.

Key words: sediment transport, grain size trend analysis, polluting agents, Bay of Chetumal, Mexico.

INTRODUCCIÓN

El análisis y la descripción de los procesos en ambientes sedimentarios han sido ampliamente definidos sobre la base de la distribución de la frecuencia del tamaño de grano (*e.g.*, Friedman, 1961). Mientras que el cambio de los parámetros texturales del sedimento en la escala espacial se ha usado para evaluar el transporte de sedimento neto (Mc Laren y Bowles, 1985). Gao y Collins (1991, 1992) y LeRoux (1994a, 1994b) definen esta evaluación como el Análisis de Tendencia del Tamaño de Grano (ATTG), el cual está basado en un procedimiento general de cuatro etapas: 1) el análisis de los datos texturales; 2) la combinación de la tendencia del tamaño de grano; 3) los vectores de transporte; y 4) la prueba estadística de significancia de los vectores de transporte. El ATTG ha permitido demostrar que es una excelente aproximación para establecer el transporte de sedimento en una gran variedad de ambientes como ríos, playas, puertos, estuarios, plataforma continental y cañones submarinos (Gao y Collins, 1992; Mc Laren *et al.*, 1993; Gao *et al.*, 1994; Asselman, 1999; Carriquiry y Sánchez, 1999; Van Wesenbeeck y Lanckneus, 2000; Carriquiry *et al.*, 2001; Cheng *et al.*, 2004; Sánchez *et al.*, en prensa).

La Bahía de Chetumal se encuentra localizada en el Caribe mexicano, donde desemboca el Río Hondo, el cual define la frontera entre México y Belice y es una de las pocas escorrentías superficiales de la Península de Yucatán (Figura 1). Los desechos orgánicos e inorgánicos de los extensos cultivos de caña aledaños a las planicies del río son vertidos directamente al Río Hondo (Ortiz-Hernández y Sáenz-Morales, 1999), y posteriormente son transportados y depositados dentro de la bahía. Aunque se han realizado diversos estudios en la Bahía de Chetumal referentes a la sedimentología (De Jesús-Navarrete *et al.*, 2000), la distribución de metales (García-Ríos y Gold-Bouchot, 2003; Díaz-López *et al.*, 2006; Buenfil-Rojas y Flores-Cuevas, 2007) y de hidrocarburos aromáticos (Álvarez-Legorreta y Sáenz-Morales, 2005), no se ha establecido la dirección del transporte y los sitios de depósito de los compuestos químicos adsorbidos y asociados a las partículas del sedimento. Álvarez-Legorreta y Sáenz-Morales (2005) reportaron una buena relación entre los sedimentos finos y la concentración de los hidrocarburos aromáticos para las partes más profundas de la bahía.

La movilidad de los sedimentos y sus contaminantes absorbidos es un factor que complica la evaluación de riesgo ecológico, la investigación en la recuperación y la rehabilitación propiamente dicha, o en última instancia en los procesos de litigio. Por lo cual, la decisión racional deberá de tomar en cuenta la probable estabilidad de los sedimentos contaminados, así como sus fuentes, transporte y destino final (*e.g.*, Apitz *et al.*, 2005). Un método que podría facilitar esta información es el ATTG, técnica que sirve para sugerir los destinos finales de depósito del material sedimentario, al determinar las trayectorias netas de transporte, junto con su comportamiento dinámico (acumulación, erosión y

equilibrio dinámico; Mc Laren y Beveridge, 2006). Debido a que muchas de las partículas que forman parte de los agentes contaminantes son absorbidas por los sedimentos, la información obtenida del ATTG puede ser valiosa para predecir el transporte y destino final de los sedimentos contaminados.

Las áreas naturales protegidas de México son diversas en cuanto a flora, fauna, clima, entre otras, y en los últimos años, su número se ha incrementado considerablemente como resultado de la creciente preocupación por mantener estas zonas lo más prístinas posible. Sin embargo, los ambientes transicionales costeros (incluidas las áreas naturales protegidas) han sido modificados e impactados por el inherente crecimiento de la población (*e.g.*, Carriquiry y Sánchez, 1999). En particular, la Bahía de Chetumal fue declarada Área Natural Protegida en 1996 con la categoría de Zona sujeta a Conservación Ecológica “Santuario del Manatí” por el Gobierno del Estado de Quintana Roo, a través de la Secretaría de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente. Ésto debido a que alberga a la población más importante de manatíes en la Península de Yucatán, especie que se encuentra en peligro de extinción, motivo por el cual es fundamental la conservación de este hábitat, sitio de reproducción y alimentación de manatíes, además de peces de importancia económica (Morales-Vela y Olivera-Gómez, 1994; Morales-Vela *et al.*, 2000).

En el presente trabajo de investigación se propone, por primera vez, inferir el transporte y la dispersión de los sedimentos en la Bahía de Chetumal. La interpretación de los datos granulométricos y la integración de los escasos registros sobre dirección y velocidad de corrientes que existen en esta área pueden sentar un marco de referencia para desarrollar futuras investigaciones, en particular, la implementación de esquemas de monitoreo ambiental en la Bahía de Chetumal, para la comprensión de los procesos biogeoquímicos y sedimentarios que determinan el funcionamiento del ecosistema.

ÁREA DE ESTUDIO

La Bahía de Chetumal tiene forma semi-elongada con ~110 km de largo y ~20 km de ancho, con un máximo de 49 km en su parte media y un mínimo de 5 km en la cabeza (Figura 1). La batimetría de la bahía es relativamente somera (4 m en promedio), con un canal central que presenta una profundidad promedio de 6 a 8 m con dirección SO. También se localizan depresiones angostas y profundas conocidas localmente como “pozas”. En la bahía desemboca el Río Hondo y algunos arroyos menores que le dan una característica estuarina con salinidades (de 10 a 18 ups) que decrecen desde la boca hacia la cabeza de la bahía. En el verano, la precipitación pluvial es máxima acentuando las condiciones estuarinas de la bahía y, en invierno, se registra solo el 10% de la precipitación que ocurre en verano (Carrillo *et al.*, en prensa).

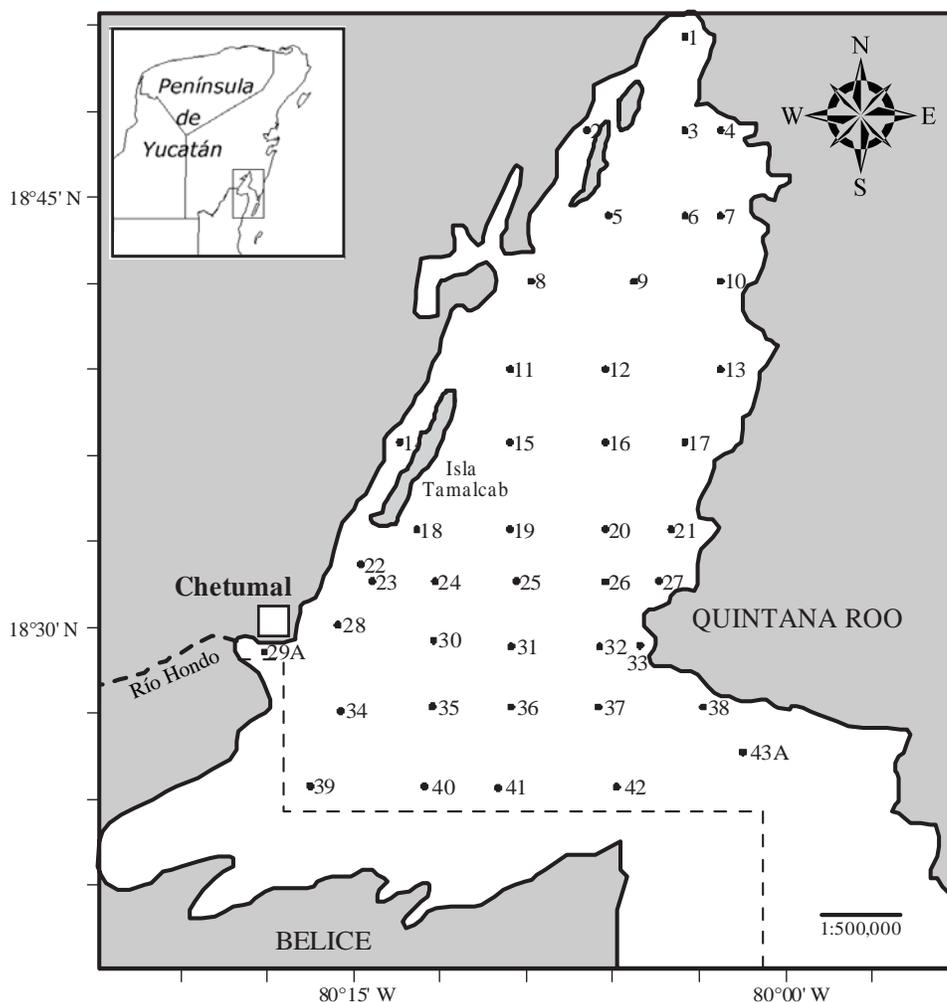


Figura 1. Localización de las estaciones de muestreo en la Bahía de Chetumal, Quintana Roo, México.

MÉTODOS

Muestreo y análisis de sedimentos superficiales

En septiembre de 1998 se colectaron mediante buceo autónomo los primeros 2 cm de sedimentos superficiales conformando 43 muestras de una red espacial. El análisis granulométrico fue llevado a cabo por el método de tamizado para la fracción arenosa (Ingram, 1971). Los parámetros texturales (tamaño de grano medio, clasificación y asimetría) fueron calculados usando los datos granulométricos (Folk, 1974).

Método de interpolación de los parámetros texturales

La interpolación por el método de “kriging” se basa en los fundamentos de la teoría geoestadística o de variables georreferenciadas y no parte del supuesto de normalidad de la variable. Esto representa una ventaja en el manejo de todo

tipo de variables que no se distribuyen de manera normal, ni en el espacio, ni en el tiempo. El “kriging” es un método de promedios móviles ponderados usado para interpolar valores de un conjunto de datos obtenidos de una “red” de puntos, con el fin de obtener contornos que definan una zona con valores homogéneos. El “kriging” se establece a partir del variograma, el cual mide el grado de correlación entre valores como una función de la distancia y dirección entre muestras (Oliver y Webster, 1990; Carvajal *et al.*, 1999). Las principales ventajas que muestra el “kriging” sobre otros métodos de interpolación son que (1) suaviza las estimaciones basadas en la varianza muestral que resultan de “ruido aleatorio”, (2) reduce el grado de duplicación de muestras cercanas que estén altamente correlacionadas, (3) permite conocer el comportamiento de la variable en diferentes direcciones, pudiéndose ajustar un modelo para cada dirección, y (4) existen algoritmos computacionales accesibles para el análisis geoestadístico y el proceso de interpolación por el método de kriging. La principal desventaja de este sistema de interpolación es la demanda de

puntos de observación, y la distribución de los mismos, ya que se requiere de un mínimo de 30 para la determinación de un punto en el semivariograma, los cuales preferentemente deben estar equidistantes sobre diferentes direcciones del terreno. Mientras menor sea el número de muestras que se utilicen, o bien, más irregular sea su distribución, menor confiabilidad presentan los resultados (Laslett *et al.*, 1987; Weber y Englund, 1992).

Análisis estadístico multivariado

El análisis de componentes principales (APC) es un método estadístico multivariado que ha sido ampliamente usado en el análisis de datos en investigaciones marinas (*e.g.*, Carriquiry *et al.*, 2001). El ACP es una técnica estadística de reducción de la dimensión (número de variables). Los nuevos componentes principales o factores serán una combinación lineal de las variables originales e independientes entre sí. Un aspecto clave en el ACP es la interpretación de los factores, ya que ésta no viene dada a priori, sino que será deducida tras observar la relación de los factores con las variables iniciales (Davis, 1986).

Los componentes principales o factores se calculan de la forma siguiente: X es una matriz de $n \times m$ datos (n muestras de m variables; donde m variables son el tamaño de grano medio, la clasificación y la asimetría). Si X es transformada y la matriz de covarianza es R , entonces existe una matriz de eigenvectores ortogonales $U = [U_1, U_2, \dots, U_n]$:

$$\begin{aligned} RU &= UA \\ \text{define:} \\ Y &= XU \end{aligned}$$

Entonces $Y = [Y_1, Y_2, \dots, Y_n]$ forma una matriz ortogonal. El $\{y_i\}$ es el componente principal y el $\{u_i\}$ son los eigenvectores de la matriz de covarianza. La proporción relativa de la varianza total de cada eigenvector está dada por la magnitud del eigenvalor.

Modelo de transporte sedimentario

Los modelos de transporte sedimentario que se han propuesto y validado han permitido inferir el transporte de sedimento residual sobre la base de las tendencias texturales del tamaño de grano (*e.g.*, Mc Laren y Bowles, 1985; Gao y Collins, 1992; 1994; LeRoux, 1994a, 1994b). En el caso de este estudio se aplicó el modelo propuesto por LeRoux (1994a; 1994b), el cual está asentado en principios de la geometría analítica y el análisis vectorial de datos texturales. La magnitud y dirección del vector de transporte se calculó al comparar las características texturales de cinco estaciones de muestreo (una central y cuatro satélites). La aplicación del presente método es explicado con detalle en Carriquiry y Sánchez (1999).

RESULTADOS

Análisis de tendencia del tamaño de grano

El tamaño de grano medio fue de 1.6ϕ con tamaño máximo de -0.43ϕ y mínimo de 2.4ϕ . De manera general, la tendencia espacial del tamaño de grano medio es a disminuir hacia la parte central y cabeza de la bahía, así como en la zona cercana a la desembocadura del Río Hondo y a la ciudad de Chetumal, mientras que en el margen costero central de la bahía se tiene un tamaño de grano relativamente más fino que en el margen costero oriental (Figura 2). Los sedimentos mejor clasificados están asociados a las estaciones donde el tamaño de grano medio es menor y viceversa (Figura 3). De hecho, el coeficiente de determinación entre ambas variables (tamaño de grano medio vs. clasificación) es $R^2 = 0.52$ ($F_{1,41,\alpha=0.05} = 43.7$; $p = 0.0000$). La asimetría (Figura 4) de los sedimentos superficiales es negativa (hacia sedimentos gruesos) en casi toda la bahía, excepto en el margen costero, al sur de la Isla Tamalcab (Figura 4), donde la asimetría es ligeramente positiva (hacia sedimentos finos). Los sedimentos superficiales están dominados por arenas con un 87% en promedio (mínimo de 76% y máximo de 96%) y en una menor proporción de lodos con 13% en promedio (mínimo de 4% y máximo de 24%).

Análisis de componentes principales

El análisis de componentes principales aplicado a los datos texturales del sedimento (tamaño de grano medio, clasificación y asimetría; Tabla 1) es mostrado en la matriz de eigenvectores, en la cual cada columna representa el "peso" de cada componente principal correspondiente:

$$\begin{bmatrix} -0.9549 & -0.0400 & -0.2939 \\ 0.7962 & 0.5634 & -0.2200 \\ 0.6765 & -0.7197 & -0.1659 \end{bmatrix}$$

y los correspondientes eigenvalores son:

$$\begin{bmatrix} 2.0000 & 0.8370 & 0.1591 \end{bmatrix}$$

El primer eigenvalor, el tamaño de grano medio (2.0000), explica el 67% de la varianza y el segundo eigenvalor, la clasificación (0.8370), explica el 28% de la varianza.

Estos dos eigenvalores explican el 95% de la variabilidad de los parámetros texturales. Solo el 5% de la variabilidad se explica por la asimetría. La correlación es negativa entre el tamaño de grano medio y la clasificación. De esta forma, los sedimentos finos están asociados a material clástico bien clasificado y los sedimentos de grano grueso están más pobremente clasificados, mientras que el coeficiente de asimetría muestra una baja correlación con estos parámetros texturales.

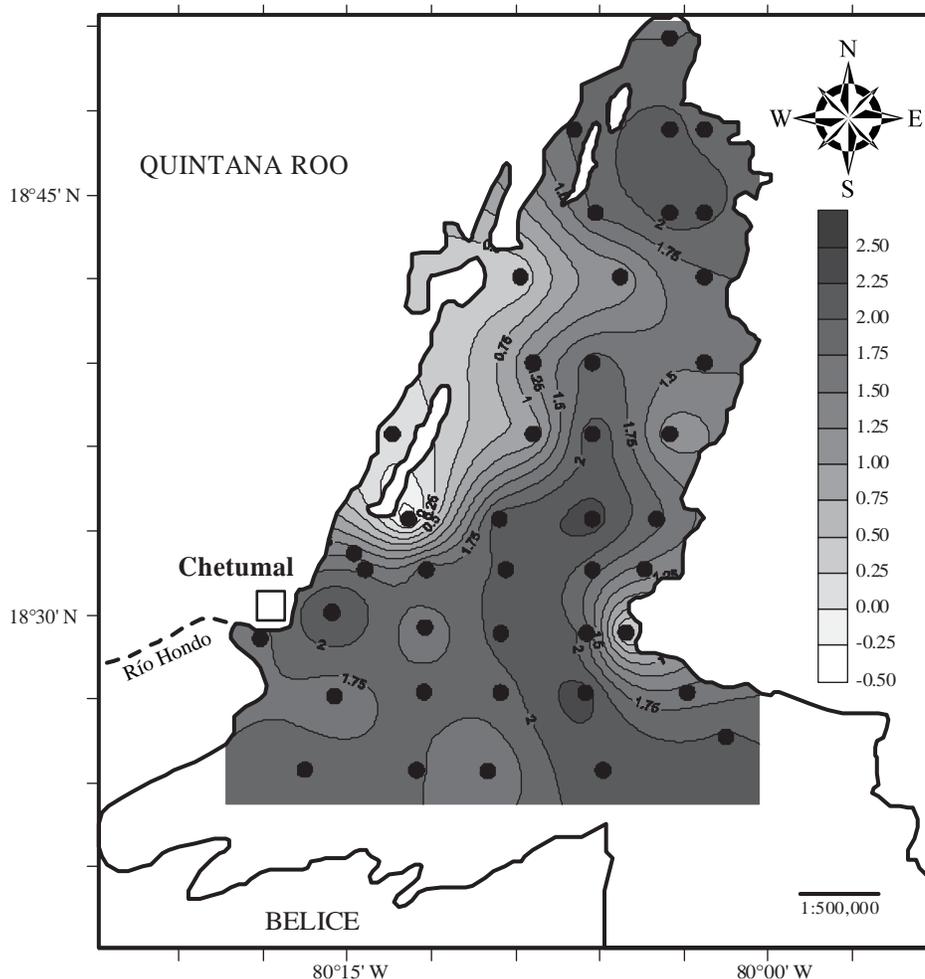


Figura 2. Distribución espacial del tamaño de grano medio (en unidades phi) en la Bahía de Chetumal, Quintana Roo, México.

Transporte de sedimento neto

Los vectores residuales de transporte sedimentario se muestran en la Figura 5. En la región norte de la bahía, los vectores de transporte denotan dirección SO, mientras que en la región central del área de estudio los vectores de transporte tienen dirección hacia el S-SE, excepto en el margen costero central-oriental, donde los vectores de transporte tienen dirección SO (Figura 5). En la región sur de la bahía, los vectores de transporte residual mostraron una dirección preferente hacia el S-SE. Las estaciones 28, 29A, y 34 cercanas a la desembocadura del Río Hondo tienen un transporte de sedimento neto en dirección E-NE.

De manera general, el transporte del material sedimentario superficial de la Bahía de Chetumal durante el muestreo fue de la cabeza hacia la boca de la bahía (en dirección SO a SE). Los vectores de transporte con menor magnitud se ubican en la región central de la bahía (Figura 5) y ello coincide con aquellas áreas de la bahía donde el tamaño de grano promedio tiende hacia tamaños más finos.

DISCUSIÓN

El análisis vectorial de los parámetros texturales es una propiedad cualitativa que indica la magnitud relativa y la dirección dominante de cada vector, en el cual dos estaciones vecinas están intercambiando material, sin proporcionar información cuantitativa de la cantidad de material intercambiado. La distribución de frecuencia de la magnitud de los vectores obtenida en este estudio (Tabla 2) sugiere, hasta cierto punto, una amplia variabilidad en el intercambio de material entre las estaciones vecinas (e.g., Carriquiry y Sánchez, 1999). Otros estudios han mostrado que el 80% de los vectores estuvieron caracterizados por magnitudes vectoriales entre 0.4 y 0.5 en el Mar del Norte (Gao y Collins, 1994), y 0.9–1.0 para el norte del Golfo de California (Carriquiry *et al.*, 2001). Esto puede indicar que las condiciones hidrodinámicas en nuestra área de estudio no son homogéneas y, por lo tanto, reflejan gradientes ambientales sedimentológicos (e.g., Carriquiry y Sánchez, 1999).

El análisis de las tendencias texturales para establecer el

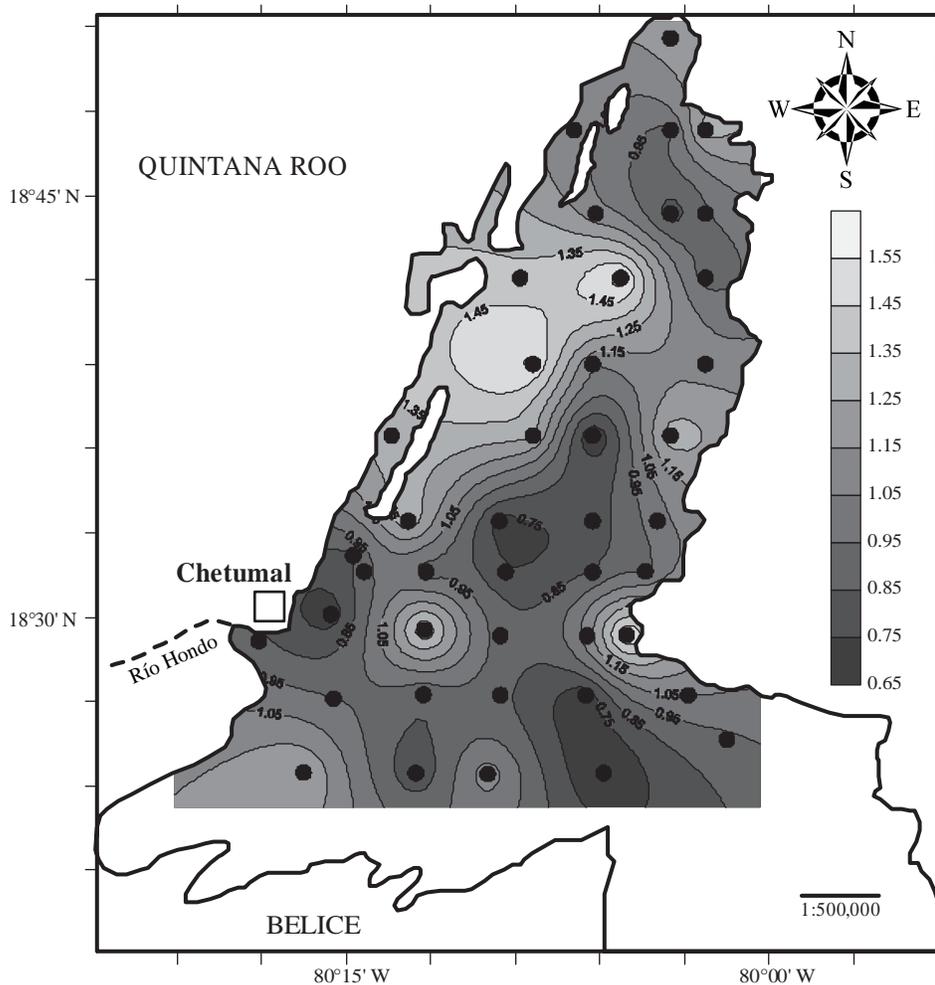


Figura 3. Distribución espacial de la clasificación (en unidades phi) en la Bahía de Chetumal, Quintana Roo, México.

transporte neto de sedimentos ha sido utilizado ampliamente en diversos ambientes costeros y oceánicos. En estos estudios, el transporte neto y la dispersión del material sedimentario fueron validados al comparar los vectores residuales de transporte definidos a partir del análisis estadístico de las tendencias texturales del sedimento con las corrientes oceánicas medidas o modeladas (*e.g.*, Carriquiry y Sánchez, 1999; Van Wesenbeck y Lanckneus, 2000; Carriquiry *et al.*, 2001; Liu *et al.*, 2002; Jia *et al.*, 2003; Duman *et al.*, 2004; Duman *et al.*, 2006; Friend *et al.*, 2006; Lucio *et al.*, 2006; Duc *et al.*, 2007). De esta forma, el ATTG es una excelente herramienta para inferir el movimiento de las partículas de sedimento en sitios donde los estudios de corrientes son limitados. La aplicación del modelo de LeRoux permitió inferir un transporte neto de sedimento superficial en dirección S-SO y S-SE con una convergencia hacia la parte central de la Bahía de Chetumal consistente con los contornos del tamaño de grano medio y la clasificación.

La limitada información hidrográfica disponible para la Bahía de Chetumal proviene de un estudio realizado por

Morales-Vela *et al.* (1996), quienes midieron a lo largo de un año las corrientes superficiales y de fondo. La velocidad media de la corriente superficial fue 12 cm s^{-1} con una dirección $183 \pm 88^\circ$. En el fondo, las corrientes fueron ligeramente menores con 9 cm s^{-1} y una dirección dominante de $182 \pm 81^\circ$. Aun cuando la dirección de las corrientes superficiales y de fondo mostró una dispersión relativamente alta, los vectores de las corrientes superficiales tuvieron direcciones entre 137° y 240° , y las corrientes de fondo entre 136° y 236° , ambos en sentido S-SO y S-SE. El transporte neto de sedimento superficial con dirección S-SO y S-SE es coherente con la dirección de las corrientes superficiales y de fondo establecidas para la Bahía de Chetumal (Morales-Vela *et al.*, 1996).

La distribución de sedimentos con un tamaño de grano de arenas finas a gruesas sugiere que las condiciones hidrodinámicas deben ser lo suficientemente intensas para limitar el depósito y el contenido de limos y arcillas hacia la región central y más profunda de la bahía (De Jesús-Navarrete *et al.*, 2000). Carrillo *et al.* (en prensa) indican que la magnitud de las corrientes superficiales y de fondo fueron relativa-

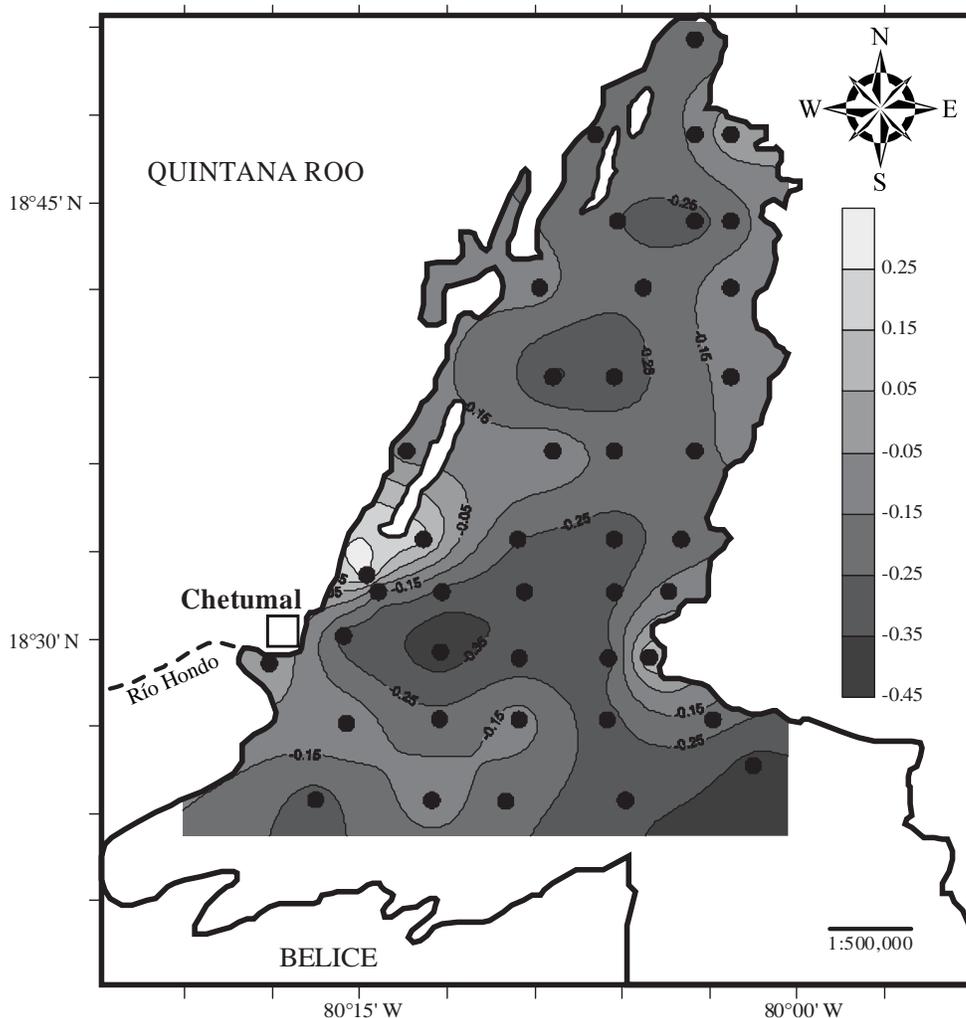


Figura 4. Distribución espacial de la asimetría (en unidades phi) en la Bahía de Chetumal, Quintana Roo, México.

mente bajas, lo que concuerda con Lankford (1977) quien ubicó a la Bahía de Chetumal como un ambiente costero de agua de baja energía. No obstante, la velocidad de la corriente dentro de la bahía es capaz de resuspender (Keller y Shepard, 1978) y transportar (Komar, 1977) materiales de 3ϕ a 5ϕ , además de identificar una dirección neta de flujo hacia el S-SO y S-SE (Morales-Vela *et al.*, 1996), la cual coincide con la dirección de transporte de sedimento obtenida en este trabajo.

De manera general, las tendencias espaciales de los parámetros texturales del sedimento corroboran que el material clástico de grano fino y bien clasificado se distribuye a lo largo de la parte central de la bahía y concuerda con la acumulación preferencial de materia orgánica, metales e hidrocarburos (Ortiz-Hernández y Sáenz-Morales, 1999; García-Ríos y Gold-Bouchot, 2003; Álvarez-Legorreta y Sáenz-Morales, 2005). Sobre la hipótesis de que los contaminantes preferencialmente asociados a las partículas finas del sedimento (*i.e.*, limos y arcillas) seguirían la trayectoria del transporte del sedimento, la información del análisis

de tendencias texturales del sedimento permitiría definir la relación entre la descarga de contaminantes y sus fuentes, así como predecir el transporte y destino final de estos sedimentos contaminados en ambientes marinos.

La Bahía de Chetumal, como todo cuerpo costero sujeto a desarrollo por el incremento de las actividades antropogénicas, indudablemente presenta zonas donde persisten problemas de contaminación (Ortiz-Hernández y Sáenz-Morales, 1997; 1999, Llañez-Baeza y González, 2002; García-Ríos y Gold-Bouchot, 2003; Buenfil-Rojas y Flores-Cuevas, 2007; Álvarez-Legorreta y Sáenz-Morales, 2005; Díaz-López *et al.*, 2006). De esta forma, el presente estudio y los pocos estudios geoquímicos de metales e hidrocarburos pueden ser la base para proponer nuevos estudios y/o programas de monitoreo de la calidad del agua y del sedimento, principalmente en aquellas áreas donde existen problemas de contaminación o estén sujetas a un eventual impacto ambiental, sobre todo los sitios relacionadas con el desove y crianza de larvas de peces, así como el hábitat y los sitios de alimentación del manatí.

Tabla 1. Parámetros texturales (en unidades phi) de los sedimentos superficiales en la Bahía de Chetumal.

Estación	Tamaño de grano medio	Clasificación	Asimetría
1	1.74	1.19	-0.24
2	1.80	1.10	-0.21
3	2.12	0.93	-0.13
4	1.87	1.30	0.03
5	1.80	1.09	-0.25
6	2.17	0.80	-0.29
7	2.05	0.94	-0.21
8	0.29	1.38	-0.10
9	1.05	1.60	-0.22
10	1.71	0.91	-0.06
11	1.28	1.56	-0.37
12	1.88	1.05	-0.33
13	1.55	1.10	-0.12
14	0.10	1.30	-0.10
15	0.78	1.27	-0.06
16	2.18	0.65	-0.17
17	1.07	1.31	-0.16
18	-0.43	1.33	0.18
19	2.18	0.71	-0.25
20	2.39	0.81	-0.31
21	1.83	1.01	-0.21
22	1.43	0.83	0.29
23	1.70	0.92	-0.18
24	1.94	0.90	-0.29
25	2.04	0.76	-0.34
26	1.84	0.85	-0.28
27	1.42	0.93	-0.11
28	2.34	0.69	-0.29
29A	1.68	0.87	0.03
30	1.52	1.45	-0.41
31	2.10	0.90	-0.30
32	1.91	1.09	-0.31
33	0.11	1.56	0.15
34	1.58	0.95	-0.06
35	1.87	0.86	-0.22
36	1.86	0.87	-0.09
37	2.38	0.68	-0.29
38	1.60	1.05	-0.20
39	1.91	1.26	-0.30
40	1.79	0.77	-0.10
41	1.46	1.11	-0.21
42	2.23	0.65	-0.33
43A	2.04	0.93	-0.39

CONCLUSIONES

La distribución del tamaño de grano medio del sedimento superficial muestra que las partículas son más finas, mejor clasificadas y con una asimetría hacia partículas gruesas en la región central y la cabeza de la bahía. El análisis de componentes principales indicó que la correlación entre el tamaño de grano medio y la clasificación fue significativa y explicó el 95% de la variabilidad de la tendencia textural del tamaño de grano. El restante 5% corresponde a la asimetría.

El transporte neto de sedimento, representado por los vectores residuales de transporte y obtenidos mediante

Tabla 2. Frecuencia relativa de la magnitud de los vectores de transporte obtenidos con el método de LeRouox (1994b).

Magnitud	Frecuencia %
0.11 a 0.20	3
0.21 a 0.30	3
0.31 a 0.40	9
0.41 a 0.50	20
0.51 a 0.60	17
0.61 a 0.70	26
0.71 a 0.80	6
0.81 a 0.90	9
0.91 a 1.00	9

el análisis de tendencias superficiales, sugiere que el material clástico y las partículas (inorgánicas y orgánicas) de origen antropogénico y/o naturales tienen una dirección preferencial de transporte S-SO y S-SE, excepto cerca de la desembocadura del Río Hondo donde el transporte neto de sedimento es preferencialmente en dirección E-NE. Esto indica que puede existir una mayor influencia en la dispersión de sedimentos y partículas contaminantes que son vertidos directamente al río por los drenes de los campos agrícolas y los desechos urbanos.

El transporte neto de sedimento inferido con las condiciones del presente muestreo, es en dirección S-SE y S-SO y concuerda con la dirección de las corrientes superficiales y de fondo en la Bahía de Chetumal obtenida por Morales-Vela *et al.* (1996). La convergencia de los vectores de transporte en la parte central de la bahía es coherente con estudios previos realizados en los cuales se describió la distribución espacial de metales e hidrocarburos. De esta forma, el análisis de tendencias texturales es una técnica que puede ser útil para predecir el transporte y destino final de los sedimentos contaminados.

El resultado de este trabajo de investigación y los estudios previos de la geoquímica sedimentaria pueden ser la base para sugerir nuevas investigaciones y/o monitoreo de la calidad del agua y del sedimento, con especial atención en aquellas áreas donde existen problemas de contaminación o están sujetas a un eventual impacto ambiental.

REFERENCIAS

- Álvarez-Legorreta, T, Sáenz-Morales, R., 2005, Hidrocarburos aromáticos policíclicos en sedimentos de la Bahía de Chetumal, *en* Botello, A.V., Rendón-von Osten, J., Gold-Bouchot, G., Agraz-Hernández, C. (eds.), Golfo de México, Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico y Tendencias: Universidad Autónoma de Campeche, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto Nacional de Ecología, 2da Edición, 299-310.
- Apitz, S.E., Davis, J.W., Finkelstein, K., Hohreiter, D.W., Hoke, R., Jensen, R.H., Jersak, J., Kirtay, V.J., Mack, E.E., Magar, V.S., Moore, D., Reible, D., Stahl, R.G., 2005, Assessing and managing contaminated sediments: Part I, developing an effective investigation and risk evaluation strategy: Integral Environmental Assessment

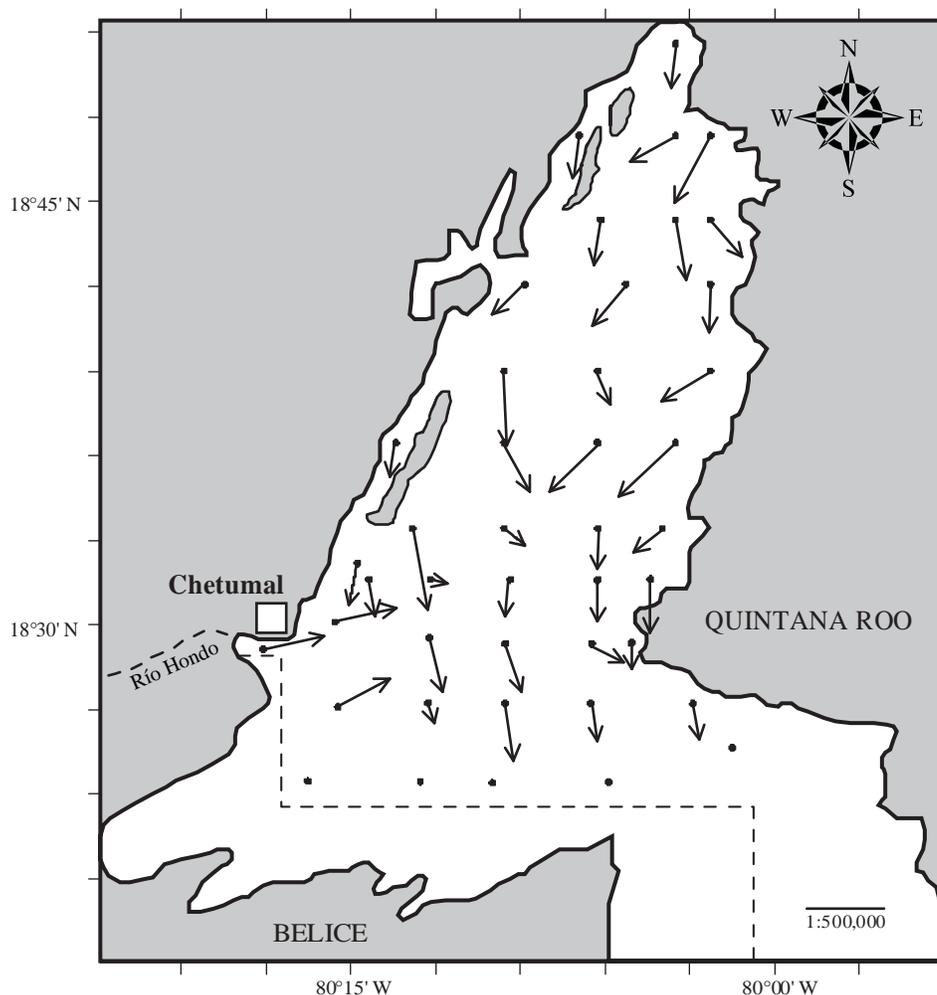


Figura 5. Transporte de sedimentos en la Bahía de Chetumal inferido de los vectores residuales de transporte.

Management, 1, 2–8.

- Asselman, N.E.M., 1999, Grain-size trends used to assess the effective discharge for floodplain sedimentation, river Waal, The Netherlands: *Journal of Sedimentary Research*, 69, 51–61.
- Buenfil-Rojas, M., Flores-Cuevas, N., 2007, Determinación de metales pesados (As, Cd, Hg y Pb) presentes en el Río Hondo, Quintana Roo, en VI Congreso Internacional y XII Nacional de Ciencias Ambientales, Memorias en extenso, Ciudad de Chihuahua, Chih., México, 6-8 de Junio de 2007: Universidad Autónoma de Chihuahua, Academia Nacional de Ciencias Ambientales, 435-439.
- Carvajal, F., Aguilar, F.J., Agüera, F., 1999, Interpolación espacial en entorno CAD. Aplicación del método de krigeado, en *Actas del XI Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica*, Logroño, Pamplona (España), 3-4 de junio: Universidad Pública de Navarra, Universidad de La Rioja, 1, 478-491.
- Carrillo, L., Palacios-Hernández, E., Ramírez, A.M., Morales-Vela, B., en prensa, Características hidrometeorológicas y batimétricas, en Espinoza-Ávalos, J., Islebe, G., Hernández-Arana H. (eds.), *Bahía Chetumal/Corozal: diversidad biológica y análisis ambiental en la frontera México-Belice: El Colegio de la Frontera Sur*, Chetumal, Quintana Roo, México.
- Carriquiry J.D., Sánchez A., 1999, Sedimentation in the Colorado River delta and Upper Gulf of California after nearly a century of discharge loss: *Marine Geology*, 158, 125-145.
- Carriquiry J.D., Sánchez A., Camacho-Ibar VF., 2001, Sedimentation in the northern Gulf of California after the elimination of Colorado River discharge: *Sedimentary Geology*, 144, 37-62.
- Cheng, P., Gao, S., Bokuniewicz, H., 2004, Net sediment transport patterns over the Bohai Strait based on grain size trend analysis: *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 60, 203-212.
- Davis, J., 1986, *Statistics and Data Analysis in Geology*: New York, Wiley, 647 pp.
- De Jesús-Navarrete, A., Oliva Rivera, J.J., Valencia Beltrán, V., Quintero López, N., 2000, Distribución de sedimentos en la Bahía de Chetumal, Quintana Roo, México: *Hidrobiológica*, 10, 61-67.
- Díaz-López, C., Carrión-Jiménez, J.M., González-Bucio, J.L., 2006, Estudio de la contaminación por Hg, Pb, Cd y Zn en la Bahía de Chetumal, Quintana Roo, México: *Revista Sociedad Química del Perú*, 72, 19-31.
- Duc, D.M., Nhuan, M.T., Ngoi, C.V., Nghi, T., Tien, D.M., van Weering, Tj.C.E., van den Bergh, G.D., 2007, Sediment distribution and transport at the nearshore zone of the Red River delta, northern Vietnam: *Journal Asian Earth Science*, 29, 558–565.
- Duman, M., Avci, M., Duman, S., Demirkurt, E., Duzbastilar, M.K., 2004, Surficial sediment distribution and net sediment transport pattern in Izmir Bay, western Turkey: *Continental Shelf Research*, 24, 965–981.
- Duman, M., Duman, S., Lyons, T.W., Avci, M., Izdar, E., Demirkurt, E., 2006, Geochemistry and sedimentology of shelf and upper slope sediments of the south-central Black Sea: *Marine Geology*, 227, 51–65.

- Folk, R.L., 1974, Petrology of Sedimentary Rock: Austin, TX, Hemphill Publishing Company, 182 p.
- Friedman, G.M., 1961, Distinction between dune, beach, and river sands from their textural characteristics: *Journal of Sedimentary Petrology*, 31, 514–529.
- Friend, P.L., Velegrakis, A.F., Weatherston, P.D., Collins, M.B., 2006, Sediment transport pathways in a dredged ria system, southwest England: *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 67, 491–502.
- Gao, S., Collins, M.B., 1991, A critique of the Mc Laren method for defining sediment transport paths: discussion: *Journal of Sedimentary Petrology*, 61, 143–146.
- Gao, S., 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., Collins, M.B., 1994, Analysis of grain size trends, for defining sediment transport pathways in marine environments: *Journal of Coastal Research*, 10, 70–78.
- García-Ríos, V.A., Gold-Bouchot, G., 2003, Trace metals in sediments from Bahía de Chetumal, Mexico: *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 70, 1228–1234.
- Ingram, R.L., 1971, Sieve analysis, *en* Carver, R.E. (ed.), *Procedures in Sedimentary Petrology*: New York, Wiley Interscience, 49–68.
- Jia, J.-J., Gao, S., Xue, Y.-C., 2003, Sediment dynamic processes of the Yuehu inlet system, Shandong Peninsula, China: *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 57, 783–801.
- Komar, D.P., 1977, Selective longshore transport rates of different grain-size fractions within a beach: *Journal of Sedimentary Petrology*, 47, 1444–1453.
- Lankford, R.R., 1977, Coastal lagoons of Mexico: Their origin and classification, *en* Wiley, M. (ed.), *Estuarine Processes*: New York, Academic, 182–215.
- Laslett, G.M., McBratney, A.B., Pahl, P.J., Hutchinson, M.F., 1987, Comparison of several spatial prediction methods for soil pH: *Journal of Soil Science*, 38, 325–341.
- LeRoux, J.P., 1994a, An alternative approach to the identification of the end sediment transport paths based on grain size trends: *Sedimentary Geology*, 94, 97–107.
- LeRoux, J.P., 1994b, A spreadsheet template for determining sediment transport vectors from grain size parameters: *Computer y Geoscience*, 20, 433–440.
- Liu, J.T., Liu, K., Huang, J.C., 2002, The effect of a submarine canyon on the river sediment dispersal and inner shelf sediment movement in southern Taiwan: *Marine Geology*, 181, 357–386.
- Llañez-Baeza, C., González, N.E., 2002, Evaluación de los mejillones *Mytilopsis sallei* (Reclúz) y *Brachidontes exustus* (Linné) como bioindicadores de materia orgánica en la Bahía de Chetumal, México: *Universidad y Ciencia*, 18, 29–41.
- Lucio, P.S., Bodevan, E.C., Dupont, H.S., Ribeiro, L.V., 2006, Directional kriging: a proposal to determine sediment transport: *Journal of Coastal Research*, 22, 1340–1348.
- Mc Laren, P., Bowles, D., 1985, The effects of sediment transport on grain size distributions: *Journal of Sedimentary Petrology*, 55, 457–470.
- Mc Laren, P., Cretney, W.J., Powys, R., 1993, Sediment pathways in a British Columbia fjord and their relationship with particle associated contaminants: *Journal of Coastal Research*, 9, 1026–1043.
- Mc Laren, P., Beveridge, R.P., 2006, Sediment trend analysis of the Hylebos waterway: Implications for liability allocations: *Integrated Environmental Assessment and Management*, 2, 262–272.
- Morales-Vela, B., Olivera-Gómez, L.D., 1994, Distribución espacial y estimación poblacional de los manatíes en la bahía de Chetumal, Quintana Roo, México: *Revista de Investigación Científica de la Universidad Autónoma de Baja California Sur*, núm. especial Sociedad Mexicana de Mastozoología Marina (SOMEMMA), 2, 27–52.
- Morales-Vela, B., Olivera-Gómez, D., Ramírez-García, P., 1996, Conservación de los manatíes en la región del Caribe de México y Belice: El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR)-Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), Informe técnico, 131 p.
- Morales-Vela, B., Olivera-Gómez, L.D., Reynolds, J.E., Rathbun, G.B., 2000, Distribution and habitat use by manatees (*Trichechus manatus manatus*) in Belize and Chetumal Bay, México: *Biological Conservation*, 95, 67–75.
- Oliver, M.A., Webster, R., 1990, Kriging: a method of interpolation for geographic information systems: *International Journal of Geographical Information Systems*, 4, 313–332.
- Ortiz Hernández, M.C., Sáenz Morales, R., 1997, Detergents and orthophosphates inputs from urban discharges to Chetumal Bay, Quintana Roo, México: *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 59, 486–491.
- Ortiz-Hernández, M.C., Sáenz-Morales, R., 1999, Effects of organic material and distribution of fecal coliforms in Chetumal Bay, Quintana Roo, Mexico: *Environmental Monitoring and Assessment*, 55, 423–434.
- Sánchez, A., Carriquiry, J., Barrera, J., López-Ortiz, B.E., en prensa, Comparación de los modelos de transporte de sedimento en la Bahía de Todos Santos, Baja California, México: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*.
- Keller, G.H., Shepard, F.P., 1978, Currents and sedimentary processes in submarine canyons off the northeast United States, *en* Stanley, D.J., Kelling, G.K. (eds.), *Sedimentation in Submarine Canyons, Fans and Trenches*: Stroudsburg, Pennsylvania, Dowden, Hutchinson & Ross Inc., 15–32.
- Van Wesenbeck, V., Lanckneus, J., 2000, Residual sediment transport paths on a tidal sand bank: a comparison between the modified Mc Laren model and bedform analysis, *Journal of Sedimentary Research*, 70, 470–477.
- Weber, D., Englund, E., 1992, Evaluation and comparison of spatial interpolators: *Mathematical Geology*, 24, 381–391.

Manuscrito recibido: Febrero 12, 2008

Manuscrito corregido recibido: Junio 17, 2008

Manuscrito aceptado: Agosto 1, 2008