

Research Article

Patrón de transporte de sedimento en Bahía Magdalena, Baja California Sur, México, inferido del análisis de tendencias granulométricas

Alberto Sánchez¹, Evgueni Choumiline¹, Blanca Estela López-Ortiz¹, Sergio Agúñiga¹,
Lilia Sánchez-Vargas¹, Armando Romero-Guadarrama¹ & Durga Rodríguez-Meza²

¹Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, Instituto Politécnico Nacional
P.O. Box 592, La Paz, Baja California Sur, México

²Centro Interdisciplinario de Investigaciones para el Desarrollo Integral Regional
Instituto Politécnico Nacional, Guasave, Sinaloa, México

RESUMEN. Las tendencias espaciales de los parámetros texturales (tamaño medio de grano, selección y asimetría) en Bahía Magdalena, Baja California Sur, México, se calcularon a partir de 58 estaciones de muestreo, con la finalidad de inferir la trayectoria de los vectores residuales de transporte de sedimentos. Los análisis de las tendencias espaciales y de componentes principales aplicados a los parámetros texturales indicaron que el sedimento, con una buena selección, está asociado con arenas finas a muy finas. Los vectores residuales de transporte sugieren la presencia de dos giros en la dispersión de material clástico: (1) giro ciclónico en la parte central y profunda, y (2) giro anticiclónico en la región sureste de la bahía. Las trayectorias de las partículas sedimentarias tienen una excelente correlación con las corrientes residuales de marea dentro de la Bahía Magdalena.

Palabras clave: tendencias espaciales, parámetros texturales, transporte de sedimento, Bahía Magdalena, México.

Sediment transport patterns in Magdalena Bay, Baja California Sur, Mexico, inferred from grain-size trends

ABSTRACT. The grain-size trend analysis (grain size, sorting asymmetry) was determined at 58 stations in order to infer the residual vectors of sediment transport in Magdalena Bay, Baja California Sur, Mexico. Grain-size trend analysis and principal components analysis were applied to textural sediment parameters. The results indicated that well-sorted sediment is associated with fine to very fine sand. The residual vector transport suggests the presence of two gyres in the dispersion of clastic material: (1) acyclone-ic gyre in the deeper, central part and (2) an anticyclone-ic gyre in the southeast part of the bay. The sediment transport pattern is highly correlated with the residual tidal currents in Magdalena Bay.

Keywords: grain-size trends, textural parameters, sediment transport, Magdalena Bay, Mexico.

Corresponding author: Alberto Sánchez (alsanchezg@ipn.mx)

INTRODUCCIÓN

La costa occidental de la península de Baja California forma el sector sur del Sistema de la Corriente de California (SCC). El complejo lagunar de Bahía Magdalena-Almeja se localiza en la región más sureña del SCC (Fig.1). El complejo lagunar, extensión de

~1.100 km², es dinámicamente influenciado por el sistema de surgencias, casi continuo durante todo el año, así como por las corrientes de marea (Zaitsev *et al.*, 2003). Guerrero *et al.* (1988) indicaron que la acción del flujo de marea funciona como un mecanismo de transporte de las condiciones de surgencias, desde la región oceánica adyacente hacia

el interior del complejo lagunar. En el interior de este sistema, las condiciones hidrodinámicas son dominadas principalmente por el ciclo de marea (Acosta-Ruiz & Lara-Lara, 1978; Obeso-Nieblas *et al.*, 1999; Zaitsev *et al.*, 2003; Morales-Zárate *et al.*, 2006; Sánchez-Montante *et al.*, 2007). Recientemente se realizó una síntesis e integración de los estudios sobre biología, ecología, oceanografía física y ciencias sociales de este complejo lagunar con especial énfasis en proveer de información accesible a quienes tienen la responsabilidad de tomar las decisiones sobre el uso y aprovechamiento sustentable de sus recursos naturales, y definir posibles áreas de protección ecológica (Funes-Rodríguez *et al.*, 2007). No obstante, los procesos sedimentarios de Bahía Magdalena no fueron integrados en este compendio, aunque resultan de importancia en la evaluación de riesgo ecológico, recuperación y rehabilitación de los ambientes marinos (*e.g.*, McLaren & Beveridge, 2006; Sánchez *et al.*, 2008).

El análisis de las tendencias espaciales de los parámetros texturales del sedimento podría facilitar parte de esta información, además de indicar los posibles destinos finales de depositación del material sedimentario, al determinar las trayectorias netas de transporte, junto con su comportamiento dinámico (acumulación y equilibrio dinámico; McLaren & Beveridge, 2006). Así mismo, la información del análisis de las tendencias espaciales puede ser usada para predecir el transporte y destino de los agentes contaminantes asociados al sedimento (*e.g.*, Sánchez *et al.*, 2008), sobre todo en este sistema lagunar que no presenta aún impactos derivados de actividades antropogénicas, al menos en lo referente a la contaminación por metales (Shumilin *et al.*, 2005).

El uso de los parámetros texturales (tamaño medio de grano, selección y asimetría) para inferir la trayectoria de partículas fue en un principio indicado por la reducción del tamaño de las partículas en dirección de la corriente y/o transporte. Sunamura & Horikawa (1971) realizaron una combinación de los parámetros tamaño medio del grano y selección, e indicaron cuatro posibles casos donde es posible inferir la trayectoria del material sedimentario. En la década de los 80's, McLaren & Bowles (1985) propusieron la combinación de los tres parámetros texturales para inferir el transporte de sedimento, mediante un modelo unidimensional, sobre la base de un análisis estadístico de normalidad que indica las trayectorias significativas de transporte de sedimento. Posteriormente, los modelos de transporte sedimentario bidimensionales propuestos por Gao & Collins (1992), LeRoux (1994) y Poizot & Méar (2008) se sustentaron en geometría analítica, análisis

vectorial y estadístico, con la finalidad de obtener resultados más robustos en la magnitud y dirección de los vectores resultantes de transporte. En ésta contribución se utilizó el modelo de transporte sedimentario de LeRoux (1994).

En el presente trabajo se propone describir el transporte y dispersión de los sedimentos superficiales en Bahía Magdalena, Baja California Sur, México. Para ello se realizó un análisis granulométrico de cada una de las muestras y se obtuvieron sus parámetros texturales. A partir de la comparación de las tendencias espaciales de los parámetros texturales y aplicando el modelo de LeRoux se calcularon los vectores de transporte. La interpretación de las tendencias espaciales de los parámetros texturales, el transporte neto de sedimento y la integración de los registros hidrográficos que existen en la bahía, pueden fundamentar un marco de referencia para implementar esquemas de monitoreo ambiental y comprender los procesos biogeoquímicos y sedimentarios que determinan el funcionamiento del ecosistema.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Bahía Magdalena se localiza entre 24°30'-24°48'N y 111°51'-112°09'W del margen costero suroeste de la península de Baja California (Fig. 1). La bahía de 883 km² está caracterizada, en el sector norte, por una zona relativamente somera con canales, de una profundidad inferior a 10 m. En la parte central la profundidad es mayor de 20 m con un canal profundo de hasta 38 m que comunica a la bahía con el océano adyacente, a través de una amplia boca de 5,6 km de ancho, ubicada entre Punta Entrada (Isla Magdalena) y Punta Redonda (Isla Margarita). La profundidad de la parte central se disminuye hacia el oriente con una pendiente suave hacia la costa, quedando expuestos frecuentemente extensos bancos de arena durante periodos de bajamar hacia el este y noreste de la bahía (Álvarez-Borrego *et al.*, 1975).

El área oceánica adyacente a la bahía es una zona típica de surgencias estacionales (Zaitsev *et al.*, 2003) que inyectan nutrientes al sistema durante el flujo de la marea. En el interior de la bahía, las velocidades de la corriente registradas durante un ciclo de marea han sido de ~0,23 m s⁻¹ durante el flujo máximo y 0,20 m s⁻¹ en el refluo (Acosta-Ruiz & Lara-Lara, 1978). Obeso-Nieblas *et al.* (1999) encontraron que la velocidad máxima del flujo de la corriente era de 1,09 m s⁻¹ en la boca de la bahía.

El clima es seco, semi-cálido, con temperatura del aire promedio anual superior a los 18°C, con una tem-

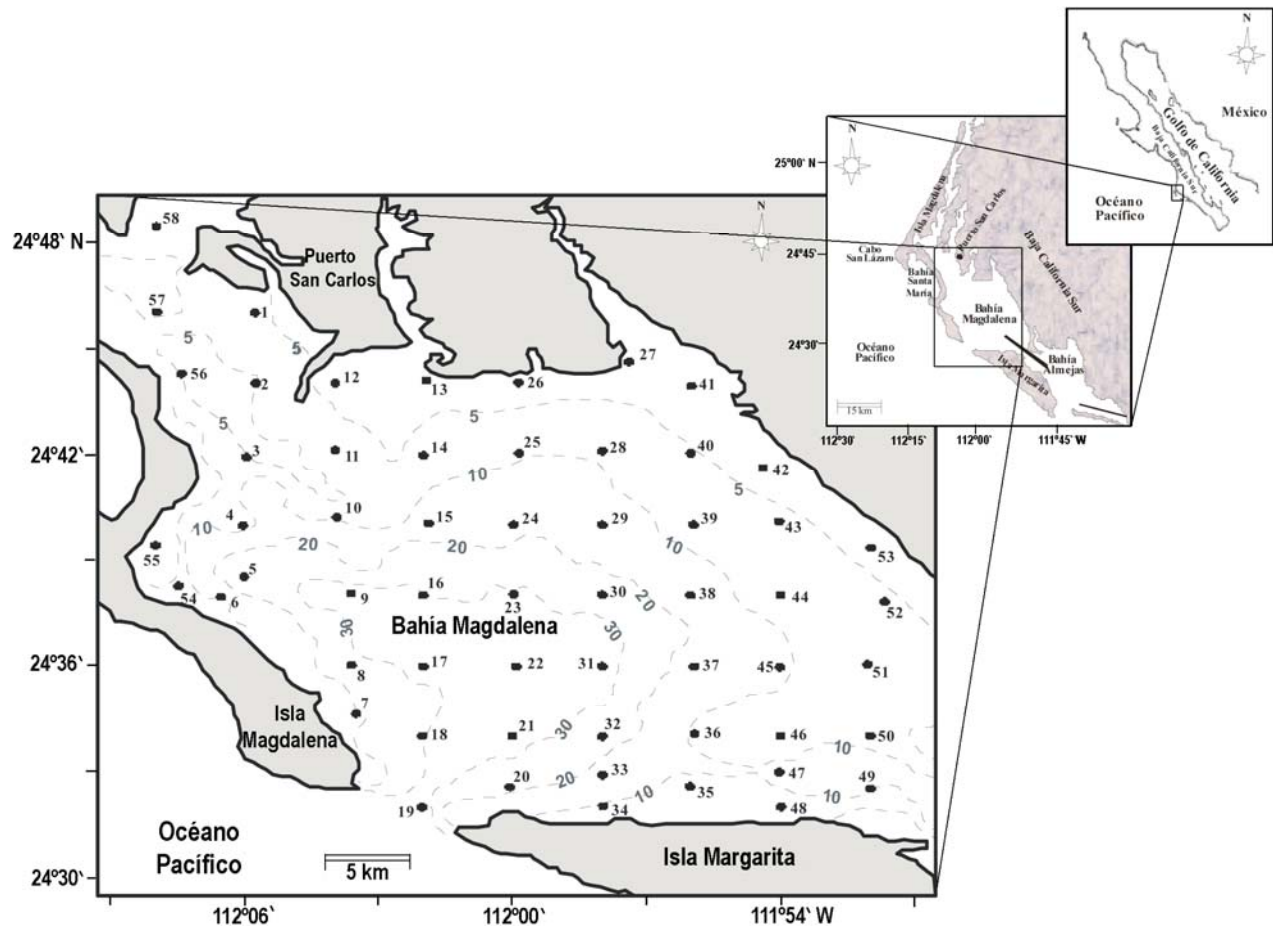


Figura 1. Área de estudio y estaciones de muestreo en Bahía Magdalena. Las líneas segmentadas denotan la batimetría (m) de la bahía.

Figure 1. Area of study and sampling stations in Magdalena Bay. The segmented lines denote the bathymetry (m) of the bay.

peratura mínima en enero ($14,5^{\circ}\text{C}$) y máxima en agosto-septiembre (32°C). La bahía presenta condiciones anti-estuarinas como resultado de una reducida tasa de precipitación y escasa afluencia de agua dulce, así como de una elevada tasa de evaporación (Álvarez-Borrego *et al.*, 1975). Sus principales recursos hídricos continentales son de origen lótico (arroyos temporales, estuarios y canales). Esta región presenta una precipitación anual promedio que fluctúa entre 48 y 153 mm a^{-1} , con variaciones estacionales de 71 mm entre otoño e invierno y 54 mm entre primavera y verano. Las precipitaciones tienen fluctuaciones periódicas de aproximadamente 10 años asociadas con el patrón de aparición de manchas solares. En consecuencia, la bahía no es alimentada por corrientes de agua permanente, aunque la humedad relativa del ambiente frecuentemente se presenta en forma de rocío (Funes-Rodríguez *et al.*, 2007).

Análisis textural

Para el análisis sedimentológico se realizaron 58 estaciones de muestreo en Bahía Magdalena (Fig. 1), recolectando los sedimentos superficiales (2 cm superiores) mediante buceo libre y una draga Van Veen (modelo 602-021, volumen de muestra de 24 L). Las muestras fueron recolectadas entre el 31 de agosto y 4 de septiembre de 1998. El sedimento fue secado a una temperatura de 60°C . El tamaño del grano de los sedimentos se determinó empleando la técnica del tamizado en seco entre $-2,5$ y $4,5 \Phi$, con un intervalo de $0,5 \Phi$. Con los datos obtenidos del porcentaje en peso del tamizado se determinaron los parámetros granulométricos de tamaño medio de grano, selección y asimetría (Folk, 1974; Tabla 1).

Análisis estadístico multivariado

Los datos texturales fueron examinados utilizando un análisis de componentes principales para identificar

los parámetros texturales responsables de la variabilidad de la tendencia espacial de los sedimentos superficiales en la bahía, utilizando el programa Statistica versión 8.

El análisis de componentes principales (ACP) 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 (Davis, 1986).

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

$$RU = UA \quad \text{define:} \quad Y = XU$$

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 sedimento (*e.g.*, McLaren & Bowles, 1985; Gao & Collins, 1992; LeRoux, 1994; Poizot & Méar, 2008). En el caso de este estudio se aplicó el modelo propuesto por LeRoux (1994), basado en principios de geometría analítica y análisis vectorial de datos texturales. La magnitud y dirección del vector de transporte se obtuvieron por comparación de las características texturales de cinco estaciones de muestreo (una central y cuatro satélites). Las consideraciones generales del modelo son: (1) las tendencias texturales de los sedimentos superficiales es producto de las condiciones hidrodinámicas del ambiente; (2) es aplicable en ambientes marinos costeros y de plataforma donde el transporte de sedimento es unidireccional; (3) el gradiente de los parámetros texturales es constante en el área donde se compararon las cinco estaciones de muestreo; (4) todos los parámetros texturales utilizados en el modelo tienen el mismo peso e importancia; y (5) la distancia entre las cinco estaciones (inter-estacional) no es crítica, específicamente si hay un gradiente textural claro entre las estaciones del área implicada. La

distancia inter-estacional promedio de la malla de muestreo en este estudio es 5 km, una distancia menor a la incursión de la marea (Sánchez-Montante, 2004).

RESULTADOS

Distribución espacial de los parámetros texturales

La granulometría es relativamente homogénea en la bahía, con un tamaño medio de grano entre 2,5 a 3,5 Φ , reconociéndose un incremento de este parámetro hacia la boca de la bahía e isla Margarita (Fig. 2). La selección de los sedimentos varía entre bien a muy bien seleccionados (0 a 1), registrándose una disminución (pobrementemente seleccionados > 2) hacia donde incrementa el tamaño medio de grano (Fig. 3). El parámetro de la asimetría fue sistemáticamente negativo en toda la bahía con algunas tendencias hacia valores positivos en la región noroeste, este y hacia la boca de la bahía e isla Margarita (Fig. 4).

Análisis estadístico multivariado

El análisis estadístico multivariado de componentes principales aplicado a los sedimentos de Bahía Magdalena indicó que dos factores explicaron el 98% de la variabilidad total (Fig. 5). El factor 1 es constituido por el tamaño medio de grano y la selección, que explicaron el 76% de la variabilidad, mientras el factor 2, con un 22% de la variabilidad se caracterizó por la asimetría del sedimento (Fig. 5). El tamaño medio de grano tuvo una correlación inversa con la selección, es decir, los sedimentos de grano fino se encontraron mejor clasificados con una asimetría hacia valores negativos.

Transporte neto de sedimento

Los resultados obtenidos después de aplicar el modelo LeRoux de transporte de sedimento indicaron la existencia de un giro ciclónico en la parte central y profunda de la bahía, mientras que en la región sureste describe un giro anticiclónico (Fig. 6). En el margen noroeste de la bahía, los vectores residuales de transporte mostraron una dirección sureste (Fig. 6). En el margen costero de la isla Margarita, los vectores residuales de transporte denotaron una trayectoria de las partículas de sedimento con dirección suroeste (Fig. 6). El transporte sedimentario para la boca de la bahía no fue definido debido a que solo se obtuvo una muestra colectada.

DISCUSIÓN

Las tendencias granulométricas de los sedimentos han sido ampliamente utilizadas para inferir las posibles trayectorias del material clástico en diversos ambien-

Tabla 1. Localización geográfica de las estaciones de colecta y parámetros texturales (en unidades phi) de los sedimentos superficiales de la Bahía Magdalena.
Table 1. Geographic localization of the sampling stations and textural parameters (in phi units) of the superficial sediments in Magdalena Bay.

Estación	Latitud (N)	Longitud (W)	Tamaño medio de grano	Selección	Asimetría	Estación	Latitud (N)	Longitud (W)	Tamaño medio de grano	Selección	Asimetría
1	24°46,00	112°5,76	2,80	0,55	-1,80	30	24°38,01	111°57,99	3,07	0,52	-2,73
2	24°44,01	112°5,74	2,23	1,11	-2,82	31	24°35,98	111°57,99	2,83	0,63	-2,17
3	24°41,92	112°5,95	2,21	0,75	-2,15	32	24°33,97	111°57,99	2,80	0,55	-2,00
4	24°39,96	112°6,03	2,19	0,97	-3,20	33	24°31,99	111°57,99	2,85	0,40	-1,96
5	24°37,94	112°6,52	3,18	0,70	-2,53	34	24°31,18	111°57,91	0,51	1,79	-0,31
6	24°37,38	112°6,87	3,20	0,75	-2,52	35	24°31,27	111°55,96	0,31	1,97	0,00
7	24°34,27	112°4,06	0,23	1,75	-0,12	36	24°34,05	111°55,92	3,05	0,37	-1,30
8	24°36,01	112°3,60	3,26	0,74	-3,69	37	24°35,97	111°55,93	3,20	0,42	-1,30
9	24°38,05	112°3,61	3,00	0,58	-2,15	38	24°37,99	111°56,01	3,08	0,40	-1,14
10	24°40,20	112°3,93	2,45	0,34	-0,12	39	24°39,99	111°55,95	2,88	0,46	-1,63
11	24°42,12	112°3,96	2,80	0,37	-0,65	40	24°42,03	111°56,01	2,78	0,62	-2,82
12	24°44,02	112°3,96	2,20	0,70	-2,40	41	24°43,93	111°55,99	2,94	0,47	-2,35
13	24°44,08	112°1,92	2,14	0,63	-3,70	42	24°42,09	111°53,91	2,60	0,54	-2,43
14	24°41,97	112°1,99	2,75	0,43	-1,50	43	24°40,08	111°54,03	2,89	0,44	-0,42
15	24°40,03	112°1,87	3,00	0,43	-1,24	44	24°37,99	111°54,00	2,69	0,53	-0,65
16	24°37,99	112°1,99	2,92	0,63	-2,09	45	24°35,95	111°54,01	2,99	0,46	-1,40
17	24°35,97	112°1,99	2,70	0,81	-2,90	46	24°33,99	111°54,00	2,77	0,42	-1,76
18	24°33,99	112°2,01	1,20	1,40	-1,40	47	24°31,96	111°54,00	2,94	0,47	-3,02
19	24°31,98	112°2,02	-0,10	1,90	0,15	48	24°31,09	111°54,00	1,32	1,52	-1,07
20	24°31,42	112°0,01	-0,33	1,94	0,56	49	24°32,50	111°51,99	2,45	0,79	-2,03
21	24°33,99	112°0,00	1,89	1,04	-1,93	50	24°33,99	111°51,99	2,79	0,40	-0,98
22	24°35,97	111°59,91	2,86	0,57	-3,72	51	24°36,03	111°52,05	2,84	0,46	-0,93
23	24°38,02	111°59,97	3,10	0,55	-2,80	52	24°37,81	111°51,67	2,87	0,50	-1,04
24	24°39,99	111°0,04	3,10	0,45	-2,10	53	24°39,33	111°51,97	2,99	0,50	-1,39
25	24°42,03	111°59,85	3,06	0,46	-1,31	54	24°37,87	112°07,96	2,80	0,70	-2,80
26	24°44,02	111°59,86	3,00	0,50	-3,04	55	24°39,40	112°07,98	3,11	0,46	-3,98
27	24°44,61	111°57,39	2,90	0,61	-2,60	56	24°44,19	112°07,98	2,74	0,42	-1,49
28	24°42,09	111°57,99	2,62	0,70	-1,49	57	24°46,02	112°07,95	2,25	0,80	-3,21
29	24°39,99	111°57,99	2,95	0,50	-3,13	58	24°48,45	112°07,96	0,79	1,42	-1,04

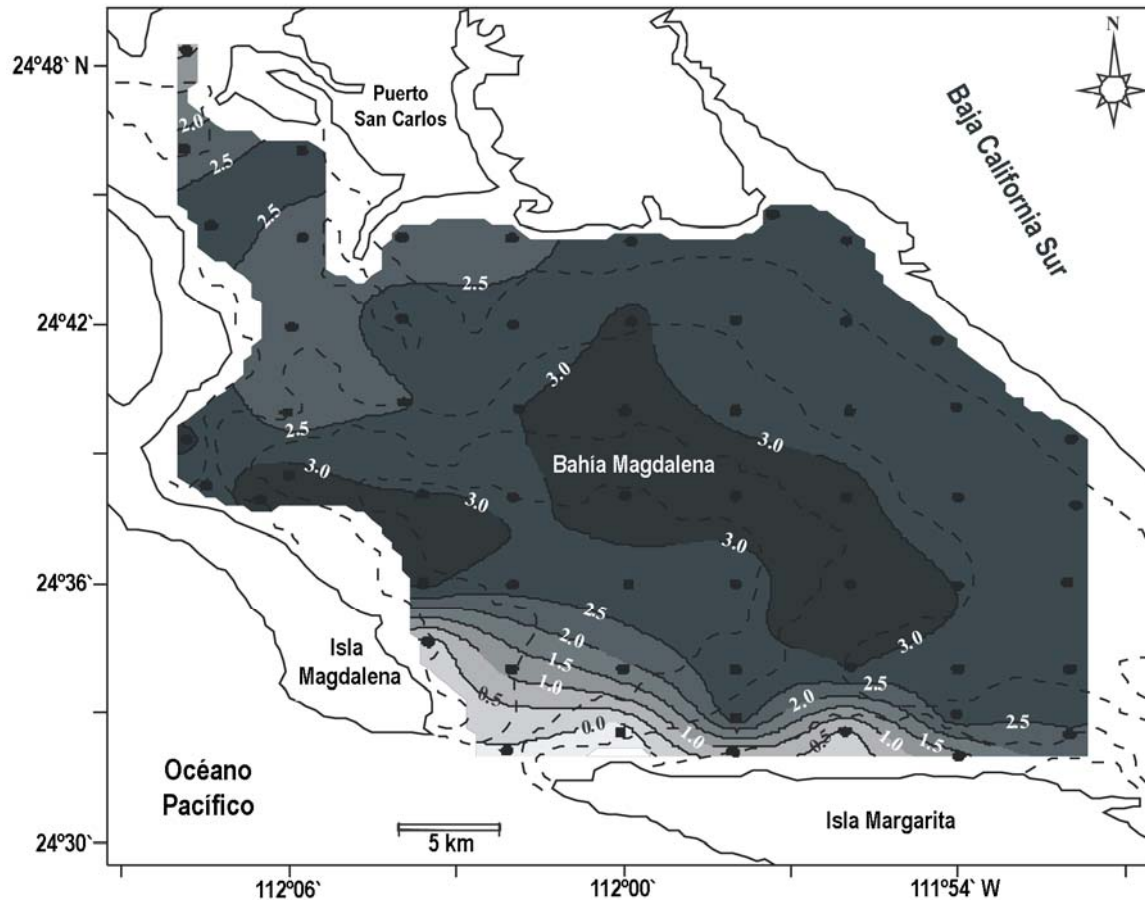


Figura 2. Distribución espacial del tamaño medio de grano (phi unidades) en Bahía Magdalena. Las líneas segmentadas denotan la batimetría (m) de la bahía.

Figure 2. Spatial distribution of the grain-size (phi units) of sediments in Magdalena Bay. The segmented lines denote the bathymetry (m) of the bay.

tes costeros. La combinación de los parámetros texturales del sedimento define la existencia de varias trayectorias de transporte sedimentario y en todas éstas la selección del sedimento siempre mejoró en dirección de la corriente (e.g., McLaren & Bowles, 1985; Gao & Collins, 1992; LeRoux, 1994; Carriquiry & Sánchez, 1999; Carriquiry *et al.*, 2001; Poizot & Méar, 2008; Sánchez *et al.*, 2008, 2009). El análisis de componentes principales, aplicado a los parámetros texturales del presente estudio, indicó que las tendencias espaciales del tamaño medio de grano y la selección explicaron el 76% y la asimetría el 22% de la variabilidad. Ambos factores explicaron el 98% de la variabilidad total y solo el 2% de la variabilidad puede ser relacionado con otros factores como la profundidad de muestreo, la distancia entre estaciones, entre otros, que afectan la distribución de los parámetros texturales de los sedimentos (e.g., Poizot *et al.*, 2008). En el presente estudio los parámetros

texturales del tamaño medio de grano, selección y asimetría están bien relacionados teniendo una misma importancia y peso relativo (LeRoux, 1994), lo que corrobora su utilidad como indicadores de transporte de sedimentos superficiales. La implementación de vectores produce un resultado más robusto y reduce el sesgo en la selección de líneas de muestreo y su utilidad es sustentada por su aplicación en diversos ambientes costeros, como bahías, y estuarios, entre otros (Gao *et al.*, 1994; Pedreros *et al.*, 1996).

En efecto, el análisis de correlación del tamaño medio de grano *vs* selección fue significativo ($F_{1,56,\alpha=0.05} = 430$; $P < 0,0000$) con un coeficiente de determinación ($R^2 = 0,88$). En el caso del tamaño medio de grano *vs* asimetría, el coeficiente de determinación ($R^2 = 0,28$) concuerda con la variabilidad explicada por el análisis de componentes principales (22%). Los resultados del ACP y de correlación del presente estudio son coherentes con los

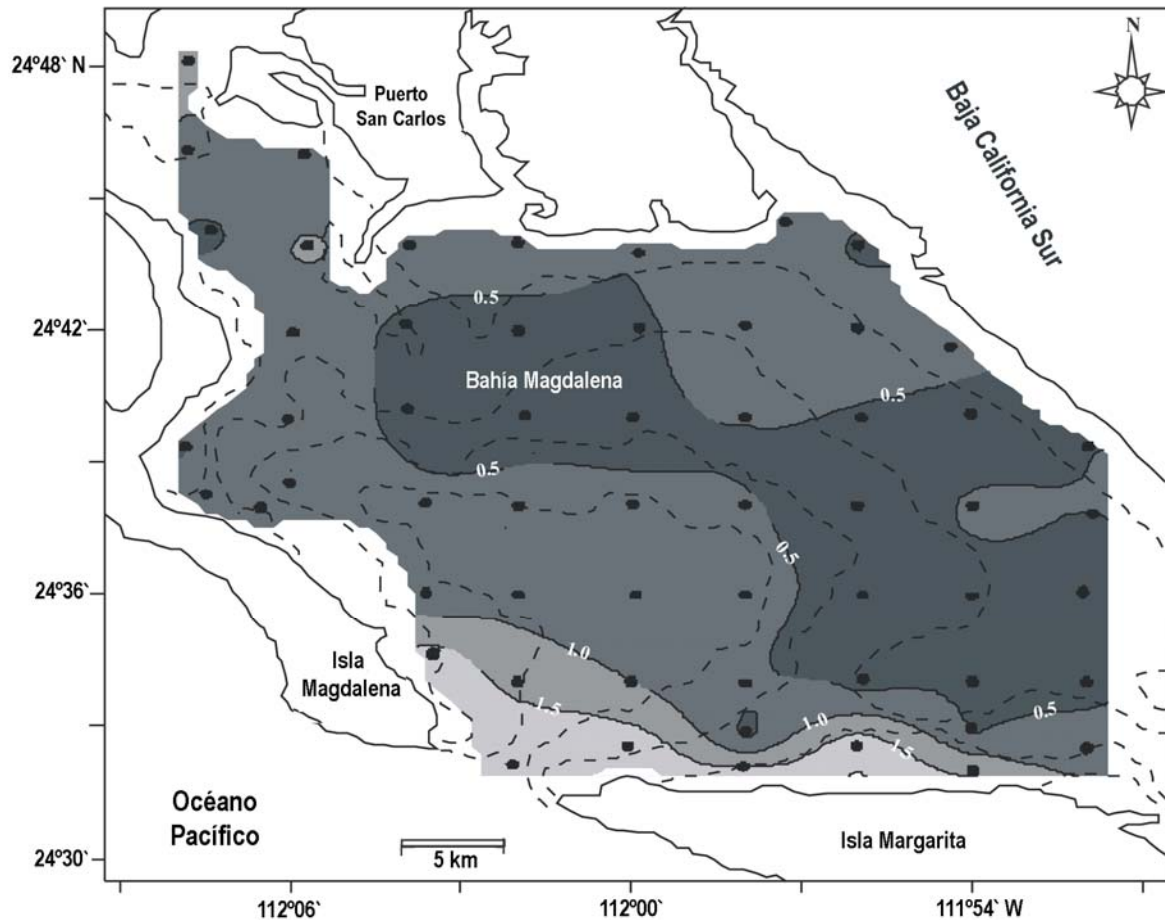


Figura 3. Distribución espacial de la selección (phi unidades) en Bahía Magdalena. Las líneas segmentadas denotan la batimetría (m) de la bahía.

Figure 3. Spatial distribution of the sorting (phi units) of sediments in Magdalena Bay. The segmented lines denote the bathymetry (m) of the bay.

resultados obtenidos para la bahía de Chetumal, Quintana Roo, México, donde las tendencias espaciales de los parámetros texturales del tamaño medio de grano y la selección explicaron el 95% de la variabilidad (Sánchez *et al.*, 2008). Estos resultados contrastan con lo reportado por Cheng *et al.* (2004) quienes obtuvieron que el tamaño medio de grano y la asimetría describen el 95% de la variabilidad de las tendencias espaciales de los parámetros texturales de los sedimentos en el Mar Amarillo, China.

En áreas influidas por descargas de ríos caudalosos como es el caso del Mar Amarillo en China y el Alto Golfo de California en México, la floculación de las partículas es uno de los fenómenos más importantes que afecta directamente la selección y en menor grado el tamaño de las partículas (Kranck & Milligan, 1991; Carriquiry & Sánchez, 1999), lo cual hace difícil definir las condiciones de depositación sobre la base del análisis del tamaño de grano (Fox *et al.*, 2004). La

dificultad de establecer una tendencia textural en el sedimento se produce porque la floculación puede dar lugar a la depositación preferencial de partículas finas en sitios donde el asentamiento selectivo de sedimentos está vinculado a las condiciones hidrodinámicas. De tal forma, la diferencia de cada factor en el ACP para cada uno de los sitios de comparación puede ser producto de los procesos derivados de la floculación de material sedimentario, que permitió el asentamiento de material pobremente clasificado en el Mar Amarillo, China y Alto Golfo de California, México. Mientras que la efímera descarga de los arroyos en la Bahía Magdalena y la baja descarga del río Hondo en la bahía de Chetumal, Quintana Roo, México, favorecen la depositación de sedimentos bien clasificados.

El aumento del tamaño medio de grano (arenas muy gruesas) hacia la boca de la bahía e isla Margarita es ocasionado por las intensas corrientes de marea con

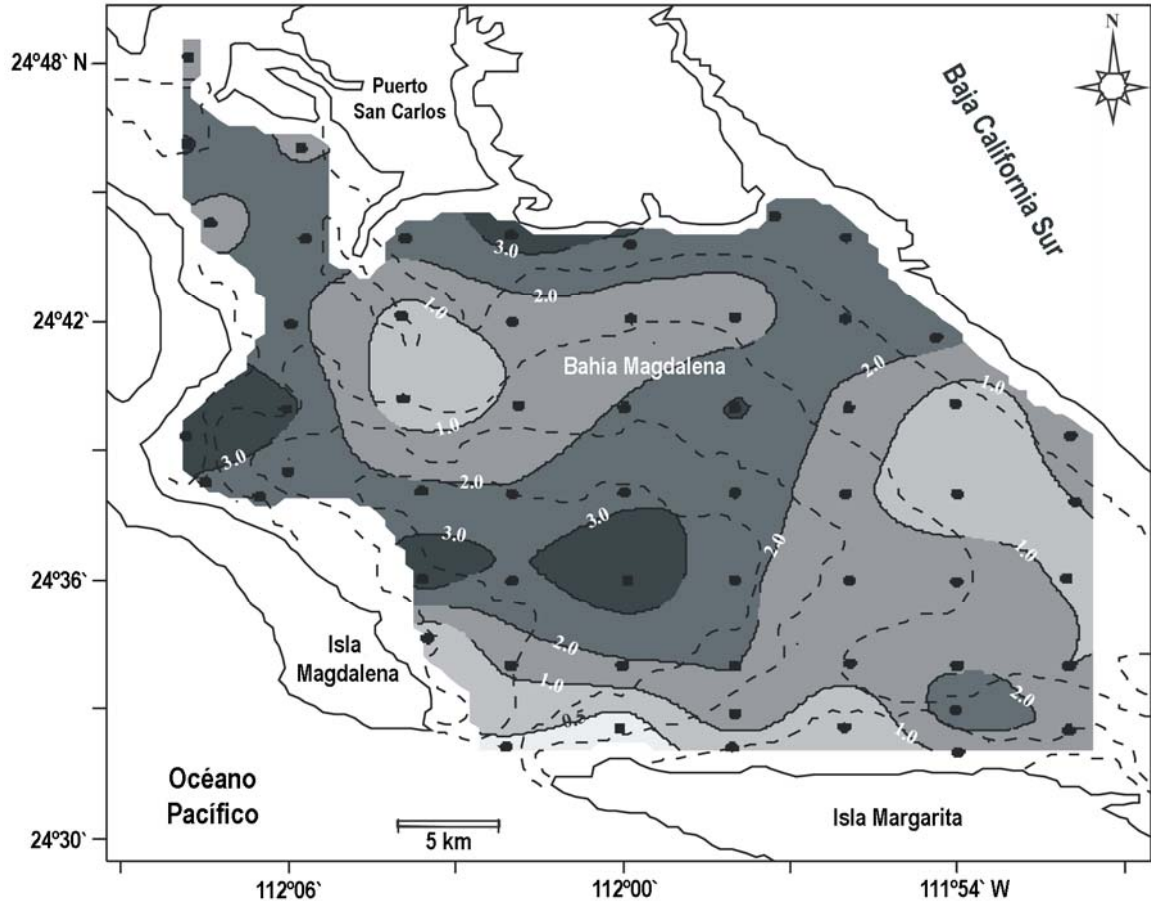


Figura 4. Distribución espacial de la asimetría (phi unidades) en Bahía Magdalena. Las líneas segmentadas denotan la batimetría (m) de la bahía.

Figure 4. Spatial distribution of the asymmetry (phi units) of sediments in Magdalena Bay. The segmented lines denote the bathymetry (m) of the bay.

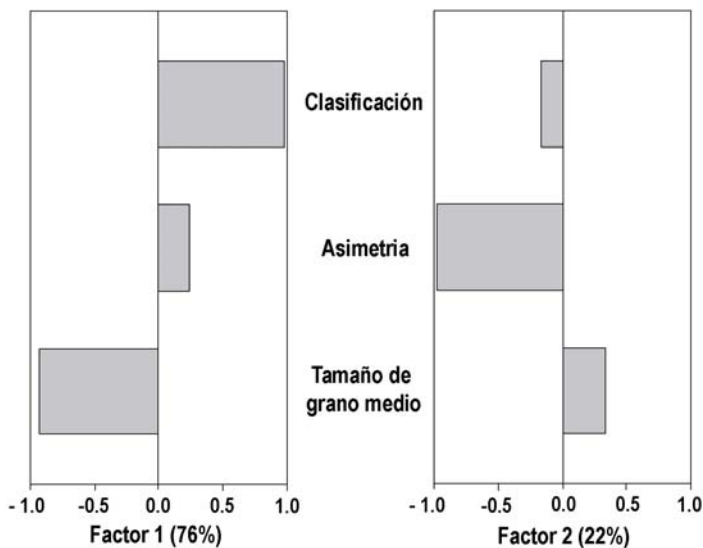


Figura 5. Representación gráfica de los principales factores (1 y 2) y sus correspondientes cargas obtenidas del análisis de componentes principales de los parámetros texturales de sedimentos.

Figure 5. Graphical representation of the factors (1 and 2) and its corresponding loads obtained of the principal components analysis of the textural parameters of sediment.

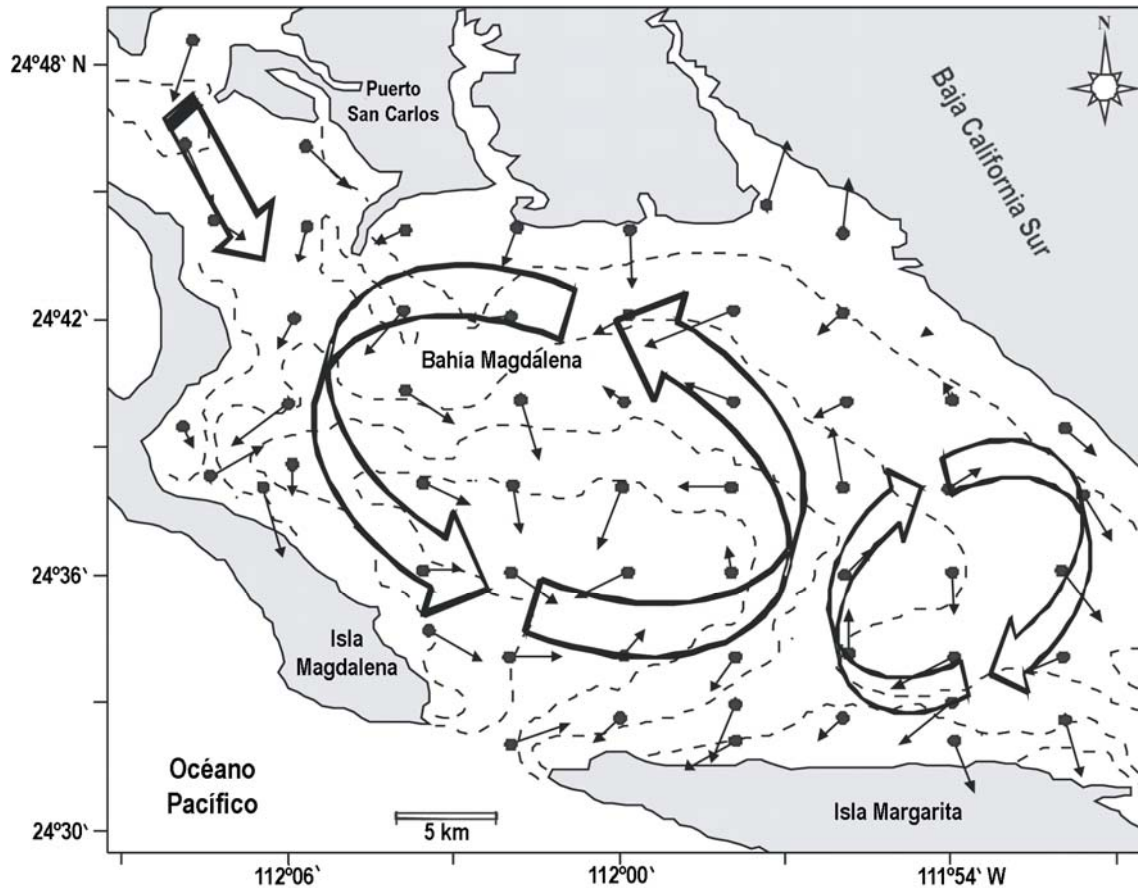


Figura 6. Dispersión de los sedimentos en Bahía Magdalena inferidos de los vectores de transporte. Las flechas circulares describen los giros de trayectorias del material sedimentario y la circulación residual de la marea.

Figure 6. Dispersion of sediments in Magdalena Bay inferred of the transport vectors. The circular arrows describe the trajectory main of the sedimentary material and residual circulation tidal.

una velocidad de $1,09 \text{ m s}^{-1}$ (Obeso-Nieblas *et al.*, 1999). La velocidad de la corriente generada durante el flujo-reflujo de la marea es lo suficientemente intensa para impedir la depositación de arenas finas a muy finas. Esto concuerda con el modelo de Hjulstrom, donde la velocidad crítica de 1 m s^{-1} tiene la capacidad de mover partículas de sedimento con un tamaño medio de grano $< 0,5 \text{ mm}$ ($> 1,0 \Phi$); mientras que las arenas muy gruesas son preferencialmente depositadas en la boca de la bahía e isla Margarita. Al interior de la bahía, las corrientes de marea disminuyen hasta $0,20 \text{ m s}^{-1}$ reduciendo la capacidad de carga generada por esta corriente que mueve partículas mayores de 2Φ , de acuerdo al modelo de Hjulstrom. De hecho, las condiciones hidrodinámicas en la boca e interior de la bahía generan el gradiente observado en el tamaño medio de grano y mejora la selección hacia el interior de la bahía.

La expresión vectorial del transporte de sedimento es una característica cualitativa que solo indica la

dominancia en la cual dos estaciones están intercambiando materiales. Asimismo, la magnitud relativa de cada vector en el área de estudio indica el grado en el cual dos estaciones están intercambiando materiales, sin proveer ninguna información cuantitativa con respecto a la cantidad de materiales intercambiados. La magnitud de los vectores obtenidos del modelo de LeRoux indican, hasta cierto punto, una amplia variabilidad en el intercambio de materiales entre las estaciones vecinas (*i.e.*, el intercambio de material no ocurre en la misma proporción para todos los sitios). Algunos estudios para haber indicado que el 80% de las magnitudes vectoriales obtenidas en el Mar del Norte están caracterizadas por magnitudes entre 0,4 y 0,5 (Gao & Collins, 1994). Carriquiry & Sánchez (1999) y Carriquiry *et al.* (2001) encontraron una gran heterogeneidad en la magnitud de los vectores de transporte en el Alto y Norte del Golfo de California entre 0,4 y 1,0, indicando que las condiciones hidrodinámicas son

heterogéneas, y por lo tanto, reflejan gradientes ambientales contrastantes (*e.g.*, corrientes de marea, oleaje, profundidad, geomorfología, entre otros). Esto puede indicar que las condiciones hidrodinámicas del área de estudio son relativamente homogéneas y, por lo tanto, no reflejan ambientes sedimentológicos contrastantes dentro de la bahía. De hecho, la batimetría de la bahía es relativamente monótona con un gradiente gradual del incremento en la profundidad hacia la boca de la bahía e islas y la ausencia de bajos, barras de marea u oleaje.

El análisis de las tendencias texturales para establecer el transporte neto de sedimentos ha sido utilizado ampliamente en diversos ambientes marinos y continentales. En estos estudios, el transporte neto y la dispersión del material sedimentario fueron validados al comparar los vectores residuales de transporte definidos a partir de los diferentes modelos de transporte sedimentario con las corrientes oceánicas medidas o modeladas (*e.g.*, McLaren & Bowles, 1985; Gao & Collins, 1992; LeRoux, 1994; Carriquiry & Sánchez, 1999; Carriquiry *et al.*, 2001; Poizot *et al.*, 2008; Sánchez *et al.*, 2008, 2009). De esta forma, las tendencias texturales es una excelente herramienta para inferir el movimiento de las partículas de sedimento en sitios donde los estudios de corrientes son limitados. Los estudios de la circulación en el interior de Bahía Magdalena son relativamente limitados, pero de gran utilidad para validar las trayectorias de transporte sedimentario inferidas de las tendencias texturales de los sedimentos. La aplicación del modelo de LeRoux permitió inferir un transporte neto de sedimento superficial con un giro ciclónico en la parte central y profunda de Bahía Magdalena y anticiclónico en la parte sureste de la bahía con algunas trayectorias locales. Sánchez-Montante *et al.* (2007) calcularon las corrientes residuales de la marea que resultaron de la circulación forzada con la componente M_2 de la marea. Las corrientes residuales de marea describieron la existencia de una circulación ciclónica en la región central de la bahía y anticiclónica en la región sureste de la misma. En efecto, la modelación de la liberación de 58 partículas distribuidas homogéneamente en el interior de la bahía, mostraron trayectorias similares a las corrientes residuales de la marea con dos giros uno anticiclónico y otro ciclónico (Sánchez-Montante, 2004; en Fig. V20). Morales-Zárate *et al.* (2006) describen la circulación y transporte pasivo de partículas en Bahía Magdalena mediante un modelo forzado por mareas, marea residual, viento medio y viento periódico para simular el efecto de la brisa marina. Las partículas sembradas se mantienen en el interior de la bahía y tienden a concentrarse en zonas de convergencia.

Los resultados obtenidos en el presente y previos estudios pueden ser la base sobre la cual se definen posibles áreas de protección ecológica y particularmente para el uso y aprovechamiento sustentable de los recursos naturales, sobre todo porque se ha sugerido que la bahía no tiene problemas de contaminación, al menos, por metales (Shumilin *et al.*, 2005; Rodríguez-Meza *et al.*, 2007). El hecho que los contaminantes asociados a las partículas finas del sedimento (*e.g.*, limos y arcillas), seguirían la trayectoria de transporte 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 dentro de la bahía (*e.g.*, McLaren & Beveridge, 2006). El desarrollo de la bahía producto del incremento de las actividades antropogénicas, indudablemente contribuiría al deterioro de este cuerpo de agua, es por ello, que el presente estudio y el compendio de estudios biológicos, físicos y químicos pueden ser la base para proponer programas de monitoreo de la calidad del agua y de sedimento, principalmente en aquellas áreas donde existen sospechas de posibles fuentes de contaminación (*e.g.*, Puerto San Carlos; Shumilin *et al.*, 2005) o estén sujetas a un eventual impacto ambiental, sobre todo los sitios relacionadas con el desove y crianza de larvas de peces de importancia económica (*e.g.*, Morales-Zárate *et al.*, 2006).

REFERENCIAS

- Acosta-Ruiz, J. & J. Lara-Lara. 1978. Resultados fisicoquímicos en un estudio de variación diurna en el área central de Bahía Magdalena, B.C.S. *Cienc. Mar.*, 5: 37-45.
- Álvarez-Borrogo, S., L. Galindo-Bect & A. Chee-Barragan. 1975. Características hidroquímicas de Bahía Magdalena, B.C.S. *Cienc. Mar.*, 2: 94-110.
- Carriquiry, J.D. & A. Sánchez. 1999. Sedimentation in the Colorado River delta and upper Gulf of California after nearly a century of discharge loss. *Mar. Geol.*, 158: 125-145.
- Carriquiry, J.D., A. Sánchez & V.F. Camacho-Ibar. 2001. Sedimentation in the Northern Gulf of California after the elimination of Colorado River discharge. *Sed. Geol.*, 144: 37-62.
- Cheng, P., S. Gao & H. Bokuniewicz. 2004. Net sediment transport patterns over the Bohai Strait based on grain size trend analysis. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 60: 203-212.
- Davis, J. 1986. *Statistics and data analysis in geology*. Wiley, New York, 647 pp.

- Folk, R.L. 1974. Petrology of sedimentary rocks. Hemphill Publishing, Austin, 182 pp.
- Fox, J.M., P.S. Hill, T.G. Milligan & A. Boldrin. 2004. Flocculation and sedimentation on the Pô River Delta. *Mar. Geol.*, 203: 95-107.
- Funes-Rodríguez, R., J. Gómez-Gutiérrez & R. Palomares-García. 2007. Estudios ecológicos en Bahía Magdalena. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas. Instituto Politécnico Nacional, México, 289 pp.
- Gao, S. & M.B. Collins. 1992. Net sediments transport patterns from grain size trends, based upon definition of 'transport vectors'. *Sediment. Geol.*, 81: 47-60.
- Gao, S. & M.B. Collins. 1994. Analysis of grain size trends, for defining sediment transport pathways in marine environments. *J. Coast. Res.*, 10: 70-78.
- Gao, S., M.B. Collins, J. Lanckneus, G. De Moor & V. Van Lancker. 1994. Grain size trends associated with sand sediment transport patterns; an example from the Belgian continental shelf. *Mar. Geol.*, 121: 171-185.
- Kranck, K. & T.G. Milligan. 1991. Grain size in oceanography. In: J.P.M. Syvitski (ed.). Principles, methods and application of particle size analysis. Cambridge University Press, New York, pp. 332-345.
- LeRoux, J.P. 1994. An alternative approach to the identification of the end sediment transport paths based on grain size trends. *Sediment. Geol.*, 94: 97-107.
- McLaren, P. & D. Bowles. 1985. The effects of sediment transport on grain size distributions. *J. Sediment. Petrol.*, 55: 457-470.
- McLaren, P. & R.P. Beveridge. 2006. Sediment trend analysis of the Hylebos Waterway: implications for liability allocations. *Int. Environ. Ass. Manage.*, 2: 262-272.
- Morales-Zárate, M.V., A.L. Aretxabaleta, F.E. Werner & S.E. Lluch-Cota. 2006. Modelación de la circulación invernal y la retención de partículas en el sistema lagunar Bahía Magdalena-Almejas (Baja California Sur, México). *Cienc. Mar.*, 32: 631-647.
- Obeso-Nieblas, M., J.H. Gaviño-Rodríguez & A. Jiménez-Illescas. 1999. Modelación de la marea en el sistema lagunar Bahía Magdalena-Almejas, B.C.S., México. *Océanides*, 4: 79-98.
- Poizot, E. & Y. Méar. 2008. eCSedtrend: a new software to improve sediment trend analysis. *Comp. Geosci.*, 34: 827-837.
- Poizot, E., Y. Méar & L. Biscara. 2008. Sediment Trend Analysis through the variation of granulometric parameters: A review of theories and applications. *Earth Sci. Rev.*, 86: 15-41.
- Rodríguez-Meza, D., E. Choumiline, L. Méndez-Rodríguez, B. Acosta-Vargas & D. Sapozhnikov. 2007. Composición química de los sedimentos y macroalgas del complejo lagunar Magdalena-Almejas. In: R. Funes-Rodríguez, J. Gómez-Gutiérrez, R. Palomares-García (eds.). Estudios ecológicos en Bahía Magdalena. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas. Instituto Politécnico Nacional, México, pp. 61-82.
- Sánchez-Montante, O. 2004. Hidrodinámica y transporte de masa en el sistema lagunar Bahía Magdalena-Bahía Almejas, Baja California Sur, México: modelación y experimentación. Tesis del Doctorado CICIMAR-IPN, 288 pp.
- Sánchez-Montante, O., O. Zaitsev & M. Saldívar-Reyes. 2007. Condiciones hidrofísicas en el sistema lagunar Bahía Magdalena-Almejas. In: R. Funes-Rodríguez, J. Gómez-Gutiérrez, R. Palomares-García (eds.). Estudios ecológicos en Bahía Magdalena. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas. Instituto Politécnico Nacional, México, pp.1-28.
- Sánchez, A., T. Álvarez-Legorreta, R. Sáenz-Morales, M.C. Ortiz-Hernández, B.E. López-Ortiz & S. Aguiñiga. 2008. Distribución de parámetros texturales de los sedimentos superficiales en la Bahía de Chetumal: implicaciones en la inferencia de transporte. *Rev. Mex. Cienc. Geol.*, 25: 523-532.
- Sánchez, A., J. Carriquiry, J. Barrera & B.E. López-Ortiz. 2009. Comparación de modelos de transporte de sedimento en la Bahía Todos Santos, Baja California, México. *Bol. Soc. Geol. Mex.*, 61: 13-24.
- Shumilin, E., G.D. Rodríguez-Meza, D. Sapozhnikov, S. Lutsarev & J. Murrillo de Nava. 2005. Arsenic concentrations in the surface sediments of the Magdalena-Almejas Lagoon complex, Baja California Peninsula, Mexico. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 74: 493-500.
- Sunamura, T. & K. Horikawa. 1971. Predominant direction of littoral transport along Kujyukuri Beach, Japan. *Coast. Eng. Japan*, 14: 107-117.
- Zaitsev, O., R. Cervantes-Duarte, O. Sánchez-Montante & A. Gallegos-García. 2003. Coastal upwelling activity on the Pacific shelf of the Baja California Peninsula. *J. Oceanogr.*, 59: 489-502.

Received: 9 December 2008; Accepted: 5 April 2010