



Comparación de modelos de transporte de sedimento en la Bahía Todos Santos, Baja California, México

Alberto Sánchez^{1,*}, José Carriquiry², Jorge Barrera², B. Estela López-Ortiz¹

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

² Instituto de Investigaciones Oceanológicas, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, Baja California.

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

Resumen

Para determinar el transporte residual de sedimentos en la Bahía de Todos Santos (BTS), las tendencias espaciales del sedimento fueron comparadas y aplicadas a los modelos de Sunamura y Horikawa (1971), Mc Laren y Bowles (1985), y Gao y Collins (1994). El modelo de Sunamura-Horikawa usa el tamaño de grano medio y la clasificación como criterios de comparación para inferir la dirección del transporte mientras que los modelos de Mc Laren-Bowles, y Gao-Collins usan estos dos parámetros además de la asimetría. Los dos primeros modelos son unidimensionales y el tercero es bidimensional. El modelo de Gao y Collins (1994) resultó ser el más adecuado en la determinación de los patrones residuales de dispersión de sedimentos superficiales. En la BTS se define un patrón de dispersión de sedimentos identificando varias tendencias principales de transporte. En la zona norte de la bahía con una dirección SE (siguiendo el contorno de la isobata de los 20 m), y hacia el NE (cercano a la Isla de Todos Santos). Para la zona sur presenta un transporte en dirección NE, y en la región central de la bahía hacia el O. En el cañón de Todos Santos se determinó una trayectoria hacia el NE. La presencia de corrientes con velocidades de 0.30 ms^{-1} hace posible un transporte hacia el interior de la bahía. En la región externa de la bahía, frente a las Islas de Todos Santos y la Península de Punta Banda, el transporte inferido es hacia el O. Para las zonas someras, la circulación superficial y el transporte litoral concuerdan con los resultados del presente trabajo. Los procesos de marea (corrientes residuales u ondas internas) son un factor importante en la resuspensión y transporte del material en las zonas profundas de la bahía. En la zona central de la bahía parece ocurrir un sitio de convergencia y con ello se daría lugar al estancamiento de partículas arrojadas en la bahía (e.g., contaminantes).

Palabras claves: Bahía de Todos Santos; análisis de tendencias espaciales; transporte de sedimento; contaminantes.

Abstract

To determine residual sediment transport in the Bay of Todos Santos (BTS), grain size trend analysis were compared and applied utilizing models of Sunamura and Horikawa (1971), Mc Laren and Bowles (1985), and Gao and Collins (1994). The Sunamura-Horikawa model uses grain-size and sorting for comparison criteria to infer sediment transport whereas the models of Mc Laren-Bowles and the Gao-Collins use these two parameters and also asymmetry. The first two models mentioned are one-dimensional while the third model is two-dimensional. The model of Gao and Collins (1994) turned out to be most satisfactory model for determining patterns of dispersion of surface sediments. In the BTS, the pattern of dispersion showed several sediment transport tendencies. In the North zone of the bay the transport was in a SE direction (following the isobath contour of 20 m), and towards the NE (near the Island of Todos Santos). For the South zone transport displayed a NE direction, while the central region of the bay displayed a westerly transport direction. In the canyon of Todos Santos a NE trajectory was determined. The presence of currents with speeds of 0.30 ms^{-1} makes transport possible towards the interior part of the bay. In the external region of the bay, in front of the Islands of Todos Santos and the Peninsula of Punta Banda, the inferred transport is towards the W. For the shallow zones, the superficial circulation and the coastal transport agree with previous published results and compare well with the present work. The tide processes (current residuals or internal waves) are an

important factor in the resuspension and transport of material in the deep zones of the bay. The central zone of the bay seems to be a convergence site and can give rise to particle stagnation in the bay (e.g., polluting agents).

Keywords: Bay of Todos Santos; grain size trend analysis; sediment transport; polluting agents.

1. Introducción

En las últimas décadas se han desarrollado métodos para la identificación del transporte de sedimentos en ambientes marinos costeros (Sunamura y Horikawa, 1971; Mc Laren y Bowles, 1985; Gao y Collins, 1992, 1994). Esta técnica se fundamenta en el cambio espacial de los parámetros texturales del sedimento superficial y es definida como el Análisis de Tendencia del Tamaño de Grano (ATTG; Gao y Collins, 1992, 1994).

Los primeros intentos por determinar el transporte de sedimento fue sobre la base de la variación del tamaño de grano, considerando que disminuía en el sentido del movimiento de las partículas (Pettijohn *et al.*, 1972); sin embargo se ha observado que este parámetro también aumenta a lo largo de la trayectoria (McCave, 1978; Nordstrom, 1981, 1989). Mc Laren y Bowles (1985) mostraron que una combinación de los parámetros texturales (tamaño de grano promedio, clasificación y asimetría) produce mejores resultados en la identificación del transporte de sedimento. El modelo de Mc Laren es unidireccional y la dirección de transporte se obtiene al comparar los parámetros texturales por pares de muestra a lo largo de una línea de muestreo. Este modelo fue validado en diferentes ambientes y los resultados concordaron con las condiciones hidrodinámicas de estos (e.g., Mc Laren y Little, 1987; Mc Laren *et al.*, 1993). A pesar de esto, este modelo es cuestionado porque su aplicación está limitada para ambientes específicos, como barras arenosas, playas, entre otros (Masselink, 1992).

El modelo de Mc Laren y Bowles (1985) fue modificado por Gao y Collins (1991). Estos autores proponen un modelo bidimensional para el ATTG e introducen el concepto “vector de transporte”. Esta nueva técnica difiere del modelo de Mc Laren ya que define una malla de vectores adimensionales por comparación de los parámetros texturales de tres estaciones “vecinas”, y que son transformados en vectores de transporte al aplicar una técnica de filtrado. Gao y Collins (1991, 1992) indicaron que la implementación de vectores produce un resultado más robusto y reduce el sesgo en la selección de las líneas de muestreo y su utilidad es sustentada por su aplicación en diversos ambientes costeros, como bahías, estuarios, entre otros (Gao *et al.*, 1994; Pedreros *et al.*, 1996).

En este estudio se pretende determinar, mediante la comparación de diferentes modelos de inferencia de transporte de sedimentos, las principales rutas y destino final de las partículas sedimentarias en la Bahía Todos Santos,

B.C. Este tipo de estudios permitirá conocer por ejemplo, el impacto espacial que pudiera tener un derrame (y/o aportes sistemáticos) de contaminantes al medio marino, permitiendo predecir cuál sería el destino final de esas partículas (y/o compuestos asociados a ellos). Para validar estos modelos, los resultados del análisis de transporte son comparados con datos hidrográficos de la BTS.

1.1. Área de estudio

La BTS está localizada sobre la costa noroeste de la Península de Baja California (Figura 1). Limita al norte con Punta San Miguel, al sur con Punta Banda, al oeste con las Islas de Todos Santos y al este con la Cd. de Ensenada. Tiene una superficie de más de 240 km² y dos entradas diferenciadas; la entrada al NO de 12 km de longitud con algunos bajos y profundidades menores de 50 m y la entrada al SO con 6 km de longitud y profundidades hasta 400 m en el cañón de Todos Santos (García *et al.*, 1994). El 75% del área presenta una profundidad menor a 50 m y el 25% restante forma parte del angosto cañón submarino de Todos Santos (González-Villagrán, 1992).

Argote-Espinoza *et al.* (1975) determinaron que existen dos patrones de circulación superficial que dependen de la dirección del viento; cuando el viento presenta un componente norte genera una corriente que sigue el contorno de la línea de costa desde San Miguel y Punta Banda, donde convergen en la región central del litoral costero de la bahía y toman dirección oeste hacia las islas. Cuando el viento es del oeste, la corriente tiende a seguir un patrón inverso al anterior (Figura 1).

En la BTS se han realizado estudios sobre transporte litoral, en el norte el transporte es con dirección SE; hacia el centro de la bahía el transporte se comporta de manera general con dirección norte, y finalmente en la región sur que corresponde a la sección comprendida desde la boca del Estero de Punta Banda hasta la península del mismo nombre, presenta una dirección predominante hacia el norte (Figura 1; Pérez-Higuera y Chee-Barragán, 1984).

2. Metodología

Las muestras de sedimento se colectaron mediante una draga van-veen durante los cruceros OGEO-0893 de la Secretaría de Marina con una red de 51 estaciones (Figura 1). Los primeros 5 cm de sedimentos superficiales de

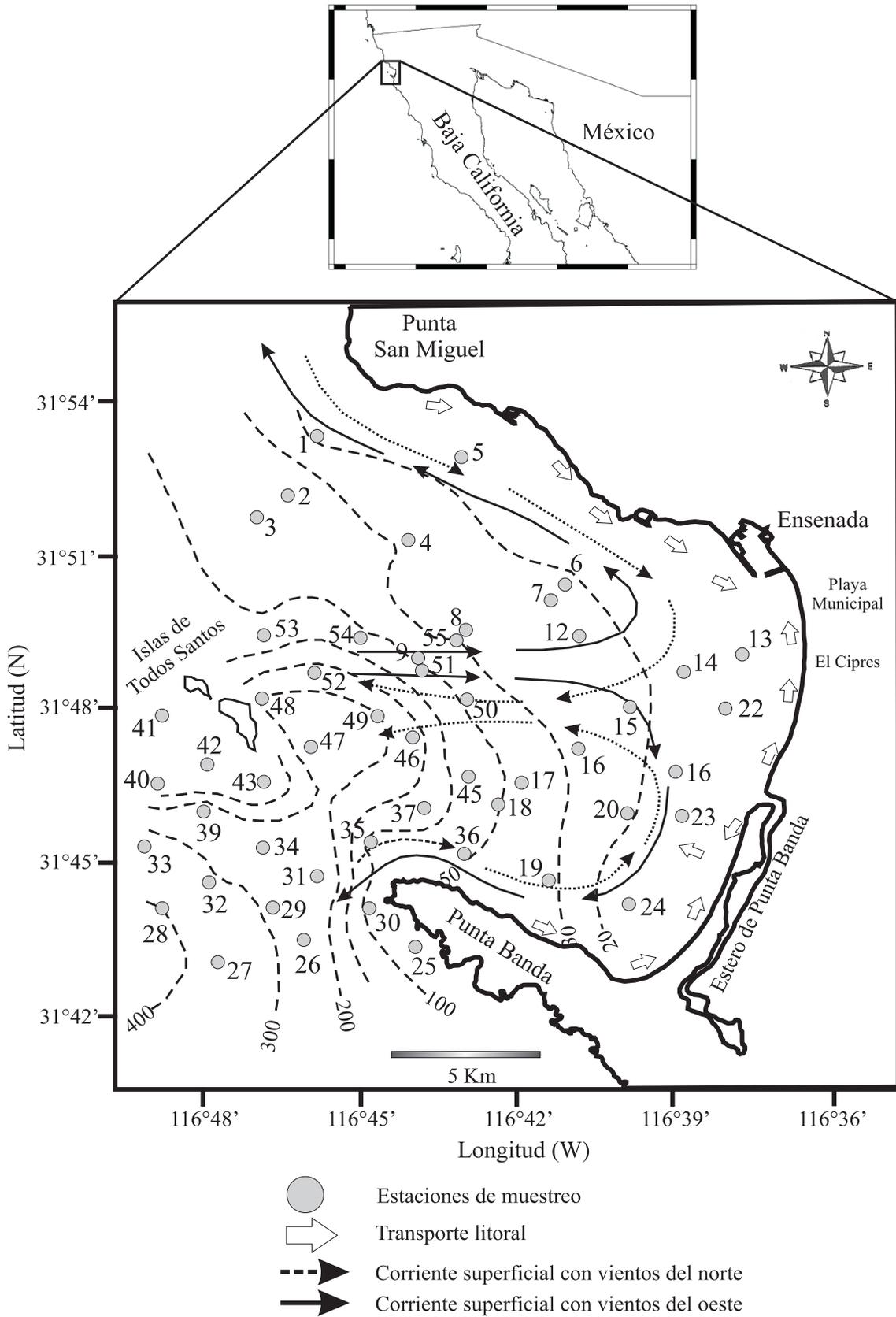


Figura 1. Localización de las estaciones de colecta de sedimentos superficiales. Corrientes superficiales y transporte litoral en la Bahía de Todos Santos, B.C. Las líneas segmentadas corresponden con la batimetría de la bahía a intervalos de 10 m, 50 m y 100 m.

cada muestra fueron pretratados para eliminar la materia orgánica y sales, de acuerdo al método descrito por Mook y Hoskin (1982). El análisis granulométrico se realizó por la técnica de Ingram (1971) para la fracción arenosa y de Galehouse (1971) para la fracción fina (limos y arcillas). Los parámetros texturales del sedimento (tamaño de grano: μ ; clasificación: σ ; asimetría: sk) se calcularon por el método propuesto por McManus (1988).

Los patrones de dispersión del sedimento se infirieron utilizando los modelos de Sunamura y Horikawa (1971); Mc Laren y Bowles (1985) y Gao y Collins (1992). El modelo de Sunamura y Horikawa (1971) fue modificado aplicándose en dos dimensiones para mejorar la representación de las trayectorias de transporte del material sedimentario. Para el modelo de Mc Laren y Bowles (1985) se analizaron 34 transectos pero solo 14 de ellos se les identificó alguna trayectoria de transporte (Tabla 1). El modelo GSTA de Gao y Collins (1992) se proponen dos criterios de comparación de los parámetros texturales para inferir la dirección de transporte; Caso 1: $\mu_A > \mu_B$, $\sigma_A < \sigma_B$, $sk_A < sk_B$, y Caso 2: $\mu_A < \mu_B$, $\sigma_A < \sigma_B$, $sk_A > sk_B$, donde A y B son estaciones de comparación y de los cuales se calculan los vectores de transporte del sedimento.

Tabla 1. Resultados del estadístico Z, coeficientes de determinación y prueba estadística de significancia con un intervalo de confianza de 90%

	Valor de Z	Coefficiente de determinación	Prueba F	p
Transecto 1	12.09	0.90	18.23	<0.00
Transecto 2	10.72	0.93	34.01	<0.00
Transecto 3	8.38	0.44	3.20	0.09
Transecto 4	12.09	0.79	7.34	0.04
Transecto 5	10.72	0.56	3.19	0.09
Transecto 6	8.38	0.93	31.97	<0.00
Transecto 7	12.09	0.79	9.26	0.04
Transecto 8	15.86	0.82	4.75	0.01
Transecto 9	12.09	0.76	6.23	0.05
Transecto 10	10.72	0.93	27.50	<0.00
Transecto 11	13.73	0.92	16.98	0.02
Transecto 12	12.09	0.95	21.06	0.01
Transecto 13	13.73	0.81	6.58	0.07
Transecto 14	12.09	0.69	4.41	0.09

3. Resultados

3.1. Tendencias texturales

El tamaño de grano medio disminuye de las regiones costeras (-1.0 ϕ) hacia el cañón (7.0 ϕ); sin embargo, en la región más profunda del cañón se observa un ligero decremento de este parámetro (5.0 ϕ). En las zonas central y sur de la bahía se encuentran los sedimentos

más homogéneos (arenas finas; Figura 2). Los sedimentos se presentan mejor clasificados en las zonas someras y el valor de este coeficiente aumenta hacia el cañón de Todos Santos. En la región externa de la bahía, frente a la Península de Punta y Banda, y las Islas de Todos Santos se observan malas clasificaciones (Figura 3). Los valores de asimetría negativos (hacia sedimentos de grano gruesos) se encuentran en las zonas someras, aumentando en la parte central de la bahía y volviendo a valores negativos hacia el cañón (Figura 4).

3.2. Modelos de transporte sedimentario

El patrón residual de transporte observado en el modelo modificado de Sunamura-Horikawa indica una convergencia de material hacia la pendiente noroeste del cañón; sin embargo, la inferencia de esta tendencia no es lo suficientemente clara para la región central. Para la parte externa de la bahía se observa una convergencia del material de las Islas de Todos Santos y la Península de Punta Banda hacia la continuación del cañón (Figura 5).

Las trayectorias de transporte delineadas con el modelo de Mc Laren-Bowles muestran: (1) una entrada de material por el cañón de Todos Santos a la BTS dispersándose en todo el interior de la bahía; (2) hacia San Miguel en la zona norte; (3) hacia la playa municipal, El Ciprés y estero de Punta Banda en la región sur; y (4) una trayectoria de aparente salida del material sedimentario se da paralela a la Península de Punta Banda (Figura 6).

Al aplicar el modelo de Gao-Collins se observa una tendencia más clara y uniforme de los residuales de transporte. Para la región norte: (1) con dirección SE hacia la región central de la bahía; y (2) hacia el NE frente a la islas. Para la zona sur de la bahía: (3) con sentido NO frente al estero de Punta Banda. Frente a la playa municipal: (4) se observa una trayectoria hacia el O. En el cañón de Todos Santos: (5) con dirección NO, paralela al eje de éste. Para la región externa: (6) existe una concordancia con el patrón residual obtenido del modelo de Sunamura-Horikawa (Figura 7).

4. Discusión

4.1. Modelos de transporte

El modelo de Sunamura y Horikawa (1971) es el más básico y originalmente solo se aplica de manera unidireccional, identificando la fuente del material sedimentario y el destino final de las partículas, sobre la base de comparación de dos parámetros texturales (μ y σ). El no emplear a la simetría como un criterio de comparación complementario parece hacer menos sensible este modelo para identificar un intercambio de material entre dos estaciones e inferir trayectorias de transporte. De esta forma solo se observa el desplazamiento y una mejoría en la

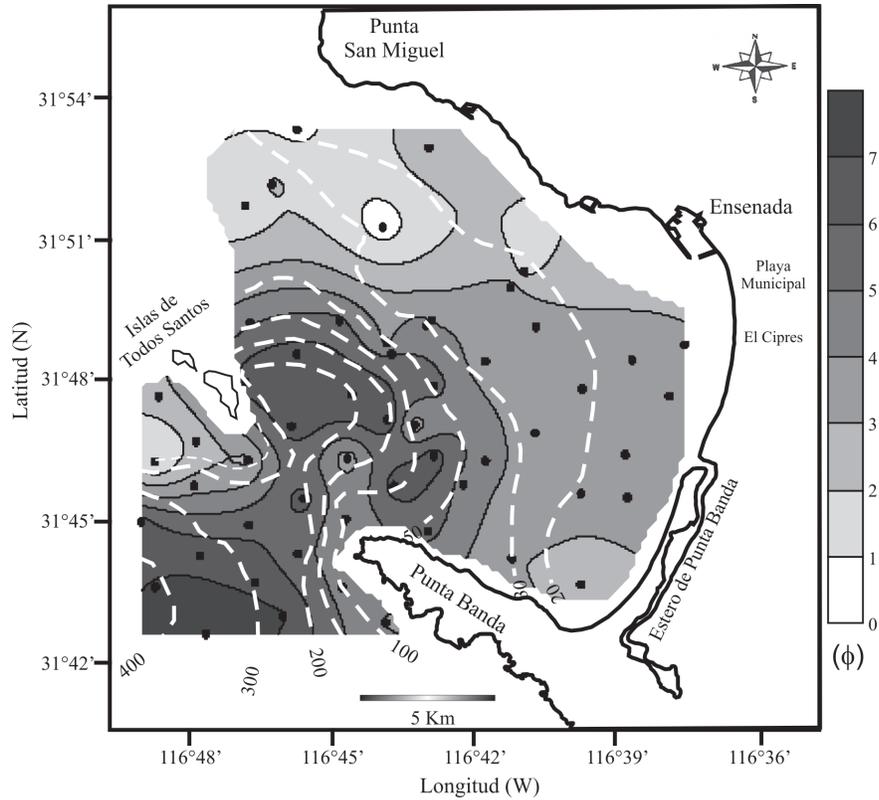


Figura 2. Distribución espacial del tamaño de grano medio (ϕ) de los sedimentos superficiales de la Bahía de Todos Santos, B.C. Las líneas segmentadas corresponden con la batimetría de la bahía a intervalos de 10 m, 50 m y 100 m.

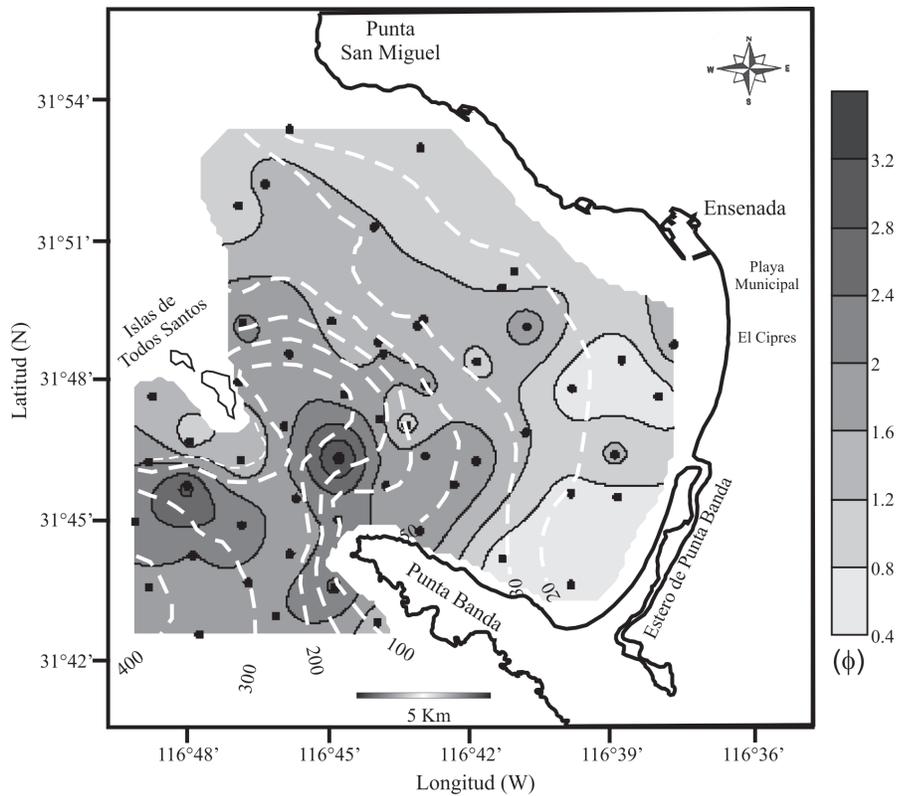


Figura 3. Distribución espacial de la clasificación (ϕ) de los sedimentos superficiales de la Bahía de Todos Santos, B.C. Las líneas segmentadas corresponden con la batimetría de la bahía a intervalos de 10 m, 50 m y 100 m.

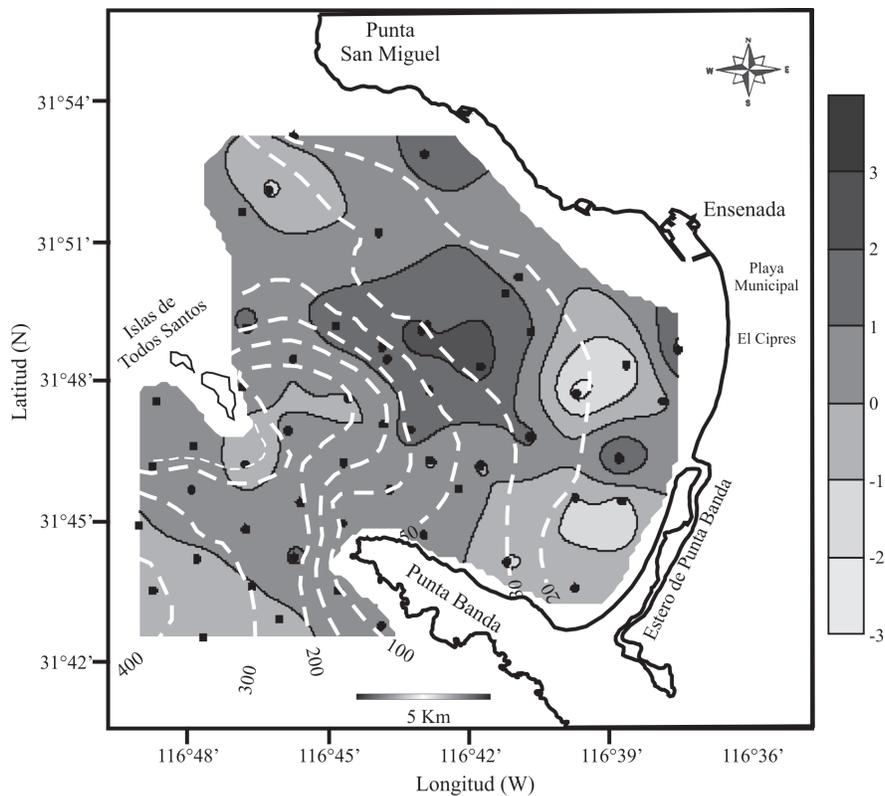


Figura 4. Distribución espacial de la asimetría de los sedimentos superficiales de la Bahía de Todos Santos, B.C. Las líneas segmentadas corresponden con la batimetría de la bahía a intervalos de 10 m, 50 m y 100 m.

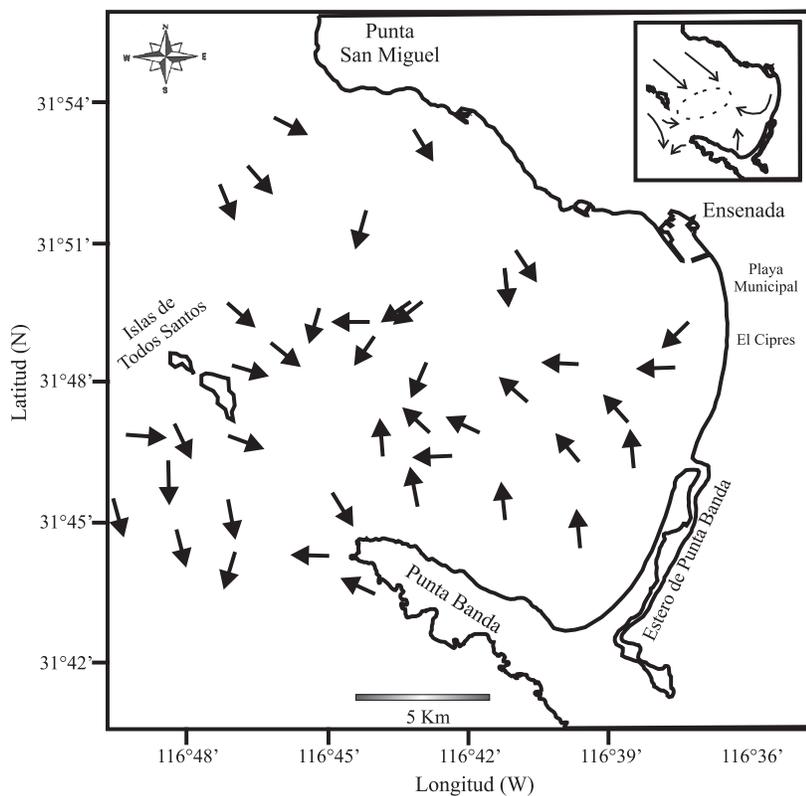


Figura 5. Patrón residual de transporte de los sedimentos superficiales de la Bahía de Todos Santos, B.C. Modelo unidimensional de Sunamura y Horikawa (1971).

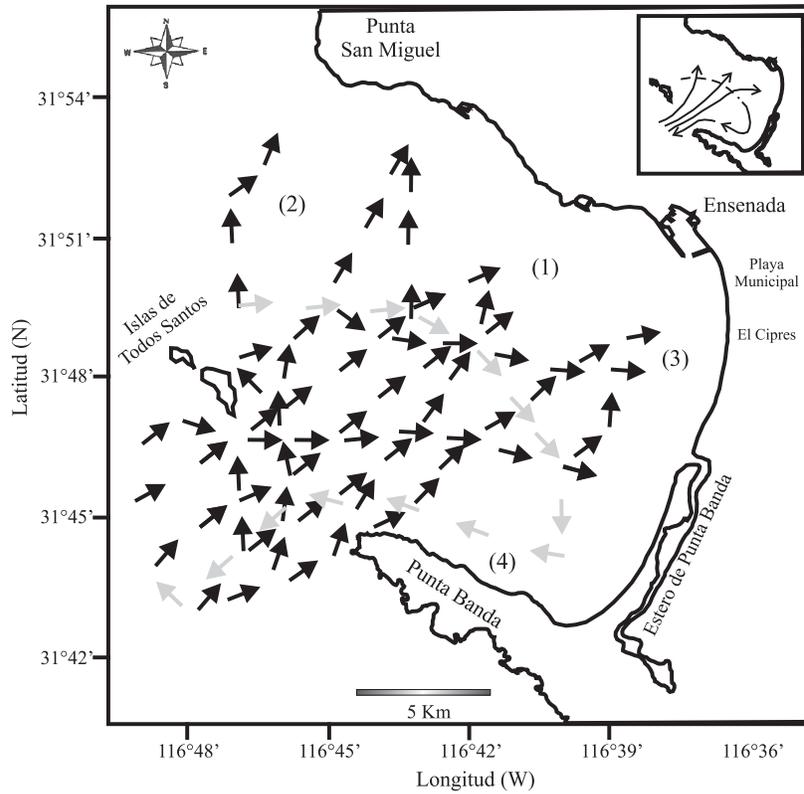


Figura 6. Patrón residual de transporte de los sedimentos superficiales de la Bahía de Todos Santos, B.C. Modelo unidimensional de Mc Laren y Bowles (1985).

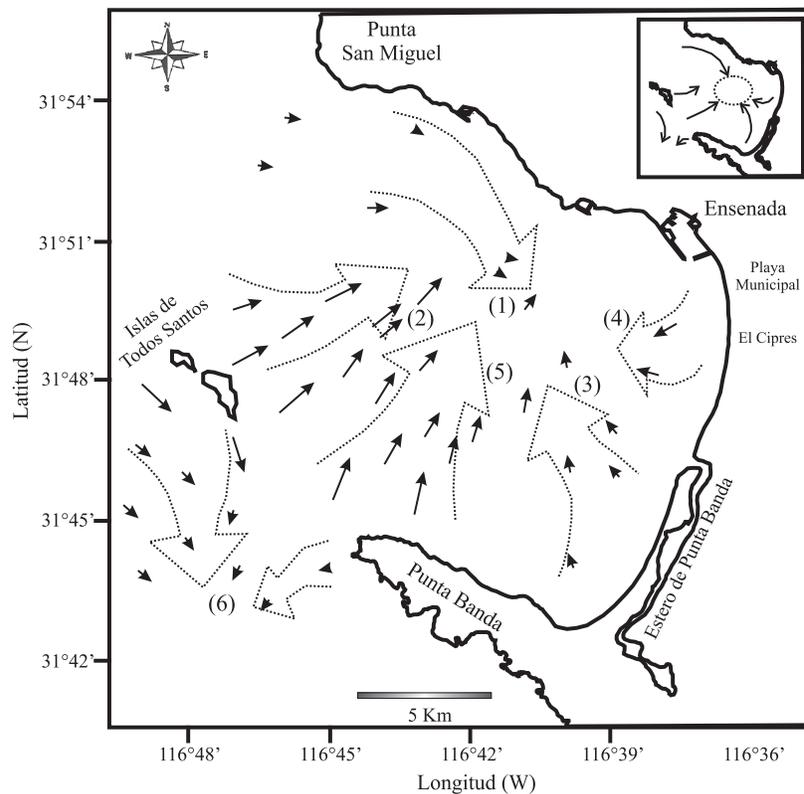


Figura 7. Patrón residual de transporte de los sedimentos superficiales de la Bahía de Todos Santos, B.C. Modelo bidimensional de Gao y Collins (1994).

clasificación, sin tomar en cuenta el comportamiento real de la distribución del sedimento (Poizot *et al.*, 2008). Al aplicar un análisis de componentes principales a los datos texturales de los sedimentos en la BTS, el factor uno constituido por el tamaño de grano medio y la clasificación explicó el 51% de la variabilidad; mientras que, el factor 2 que corresponde a la asimetría explicó un 34% de la variabilidad. De esta forma, la asimetría es un criterio que debe ser considerado para definir las trayectorias de transporte (i.e., Sanchez *et al.*, 2008; Cheng *et al.*, 2004).

El método unidimensional de Mc Laren-Bowles fue desarrollado para estudios de ambientes longitudinales (ríos, playas y barras arenosas; Mc Laren, 1981; Mc Laren y Bowles, 1985). Para ello, este modelo analiza la evolución granulométrica a lo largo de líneas (secuencia de n muestras). Para estudiar un área más compleja y obtener trayectorias de transporte en dos dimensiones es necesaria una malla de 9×9 conteniendo 81 muestras (Mc Laren y Little, 1987). Sin embargo, los recientes comentarios de la aproximación unidimensional se presentan y soportan por Mc Laren *et al.* (2007), pero fueron cuestionadas por Le Roux y Rojas (2007). Por otra parte, Masselink (1992) concluye que el modelo unidimensional es limitado, pero esta crítica fue refutada eficazmente por Mc Laren (1993). Lanckneus *et al.* (1992) concluyen que solo el caso de sedimentos finos, bien clasificados y asimetría positiva es significativo para el modelo de Mc Laren-Bowles; aunque en este modelo no se observó este caso donde el transporte de sedimento resultó ser validado y concordante con las condiciones hidrodinámicas. Por lo que el modelo de Mc Laren y Bowles (1985) aplicado a 17 ambientes diferentes solo pudo ser válido en 7 ya que en el resto de los casos fue parcial o nulamente válido (Poizot *et al.*, 2008). De hecho, los resultados del presente estudio parecen confirmar que el modelo unidimensional tiene limitaciones en ambientes complejos como la BTS.

Gao y Collins (1992) desarrollaron un modelo bidimensional sencillo de aplicar. Los vectores de tendencia son determinados a través de una malla de muestreo comparando los parámetros texturales de estaciones “vecinas”. Las estaciones “vecinas” se determinan sobre la base de una distancia característica que representa la escala espacial de muestreo. Sin embargo, la resultante de este análisis vectorial puede verse afectada por la magnitud de la distancia característica; en otras palabras, si la distancia característica es demasiado grande puede promover un cambio en la dirección de los vectores residuales de transporte, dando como resultado una dirección no representativa del transporte. Para ello se aplicaron varias distancias a la definida como característica y diferentes densidades de muestreo ($\pm 50\%$) para observar este efecto en el resultado del modelo; a pesar de estas variaciones no se presentó ninguna diferencia con respecto al resultado obtenido empleando la distancia característica.

Aunque muchos estudios han usado el análisis de tendencias espaciales, muy pocos de ellos han comparado

las diferentes aproximaciones en términos de eficiencia. Lanckneus *et al.* (1992) compara los métodos de Mc Laren y Bowles (1985), y Gao y Collins (1992) para barras arenosas. Los resultados indicaron que el modelo de Gao y Collins (1992) fue más eficaz ya que permitió una distinción entre áreas dominadas por flujos y reflujos de marea. Liu *et al.* (2002) estudiaron un cañón submarino y sus áreas adyacentes comparando ambos modelos con un método de análisis de función ortogonal empírica. Los tres métodos se complementaron pero ninguno de ellos fue capaz de proporcionar las trayectorias de transporte de sedimentos. Ríos *et al.* (2002, 2003) comparan ambos modelos y los resultados obtenidos están en concordancia con el análisis de corrientes y fotografías aéreas. Aunque, el método unidimensional tiende a confundir la escala espacial de los procesos de transporte de sedimentos y, a lo sumo, puede representar la trayectoria de sedimentos a macroescala. En este contexto, parece más realista utilizar un enfoque bidimensional para tener en cuenta la escala espacial (mesoescala o microescala) (Gao y Collins, 1991; Masselink, 1992; Ríos *et al.*, 2002, 2003). Los estudios realizados por el método bidimensional son pocos y en todos ellos tienen casos mixtos del análisis de tendencias espaciales (Carriquiry y Sánchez, 1999; Carriquiry *et al.*, 2001; Ríos *et al.*, 2002; 2003). Con esta combinación de los casos, parece más fácil obtener una buena correlación entre los resultados proporcionados por el análisis de tendencias espaciales y otros métodos de investigación de corrientes marinas (Poizot *et al.*, 2008).

4.2. Patrón de dispersión

El patrón de dispersión propuesto para la BTS presenta algunas tendencias, que a excepción del cañón, concuerdan con el patrón general de circulación superficial (Argote-Espinoza *et al.*, 1975; Álvarez-Sánchez *et al.*, 1988) y la corriente litoral (Pérez-Higuera y Chee-Barragán, 1984) propuestos para la localidad (Figura 1). En las zonas someras, el material sedimentario puede ser trasladado y retrabajado por la corriente litoral para ser llevado fuera de la zona de rompiente por procesos de transporte perpendicular a la costa (e.g., Cruz-Colín, 1994). Esto permite identificar la existencia de un intercambio de material para aquellas estaciones cercanas a la playa. Carriquiry-Beltrán (1985) encuentra una disminución en la cantidad de minerales pesados de la boca norte hacia la parte central de la bahía, justo en el mismo sentido de transporte propuesto en este trabajo; asumiendo que las concentraciones más altas de minerales pesados se encuentran en la fuente del material, y que van disminuyendo en la dirección del movimiento (e.g., Carriquiry y Sánchez, 1999). Mientras que el transporte observado en la región central de la bahía con dirección SE, puede ser debido a la transferencia de material hacia su interior (Cruz-Colín, 1994), producto de la convergencia de las corrientes litorales en la zona (Pérez-Higuera y Chee-Barragán, 1984).

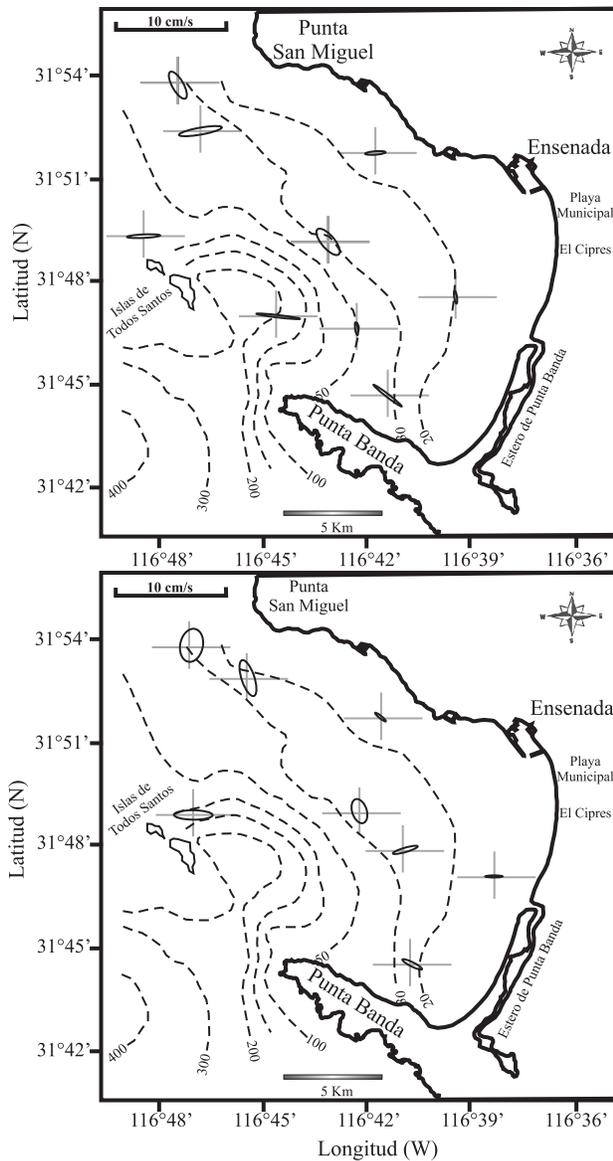


Figura 8. Corriente y elipses componentes de frecuencias de la marea para la banda uno ($f = 0.04167$ ciclos/h), y para la banda dos ($f = 0.08333$ ciclos/h). La orientación de las elipses indica la dirección predominante del movimiento de la onda. Las líneas segmentadas corresponden con la batimetría de la bahía a intervalos de 10 m, 50 m y 100 m.

En la región norte de la bahía cercana a las islas se observa un transporte hacia el NE. Las elipses componentes de las bandas uno (diurna) y dos (semidiurna) de la marea, las cuales indican la orientación predominante del movimiento de la onda coinciden con la dirección de transporte propuesta en este estudio (Figura 8). Los efectos hidrodinámicos de los procesos mareales, como las corrientes residuales, pueden ser la causa del movimiento en esta zona. No obstante, las estaciones 9, 46, 47, 49, 51, 52 y 54 que definen esta tendencia se ven afectadas por los materiales exógenos provenientes del dragado del puerto y que son vertidos en esta zona, por lo que las tendencias

espaciales y las trayectorias de transporte se deben de tomar con cierta precaución.

En el caso particular de los cañones submarinos son depresiones abruptas en la plataforma continental que comúnmente actúan como canal de conducción del material terrígeno erosionado de los continentes hacia las cuencas profundas (Kennet, 1982). A pesar de esto, la dirección de transporte propuesto por este trabajo para el cañón no concuerda con la dinámica del movimiento sedimentario esperado (Figura 7).

Fuera de la zona de rompiente, los procesos que toman lugar cerca del fondo juegan un papel importante en la resuspensión y transporte de material sedimentario (Ribberick y Abdullah, 1994; Liu *et al.*, 2002). Estos pueden ser el resultado de la circulación originada por viento (oleaje local), no obstante, en condiciones normales el efecto de este oleaje seguramente no es explicativo para el área del cañón por ser esta una zona muy profunda. En condiciones de tormenta, sin embargo, el oleaje puede mover sedimentos a profundidad cercanas a los 200 m provocando un movimiento neto de material en la dirección del oleaje extremo (Bearman *et al.*, 1989). Esto podría ayudar a explicar hasta cierto punto el transporte de sedimentos de zonas profundas a zonas más someras en la región del cañón que son influenciadas por los efectos del oleaje de tormenta.

Otros factores que pueden ser importantes son la onda de marea (Shepard *et al.*, 1974) y las ondas internas propagándose a lo largo de la plataforma continental. La importancia dinámica esencial de las últimas radica en que parecen ser el eslabón que permite la transmisión de energía de la parte superior del océano hacia el interior del mismo (González-González, 1984). La generación de ondas internas toma lugar principalmente en el talud continental adyacente a la plataforma. En su avance hacia la costa, debido a sus grandes amplitudes y pendientes, rápidamente se vuelve no lineal debido a la cercanía de la superficie del océano con el fondo (Sandstrom y Elliot, 1984), transformándose en ondas con una parte delantera muy escarpada (Konyaev y Sabini, 1992). Si bien las mareas pueden considerarse como ondas internas, estas se manifiestan en oscilaciones periódicas de las velocidades de corrientes, en la temperatura, salinidad y otras características fisicoquímicas. Presentan grandes amplitudes y actúan en la dinámica de toda la masa de agua de la plataforma continental (Filonov *et al.*, 1996).

Estas han sido estudiadas por Shepard *et al.* (1974) quienes evidenciaron una propagación de este tipo de ondas hacia la costa con altas velocidades ($>0.5 \text{ m s}^{-1}$), las cuales disminuyen en forma directa con la profundidad. En un estudio realizado por Cruz-Colín (1997) se calcularon las velocidades de aproximación de la onda de marea a diferentes profundidades dentro de la bahía, encontrando un valor promedio de 0.20 m s^{-1} ; sin embargo, menciona también que la velocidad parece aumentar en forma directa con la profundidad, calculando velocidades de 0.32 m s^{-1} con una profundidad de 476 m. Estas magnitudes son capaces

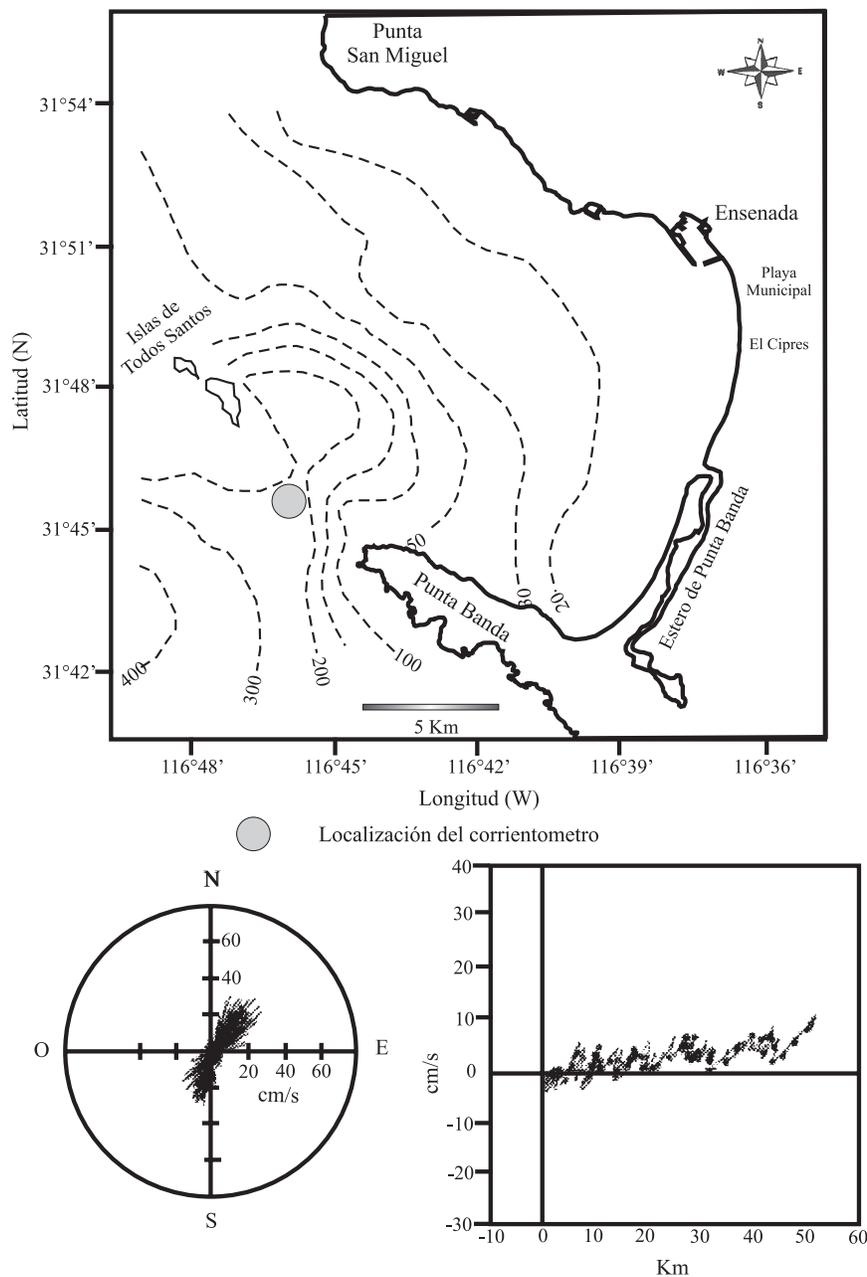


Figura 9. Medición de corrientes en el cañon a 308 m de profundidad (profundidad de fondo 390 m). Localización del correntómetro con su diagrama de rosa de corrientes y diagrama de vectores progresivo. Tomado de García *et al.* (1994). Las líneas segmentadas corresponden con la batimetría de la bahía a intervalos de 10 m, 50 m y 100 m.

de resuspender (Shepard y Keller, 1978) y transportar (Komar, 1977) materiales de 3ϕ a 5ϕ . El cálculo de estas velocidades han sido corroborados mediante una serie de mediciones de corrientes, las cuales alcanzan los 0.30 m s^{-1} a una profundidad de 308 m en el cañón (Figura 9; García *et al.*, 1994). Además de identificar una dirección neta de flujo hacia el NO, la cual concuerda con la obtenida por este trabajo.

Si bien es cierto que la marea es un movimiento armónico, el efecto topográfico de la costa y del fondo afecta

la simetría de la onda dando lugar a corrientes residuales de marea (García-Silva y Marinone, 1997). Gavidia-Medina (1988) cálculo las corrientes residuales de marea para la BTS e identifica un giro anticiclónico en el área del cañón; el cual presenta mayores magnitudes hacia el interior que en sentido opuesto. Por lo anterior, las corrientes residuales de marea pueden llegar a ser lo suficientemente importantes en el movimiento neto del material sedimentario.

Los cañones submarinos pueden funcionar como una trampa estructural de material sedimentario (Galindo-

Bect *et al.*, 1984; Macias-Zamora *et al.*, 2002). Estos son activos si presentan un flujo neto hacia abajo a lo largo del cañón, mientras que aquellos que no presentan materiales gruesos en las regiones profundas (e.g., arenas gruesas) son denominados como muertos o inactivos (Shepard y Marshall, 1973). En estos últimos se han identificado flujos con velocidades de 0.44 m s^{-1} , capaces de transportar sedimentos pendiente arriba (Shepard y Marshall, 1973; Shepard y Keller, 1978). La posibilidad de un transporte pendiente arriba parece intuitivamente difícil, sin embargo, es posible que las condiciones hidrodinámicas presentes en el área sean capaces de promover un movimiento neto de material sedimentario en este sentido. La existencia de flujos con velocidades lo suficientemente elevadas (0.30 m s^{-1}), capaces de resuspender y transportar el sedimento (3ϕ y 4ϕ) hace pensar que, de alguna manera, los diferentes procesos como la Contracorriente de California, las ondas internas propagándose hacia la costa o las corrientes residuales de marea, independientemente o combinados, puedan promover el movimiento de partículas en el sentido propuesto por este trabajo.

El patrón de dispersión de los sedimentos propuesto para la bahía parece dar lugar a la formación de un sitio de convergencia en la región central de esta, con ello se daría lugar al estancamiento de partículas arrojadas al medio (e.g., contaminantes) en esta zona.

5. Conclusiones

Los modelos de transporte de sedimentos aplicados a las tendencias texturales de la BTS indicaron que los modelos unidimensionales de Sunamura-Horikawa y Mc Laren-Bowles no describieron las trayectorias de transporte de sedimento y no concuerdan con las condiciones hidrodinámicas de la bahía. El modelo bidimensional de Gao-Collins mostró las mejores trayectorias de transporte de sedimento para la bahía, las cuales se ajustaron a las corrientes superficiales, subsuperficiales y de fondo que han sido descritas para la bahía. De manera general, en la BTS se define un transporte de sedimentos de las zonas costeras y de las Islas de Todos Santos que convergen hacia la parte central de la bahía, indicando con ello de que esta zona se daría lugar al estancamiento de partículas arrojadas al medio (e.g., contaminantes). Sin embargo, la convergencia de los vectores de transporte tiene que ser corroborada con otras aproximaciones o bien tener una red de muestreo más fina que permita confirmar esta hipótesis. En la región externa de la bahía, el transporte inferido es hacia el O.

6. Agradecimientos

Nosotros damos las gracias al M.C. René Navarro, Director de la Estación Oceanográfica de la Secretaría de Marina, por proporcionar las muestras para este estudio. Al

M.C. Oscar Delgado del IIO-UABC por aportar los datos de los corrientómetros. A los revisores por sus valiosas sugerencias al presente trabajo.

7. Referencias

- Alvarez-Sánchez, L.G., Hernández-Walls, R., Durazo-Arvizu, R., 1988, Patrones de deriva de trazadores lagrangeanos en la Bahía de Todos Santos: *Ciencias Marinas*, 14, 135-162.
- Argote-Espinoza, M.L., Amador-Buenrostro, A., Morales-Zuñiga, C., 1975, Distribución de los Parámetros de Salinidad y Temperatura y Tendencias de la Circulación en la Bahía de Todos Santos, B. C.: Ensenada, Baja California, Escuela Superior de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California, tesis de licenciatura.
- Bearman, G., Brown, C.A., Park, D., Phillips, R., Wright, D., 1989, *Ocean Chemistry and Deep Sea Sediments*: Open University, Pergamon Press, 134 p.
- Carriquiry-Beltrán, J.D., 1985, Análisis de la distribución de materiales pesados presentes en los sedimentos clásicos de la Bahía de Todos Santos, B.C.: Ensenada, Baja California, Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California, tesis de licenciatura.
- 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, V.F., 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.
- Cruz-Colín, M.E., 1994, Balance sedimentario de la Bahía de Todos Santos, B.C., México: Ensenada, Baja California, Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California, tesis de licenciatura.
- Cruz-Colín, M.E., 1997, Variabilidad de temperatura del mar en la Bahía de Todos Santos, B.C., México: Ensenada, Baja California, Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California, tesis de maestría en ciencias.
- Filonov, A.E., Monzón, C., Tereshchenko, L., 1996, Acerca de las condiciones de generación de las ondas internas de marea en la costa occidental de México: *Ciencias Marinas*, 22, 255-272.
- Galehouse, L., 1971, Sedimentation Analysis, in Carver R.E.(ed), *Procedures in Sedimentary Petrology*: Wiley Interscience, New York, 64-69.
- Galindo-Bect, M.S., Segovia-Zavala, J.A., Rivera-Duarte, I., 1984, Contenido de materia orgánica en sedimentos superficiales de la Bahía Todos Santos, B.C.: *Ciencias Marinas*, 10, 91-102.
- 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.
- Gao, S., Collins, M.B., Lanckneus, J., De Moor, G., Van Lancker, V., 1994, Grain size trends associated with sand sediment transport patterns; an example from the Belgian continental shelf: *Marine Geology*, 121, 171-185.
- García-Silva, G., Marinone, S.G., 1997, Modelado de corrientes residuales en el Golfo de California mediante la utilización de diferentes tamaños de malla: *Ciencias Marinas*, 23, 505-519.
- García, C., Robles, P.M., Figueroa, C.C., Delgado, G.O., 1994, Observaciones de corrientes y temperatura en la Bahía de Todos Santos, RC. Durante Noviembre de 1993-Enero 1994:

- Comunicaciones Académicas, Serie Oceanográfica Física, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.
- Gavidia-Medina, J., 1988, Simulación Numérica de la Circulación Barotrópica en la Bahía de Todos Santos, Francisco: Ensenada, Baja California, Departamento de Oceanografía Física, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, tesis de maestría.
- González-González, A., 1984, Efecto de la viscosidad, estratificación y rotación en el comportamiento de las ondas internas: Ensenada, Baja California, Escuela Superior de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California, tesis de licenciatura.
- González-Villagrán, A., 1992, Reevaluación de los Estudios Utilizados para el Diseño del Puerto de Ensenada, B.C.: Ensenada, Baja California, Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California, tesis de licenciatura.
- Ingram, D.L., 1971, Sieve analysis, in Carver, R.E.(ed), Procedures in Sedimentary Petrology: New York, Wiley Interscience, 49-68.
- Kennet, J., 1982, Marine Geology: Incoo Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice-Hall.
- Komar, D.P., 1977, Selective longshore transport rates of different grain-size fractions within a beach: Journal of Sedimentary Petrology, 47, 1444-1453.
- Konyaev, K.D., Sabini, K.D., 1992, Waves inside the ocean: Saint-Petersburg, Gidrometizdat.
- Lanckneus, J., De Moor, G., De Schaepmeester, G., Meyers, I., Spiers, V., 1992, Residual sediment transport directions on a tidal sand bank. Comparison of the «Mc Laren model» with bedform analysis: Bulletin de la Association Belge d'Etudes Géographiques, 2, 425-446.
- Le Roux, J.P., Rojas, E.M., 2007, Sediment transport patterns determined from grain-size parameters; overview and state of the art: Sedimentary Geology, 202 (3), 473-488.
- 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.
- Macías-Zamora, J.V., Mendoza-Vega, E., Villaescusa-Celaya, J.A., 2002, PAHs composition of surface marine sediments: a comparison to potential local sources in Todos Santos Bay, B.C., Mexico: Chemosphere, 46, 459-468.
- Masselink, G., 1992, Longshore variation of grain size distributions along the coast of the Rhone Delta, Southern France; a test of the "Mc Laren Model": Journal of Coastal Research, 8, 286-291.
- McCave, I.N., 1978, Grain-size trends and transport along beaches; an example from eastern England: Marine Geology, 28, 43-51.
- McManus, L., 1988, Grain size determinations and interpretation, in Tucker M. (ed.), Techniques in Sedimentology: Oxford, Blackwell.
- Mc Laren, P., 1981, An interpretation of trends in grain size measures: Journal of Sedimentary Petrology, 51, 611-624.
- Mc Laren, P., 1993, Discussion of Masselink G., 1992, Longshore variation of grain size distribution along the coast of the Rhône Delta, southern France; a test of the Mc Laren Model: Journal of Coastal Research, 8, 286-291.
- 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., Little, D.I., 1987, The effects of sediment transport on contaminant dispersal; an example from Milford Haven: Marine Pollution Bulletin, 18, 586-594.
- 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., Hill, S.H., Bowles, D., 2007, Deriving transport pathways in a sediment trend analysis (STA): Sedimentary Geology, 202 (3), 489-498.
- Mook, D.H., Hoskin, C.M., 1982, Organic determinations by ignition; caution advised: Estuarine, Coastal and Shelf Science, 15, 697-699.
- Nordstrom, K.F., 1981, Differences in grain size distribution with shoreline position in a spot environment: Northeast Geology, 3, 252-258.
- Nordstrom, K.F., 1989, Downdrift coarsening of beach foreshore sediments at tidal inlets; an example from the coast of New Jersey: Earth Surface Processes and Landforms, 14, 691-701.
- Pederos, R., Howa, H.L., Michel, D., 1996, Application of grain size trend analysis for the determination of sediment transport pathways in intertidal areas: Marine Geology, 135, 35-49.
- Pérez-Higuera, R., Chee-Barragán, A., 1984, Transporte de Sedimentos en la Bahía de Todos Santos, B. C. México: Ciencias Marinas, 10, 31-52.
- Pettijohn, F.G., Potter, P.D., Siever, R., 1972, Sand and Sandstone: New York, Springer-Verlag.
- Poizat, E., Méar, Y., Biscara, L., 2008, Sediment Trend Analysis through the variation of granulometric parameters. A review of theories and applications: Earth-Science Reviews, 86, 15-41.
- Ribberick, S.J., Abdullah, A., 1994, Sediment transport in oscillatory boundary layers in cases of rippled beds and sheet flow: Journal of Geophysical Research, 99, 12707-12727.
- Ríos, F., Cisternas, M., Le Roux, J., Correa, I., 2002, Seasonal sediment transport pathways in Lirquen Harbor, Chile, as inferred from grain-size trends: Investigaciones Marinas, Valparaiso, 30, 3-23.
- Ríos, F., Ulloa, R., Correa, I., 2003, Determination of net sediment transport patterns in Lirquén Harbor, Chile, through grain-size trend analysis; a test of methods: Pesquisas em Geociências, 30, 65-81.
- Sandstrom, H., Elliot, A., 1984, An internal tide and solutions on the Scotia shelf; a nutrient pump at work: Journal of Geophysical Research, 89, 6415-6426.
- Sánchez, A., Alvarez-Legorreta, T., Sáenz-Morales, R., Ortiz-Hernández, M.C., López-Ortiz, B.E., Aguiñiga, S., 2008, Distribución de parámetros texturales de los sedimentos superficiales en la Bahía de Chetumal: Implicaciones en la inferencia de transporte: Revista de la Sociedad Geológica Mexicana, 25, 523-532.
- Shepard, F.P., Marshall, N.F., 1973, Currents along of submarine canyons: The American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 57, 244-264.
- Shepard, F.P., Keller, G.H., 1978, Currents and sedimentary processes in submarine canyons off the northeast United States: Geological Research Division Report, Scripps Institution of Oceanography.
- Shepard, F.P., Marshall, N.F., McLoughlin, P.A., 1974, "Internal Waves"; advancing along submarine canyons: Science, 183, 195-198.
- Sunamura, T., Horikawa, K., 1971, Predominant direction of littoral transport along Kujyukuri Beach, Japan: Coastal Engineering in Japan, 14, 107-117.

Manuscrito recibido: 23 de Junio 2008.

Manuscrito corregido recibido: 27 de Agosto 2008.

Manuscrito aceptado: 2 de Septiembre 2008.