

TRANSPORTE DE SEDIMENTO POR TRACCIÓN DE MAREA EN EL ESTERO DE PUNTA BANDA, BAJA CALIFORNIA, MÉXICO

Modesto Ortiz¹, Laura Huerta-Tamayo² y Alejandro Hinojosa³

¹ Depto. de Oceanografía Física, CICESE

² Facultad de Ciencias Marinas, UABC

³ Depto. de Geología, CICESE

RESUMEN

En este trabajo se estima la capacidad del flujo y reflujo de la marea para transportar sedimento por tracción en el canal principal y en la boca del Estero de Punta Banda, acoplando un modelo numérico-hidrodinámico con un modelo de transporte de sedimento. En los resultados de la simulación numérica se observa un flujo neto de sedimento hacia afuera del estero suficiente para mantener la condición natural de autodragado en la región de la boca. Sin embargo, hacia el interior del estero el transporte de sedimento resulta considerablemente menor que en la región de la boca y prácticamente nulo en la región de la cabeza. Se plantea un segundo escenario en el que se abre una boca artificial en la parte sur del estero, manteniendo abierta la boca natural, y se estiman los cambios en el patrón de circulación y de transporte de sedimento. Esta condición de dos bocas resulta inestable para el estero ya que en ambas el reflujo pierde la capacidad de expulsar sedimento, por lo que éstas tienden a cerrarse; la boca artificial se cierra primero dando lugar a que la boca norte recupere su área natural. Finalmente, se discute la importancia del aporte de arena proveniente de los arroyos tributarios en el proceso de recarga de arena del interior de la barra del estero. La recarga de arena en la región de la boca del estero es importante para mantener las playas aledañas mediante el mecanismo de autodragado. En contraste, el aporte de arena pronostica un azolve inminente en la región de la cabeza del estero en caso de recurrencia de eventos de escurrimiento pluvial similares a los ocurridos en los años 1979-1983.

INTRODUCCIÓN

El estero de Punta Banda es una laguna costera que se localiza en la Bahía de Todos Santos, en el noroeste de la Península de Baja California, México (Figura 1). El cuerpo del estero, en forma de "L", tiene una longitud de ~10 Km y un ancho promedio de 2 Km que incluye el área de marismas. Una barra de arena de ~8 Km de longitud separa a la bahía del estero. El intercambio de agua y de sedimento entre la bahía y el estero está dominado por la marea y se lleva a cabo a través de una boca natural de ~125 metros de ancho situada en su extremo norte. La velocidad máxima del flujo y reflujo de agua es ~1.5 m/s en la boca durante las mareas vivas y disminuye gradualmente hasta 0.1 m/s hacia la cabeza del estero (Pritchard *et al.*, 1978).

El estero de Punta Banda es una región en donde las actividades antropogénicas podrían afectar significativamente el proceso natural de erosión-depositación y consecuentemente podrían ocasionar modificaciones permanentes no deseables, tanto en su configuración interna como en la de las playas aledañas. Entre las actividades que pudieran afectar el equilibrio natural de erosión-depositación de este cuerpo de agua se pueden mencionar: la extracción de arena de los arroyos, la urbanización de áreas de marisma, la construcción de diques y la apertura de bocas artificiales en la barra de arena. Un paso previo para evaluar el posible impacto de estas actividades es comprender el mecanismo de transporte de sedimento en este cuerpo de agua y cuantificar la capacidad del canal principal para transportar sedimento por tracción. Por este motivo

se hizo una estimación de la capacidad de transporte neto de sedimento de fondo en el canal principal del estero, acoplado el modelo de transporte de sedimento por tracción de Sternberg (1972), con el modelo numérico-hidrodinámico de Goto *et al.* (1997). Una vez calibrados y acoplados ambos modelos, es posible analizar el flujo de sedimento en el canal principal del estero, considerando casos hipotéticos de fuentes o sumideros de sedimento. En este caso se analizó la capacidad de transporte de sedimento por tracción en la boca y en el canal principal del estero durante un ciclo de mareas vivas, para el estero natural con una sola boca y para el caso de apertura de una boca artificial en el extremo sur del estero.

SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA HIDRODINÁMICA DEL ESTERO DE PUNTA BANDA

El objetivo de simular numéricamente la hidrodinámica del estero es obtener la distribución espacio-temporal de la velocidad del flujo y reflujo de agua inducido por la marea. Aún cuando esta distribución de velocidad puede obtenerse con mediciones directas, es importante calibrar el modelo numérico-hidrodinámico con la batimetría de una sola boca para poder modificar artificialmente la batimetría y analizar los posibles cambios en el patrón de corrientes y su efecto en el transporte de sedimento. El modelo numérico-hidrodinámico de Goto *et al.* (1997), consiste en la integración en diferencias finitas centrales de las ecuaciones de conservación de masa y momento para ondas largas en aguas poco profundas:



Figura 1. Estero de Punta Banda. Fotografía del INEGI tomada el 6 de noviembre de 1993. En la figura se indica la dirección y la posición de los transectos en donde se obtuvieron los perfiles batimétricos que se muestran en la figura 2.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0,$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{U^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{UV}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gm^2}{D^{7/3}} U \sqrt{U^2 + V^2} = 0, (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{UV}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{V^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gm^2}{D^{7/3}} V \sqrt{U^2 + V^2} = 0.$$

En el conjunto de ecuaciones (1), t es el tiempo, η representa el desplazamiento vertical de la superficie del agua respecto al nivel de medio del mar (NMM), g es la aceleración gravitacional, h la profundidad media de la columna de agua (modelo digital de la batimetría). $D = (\eta + h)$ representa la profundidad instantánea de la columna de agua. U y V son las velocidades (integradas verticalmente) del flujo de agua en las direcciones longitudinal (x) y meridional (y), respectivamente. El parámetro de rugosidad de Manning, m , se emplea para calibrar la fuerza de fricción en el fondo.

La batimetría del estero se obtuvo mediante observaciones de profundidad con ecosonda en las áreas navegables y mediante fotografía aérea en las áreas de marisma. Los datos se interpolaron en una cuadrícula de 25 metros por lado con un total de 391×167 nodos. La batimetría del estero se caracteriza por un canal principal bien definido a lo largo del cuerpo del estero, a cuyos lados se extienden zonas de marisma que se cubren y descubren con la marea. La profundidad del canal principal disminuye gradualmente desde de 10 m en la boca hasta 2 m en la cabeza. La configuración lateral y longitudinal del canal principal se ilustra en la Figura 2, en donde se muestran las profundidades correspondientes a los 9 transectos batimétricos que se señalan en la Figura 1. En la Figura 3 se muestra el modelo digital de la batimetría del estero correspondiente al año 1989. Huerta-Tamayo (2002), describe en detalle la metodología para confeccionar el modelo digital de la batimetría.

El modelo numérico-hidrodinámico se calibró con observaciones de la velocidad del flujo de agua tomadas a un metro sobre el fondo en el canal principal del estero. La calibración consistió en hacer variar el parámetro de rugosidad de Manning para disminuir la magnitud de la velocidad hasta que ésta coincidiera con las observaciones. Se eligió el valor de $m = 0.025$. La localidad en donde se obtuvieron las observaciones se indica en la Figura 3. Durante el período de las observaciones (18:00 hrs, 7 de mayo de 1985 – 6:00 hrs, 10 de mayo de 1985) se obtuvieron datos de nivel del mar (Figura 4) y de velocidad de la corriente (Figura 5) a un metro bajo la superficie del agua y a un metro sobre el fondo a intervalos de una hora. La diferencia en la magnitud de la velocidad observada en los dos diferentes niveles indica que la fricción es un factor importante en la dinámica del estero, motivo por el que se justifica el término de fricción en las ecuaciones (1). El cociente entre la velocidad del fondo y de la superficie es aproximadamente 0.8. La elección de la velocidad de fondo para calibrar el modelo-hidrodinámico se debe a que en el modelo de transporte de sedimento de Sternberg (1972), la fuerza de arrastre que el agua ejerce sobre el fondo se calcula con la velocidad a un metro del fondo. En la frontera abierta del modelo, que corresponde a la boca natural del estero, se suplieron los datos de nivel del mar del Puerto de Ensenada correspondientes al ciclo de mareas del 1 al 12 de mayo de 1985. En las Figuras 6 y 7 se comparan los resultados del modelo con las observaciones de nivel del mar y de velocidad de la corriente a un metro del fondo. El signo negativo en la velocidad indica agua saliendo del estero (reflujo). A manera de ilustración se muestran los resultados del modelo correspondientes a la distribución espacial del campo de velocidad en un instante durante el flujo (Figura 8) y en un instante durante el reflujo (Figura 9). Con fines prácticos se seleccionaron 12 localidades a lo largo del canal principal del estero para estimar el transporte de sedimento. En la Figura 10 se muestran los vectores que corresponden a la máxima velocidad alcanzada durante el flujo y reflujo de la marea (resultados del modelo) del 1 al 12 de mayo de 1985 en las 12 localidades a lo largo del canal principal del estero, en donde se puede observar una disminución gradual en la magnitud de la velocidad hacia la cabeza del estero. También se observa que la magnitud de la velocidad del reflujo, a lo largo del canal, es mayor que la del flujo. Esto se debe a que durante las mareas vivas el nivel del mar sube en dos etapas hasta alcanzar el máximo y baja en una sola etapa hasta alcanzar el mínimo (Figura 6). En la Tabla 1 se muestran

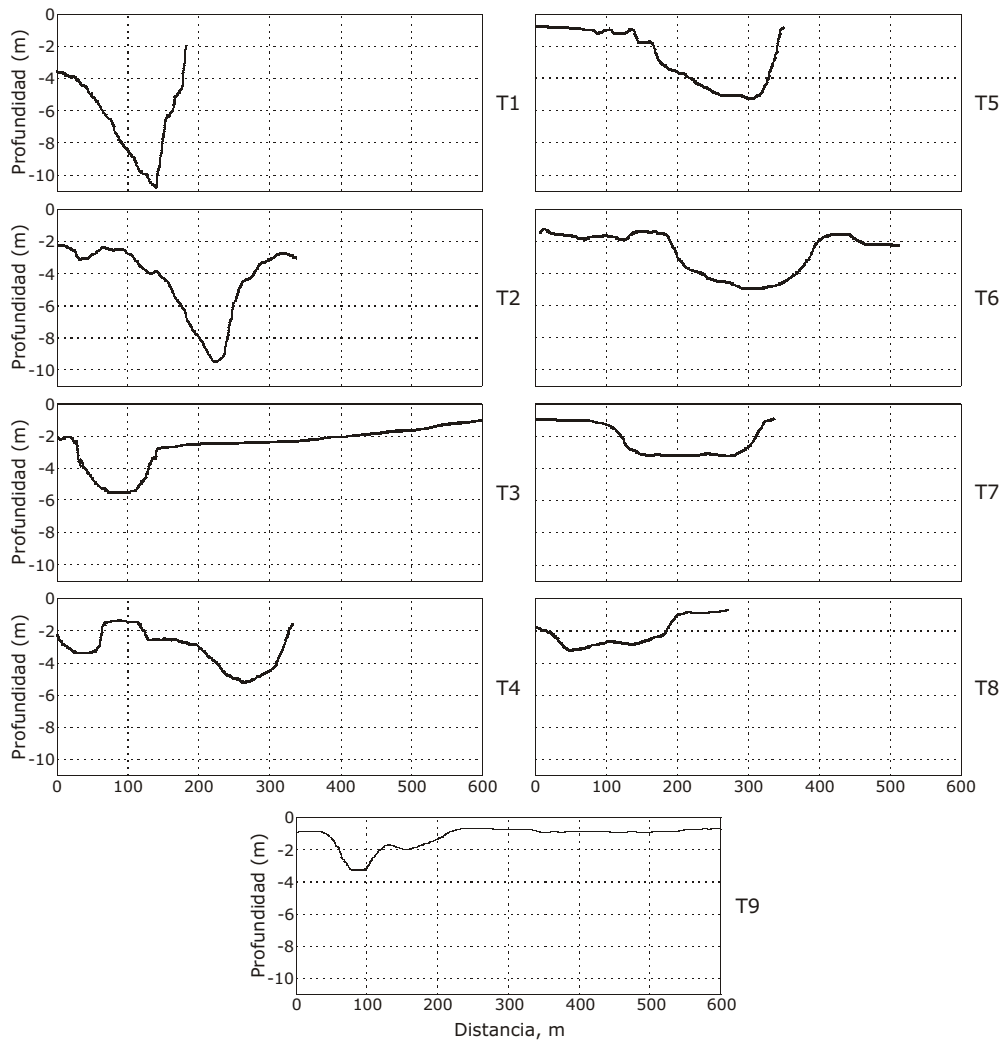


Figura 2. Perfiles batimétricos a lo largo de los 9 transectos indicados en la Figura 1. El eje horizontal indica la distancia a partir de la barra de arena. Profundidades con respecto al NMM de 1989.

los valores máximos de velocidad del flujo y reflujos en las 12 localidades señaladas en la Figura 10. Los resultados del modelo (velocidad y elevación) se obtuvieron a intervalos de tiempo de 15 minutos.

Tabla 1. Magnitud de la velocidad máxima del flujo y reflujos a lo largo del Estero de Punta Banda durante el ciclo de mareas del 1 al 12 de mayo de 1985 (resultados del modelo). Las localidades se señalan en la Figura 10. El signo negativo indica agua saliendo del estero.

Localidad	Flujo, cm/s	Reflujos, cm/s
1 (boca)	103	-126
2	31	-65
3	63	-68
4	65	-79
5	42	-59
6	39	-56
7	38	-42
8	56	-57
9	26	-27
10	22	-24
11	16	-18
12 (cabeza)	4	-6

MODELO DE TRANSPORTE DE SEDIMENTO POR TRACCIÓN

La capacidad de transporte de sedimento de fondo en el canal principal del estero de Punta Banda se estimó para arenas finas no consolidadas con tamaño de grano de 0.19mm (2.4 ϕ) a 0.93mm (0.1 ϕ). La textura del sedimento a lo largo del canal principal del estero varía desde arena fina (0.19 mm; 2.4 ϕ) en la región de la boca, proveniente de la playa, hasta limos arcillosos (0.03 mm; 5 ϕ) hacia la cabeza, provenientes de la marisma (Ames-Sigala, 1985). Únicamente se consideró el mecanismo de tracción (esfuerzo superficial) que ejerce el flujo de agua sobre el sedimento, sin considerar la fuerza de cohesión molecular entre los granos de sedimento. El transporte de sedimento fino (limos y arcillas) no se consideró cuantitativamente en este estudio. El mecanismo de transporte de sedimento fino en suspensión es por difusión turbulenta (Bagnold, 1963). Cuando el sedimento fino se deposita, la fuerza de cohesión molecular entre los granos de sedimento no permite que se desprenda del fondo o que se desplace por tracción con la relativa facilidad con la que se desplazan los granos de arena.

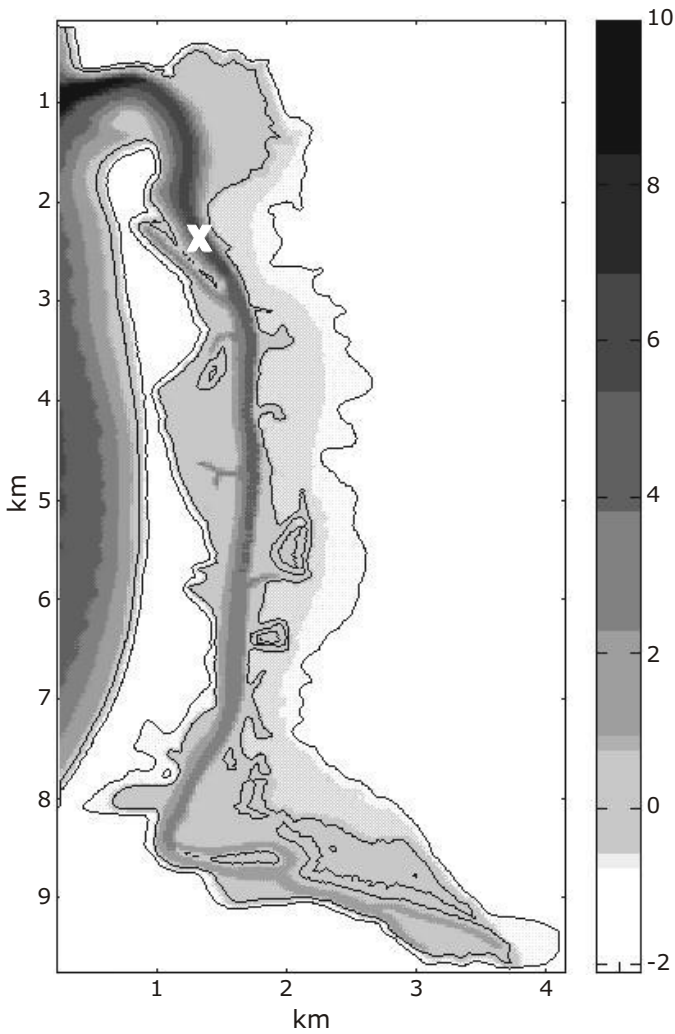


Figura 3. Modelo digital de la batimetría del Estero de Punta Banda (Huerta-Tamayo, 2002). La escala de gris indica las profundidades en metros con respecto al NMM. Los contornos corresponden a las isóbatas de cero y de un metro sobre el NMM. Se indica con una X el lugar en donde se obtuvieron las observaciones de velocidad y de nivel del mar.

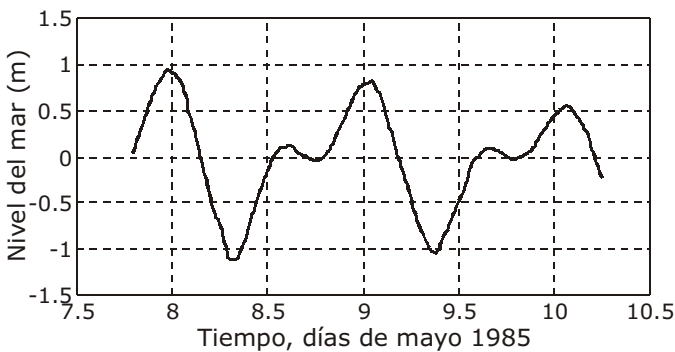


Figura 4. Observaciones del nivel del mar en el Estero de Punta Banda. En la Figura 3 se indica el lugar en donde se obtuvieron las observaciones.

Para estimar el transporte de sedimento por tracción se empleó el modelo de Sternberg (1972), que a su vez está basado en la teoría de Bagnold (1963):

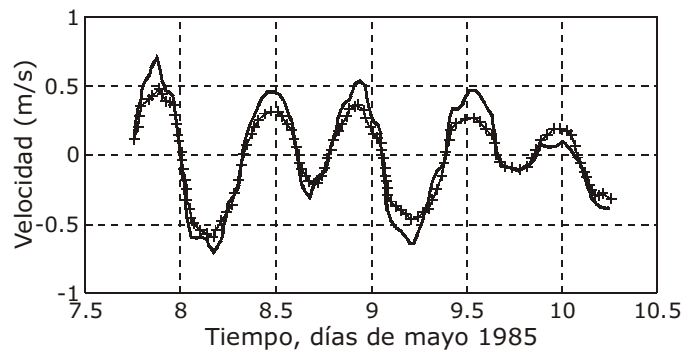


Figura 5. Observaciones de velocidad de corriente en el centro de canal principal del Estero de Punta Banda a un metro bajo la superficie (línea continua) y a un metro sobre el fondo (línea con cruces). En la Figura 3 se indica el lugar en donde se obtuvieron las observaciones. El signo negativo indica agua saliendo del estero (reflujo).

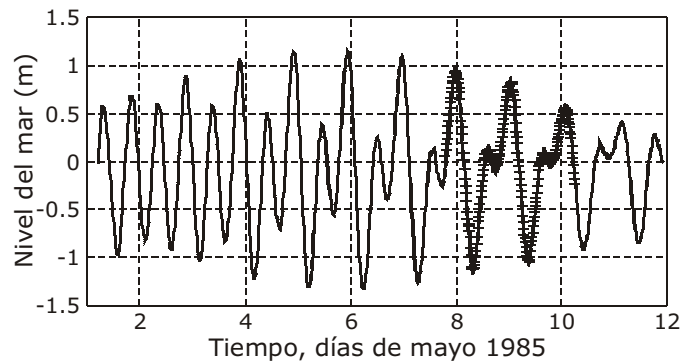


Figura 6. Comparación de las observaciones de nivel del mar en el Estero de Punta Banda (línea con cruces) con los resultados del modelo numérico-hidrodinámico (línea continua). Plano de referencia (NMM).

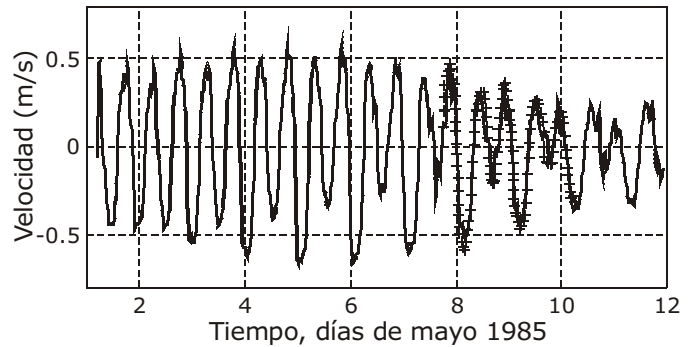


Figura 7. Comparación de las observaciones de velocidad de la corriente a un metro del fondo (línea con cruces), con la velocidad de la corriente obtenida del modelo numérico-hidrodinámico (línea continua). El signo negativo indica agua saliendo del estero (reflujo).

$$\left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho_s} \right) gj = K\rho U_*^3, \quad (2)$$

en donde j es el flujo de masa de sedimento por unidad de longitud transversal al flujo ($\text{gm cm}^{-1}\text{s}^{-1}$); g es la aceleración de la gravedad; ρ es la densidad del fluido; ρ_s es la densidad del sedimento; U_* es la

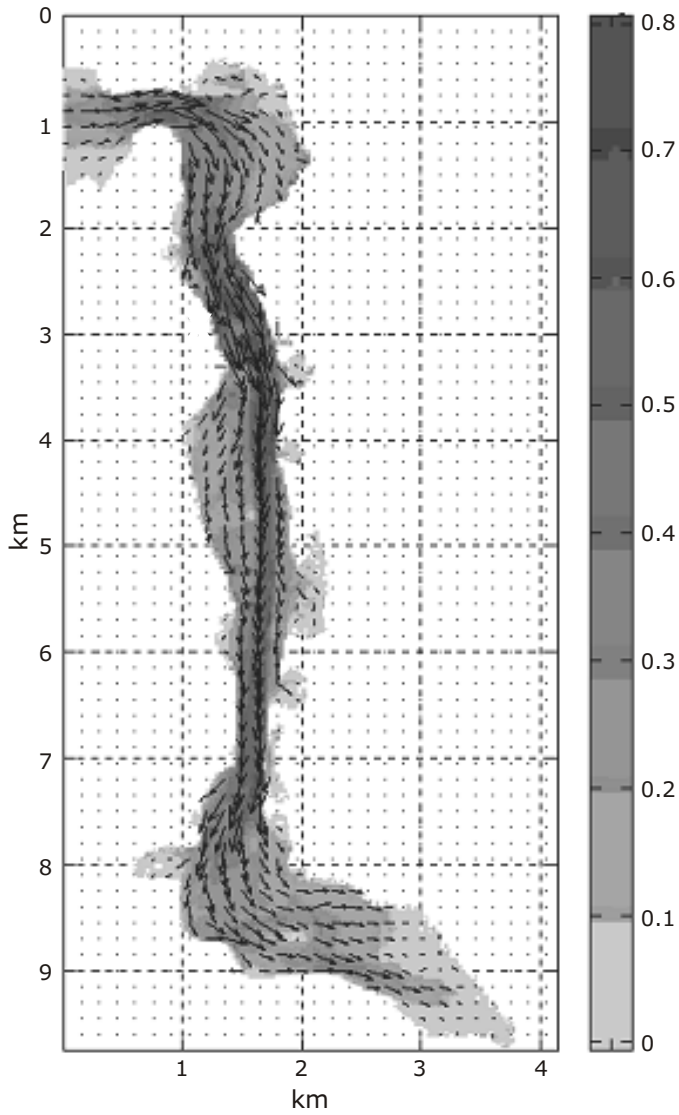


Figura 8. Distribución espacial de la velocidad en un instante durante el flujo (resultados del modelo). La escala de gris indica la magnitud de la velocidad en metros por segundo.

velocidad friccional (una medida de la fuerza de arrastre) y K es el factor de proporcionalidad que expresa la habilidad del flujo de agua para transportar sedimento.

La definición de la velocidad friccional esta basada en la Ley del esfuerzo cuadrático de la velocidad:

$$\tau_o \propto \rho U_z^2, \quad (3)$$

donde τ_o es el esfuerzo que el flujo de agua ejerce sobre el fondo y U_z es la velocidad promedio del flujo de agua a una distancia z sobre el fondo. Sternberg (1968) determinó la constante de proporcionalidad de (3) mediante una serie de experimentos en 6 canales de marea en donde la velocidad promedio se midió a 100 cm del fondo. A esta constante adimensional de proporcionalidad (C_{100}) se le conoce como coeficiente de arrastre. Para fondos arenosos naturalmente clasificados $C_{100} = 3 \times 10^{-3}$, y el esfuerzo de fondo adquiere la forma:

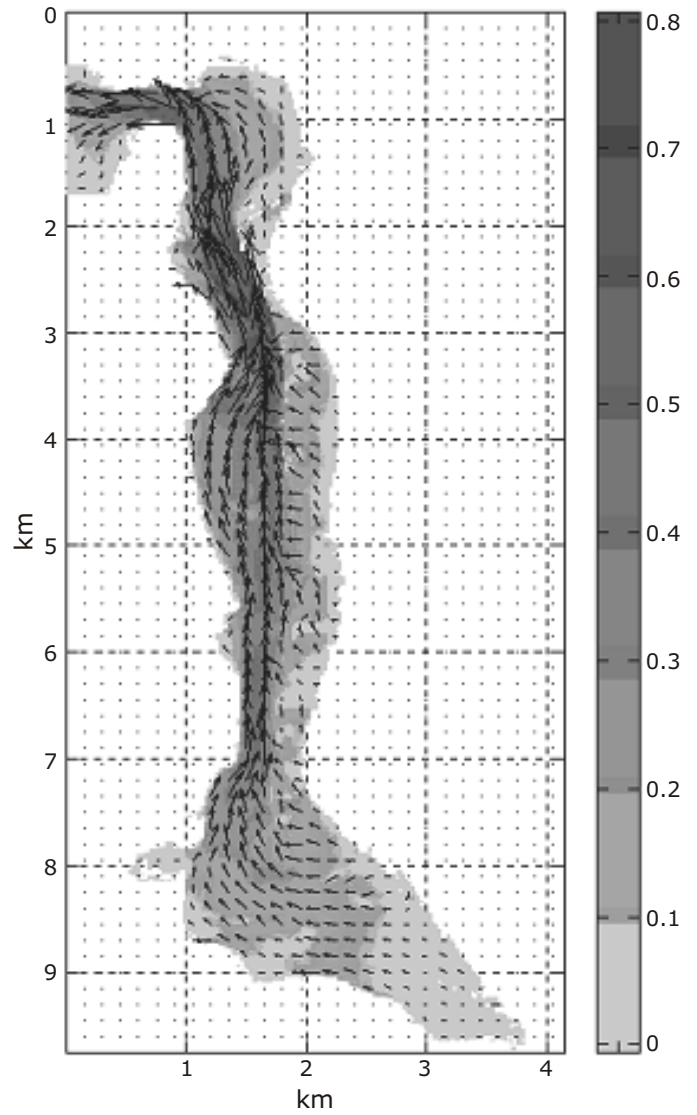


Figura 9. Distribución espacial de la velocidad en un instante durante el refluo (resultados del modelo). La escala de gris indica la magnitud de la velocidad en metros por segundo.

El hecho de considerar que la densidad del fluido no cambia significativamente durante el flujo y refluo de la marea permite despejar (4) para facilitar su uso:

$$\tau_o = 3 \times 10^{-3} \rho U_{100}^2. \quad (4)$$

$$U_* = \sqrt{\frac{\tau_o}{\rho}} = 5.47 \times 10^{-2} U_{100}, \quad (5)$$

la expresión en el radical es proporcional a la velocidad promedio del flujo de agua a 100 cm del fondo y se conoce como velocidad friccional debido a que tiene unidades de velocidad. La velocidad promedio del flujo de agua a 100 cm del fondo U_{100} es la variable que permite acoplar el modelo hidrodinámico con el modelo de transporte de sedimento.

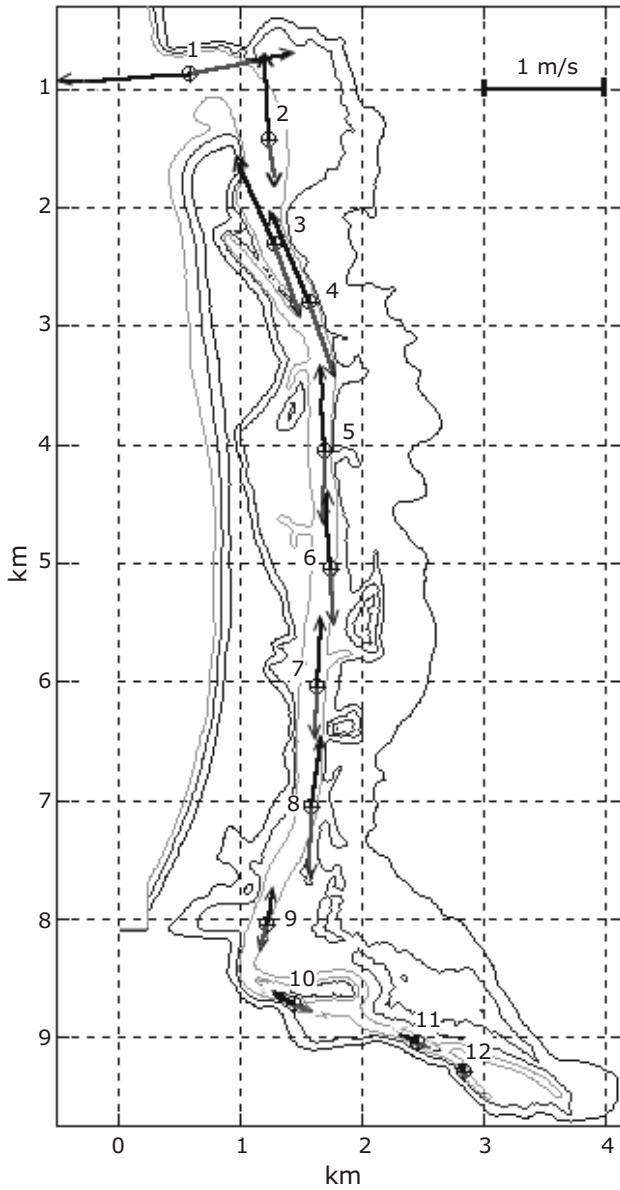


Figura 10. Velocidad máxima alcanzada durante el flujo y reflujo de la marea durante el ciclo de marea del 1 al 12 de mayo de 1985 en 12 localidades a lo largo del canal principal del estero. La escala de velocidad se muestra en el extremo superior derecho de la figura.

El factor de proporcionalidad K relaciona el transporte de sedimento con el trabajo que el flujo de agua ejerce sobre el fondo y su valor depende del tamaño de grano del sedimento y del esfuerzo relativo (la diferencia relativa entre el esfuerzo del flujo sobre el fondo y el esfuerzo crítico necesario para mantener en movimiento los granos de sedimento):

$$\log K = \frac{3.301}{C(\phi)} \cdot \frac{\tau_o - \tau_c}{\tau_c} - 2.301, \quad (6)$$

donde $\frac{\tau_o - \tau_c}{\tau_c}$ es el esfuerzo relativo y $C(\phi)$ es un parámetro que se mantiene constante para cada tamaño de grano. Los valores de $C(\phi)$ se indican en la Tabla 2.

Tabla 2. Valores del parámetro $C(\phi)$ en función del diámetro del grano (Sternberg, 1972).

$C(\phi)$	Diámetro (mm)	Diámetro (unidades ϕ)
11	0.19	2.39
10.7	0.28	1.83
4.45	0.45	1.15
1.5	0.93	0.1

El factor de proporcionalidad K fue determinado por Sternberg (1972), ajustando una función logarítmica a los datos experimentales de Guy *et al.* (1966), para tamaños de grano de 0.19 mm; 0.28 mm; 0.45 mm y 0.93 mm. Los valores de K propuestos por Sternberg se muestran en la Figura 11.

El esfuerzo crítico τ_c se determina con la ecuación (4) considerando el umbral de velocidad necesario para mantener en movimiento los granos de sedimento (curva inferior en la Figura 12). El umbral de velocidad necesario para iniciar el movimiento del sedimento, y el umbral de velocidad en el que el sedimento deja de moverse, han sido investigados experimentalmente en laboratorio por diferentes autores (ej. Svedrup *et al.*, 1942; Bagnold, 1963; Inman, 1963; entre otros). Sternberg (1967, 1971) comparó los resultados de los experimentos de laboratorio con observaciones en canales de marea en Puget Sound, Washington y concluye que no hay diferencias significativas entre los umbrales de velocidad obtenidos en el campo y los obtenidos en laboratorio. En la Figura 12 se muestran ambos umbrales de velocidad en función del diámetro de grano determinados por Sternberg (1967, 1971). El umbral de velocidad para iniciar el movimiento de arenas de 0.19 mm, 0.28 mm, 0.48 mm y 0.93 mm, es 37.2 cm/s, 37.35 cm/s, 40.48 cm/s y 52.52 cm/s, respectivamente.

RESULTADOS

La capacidad de transporte de sedimento de fondo en el canal principal del Estero de Punta Banda se estimó en las 12 localidades indicadas en la Figura 10. En la Tabla 3 se muestra el volumen neto de sedimento V_s que ha sido transportado a través de cada una de las 12 secciones transversales al canal durante los 12 días del ciclo de marea considerado. El volumen de sedimento por unidad de tiempo (gasto Q_s) se calculó a intervalos de 15 minutos durante los 12 días del ciclo de marea. En las Figuras 13 y 14 se muestran los gastos Q_s correspondientes a las localidades 1 y 4 de la Figura 10. En las restantes localidades el gasto es menor a 0.01 m³/min. El volumen neto de sedimento o transporte neto de sedimento a través de una sección transversal del canal de ancho L , durante un tiempo t , se estimó con la ecuación:

$$V_s = \int_0^t Q_s(t) dt; \quad Q_s(t) = \frac{j(t)L}{\rho_s}, \quad (7)$$

donde se ha considerado el valor de $\rho_s = 2.65 \text{ gr/cm}^3$ para arenas finas de cuarzo y feldespato (Sundborg, 1967).

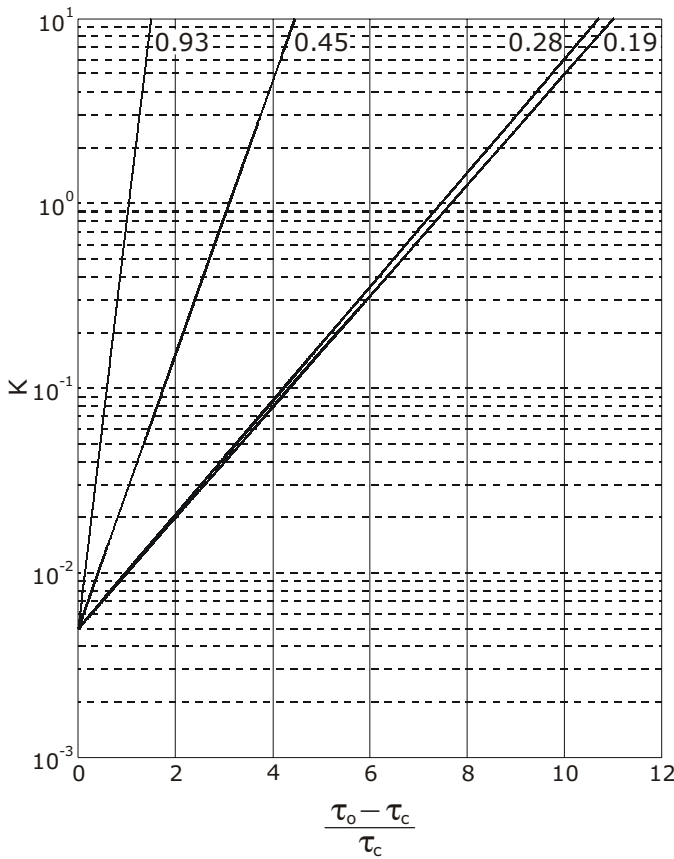


Figura 11. Factor de proporcionalidad K en función del esfuerzo relativo para tamaños de grano de 0.19 mm; 0.28 mm; 0.45 mm y 0.93 mm.

Tabla 3. Volumen neto de sedimento (V_s , metros cúbicos) a través de las 12 secciones transversales al canal principal durante los 12 días del ciclo de marea para tamaños de grano de 0.19 mm; 0.28 mm; 0.45 mm y 0.93 mm. Las localidades se señalan en la Figura 10. El signo negativo indica volumen neto saliendo del estero. Configuración del estero de una sola boca en la parte norte.

Localidad	V_s , m ³ ; (0.19 mm)	V_s , m ³ ; (0.28 mm)	V_s , m ³ ; (0.45 mm)	V_s , m ³ ; (0.93 mm)
1 (boca)	-1507	-1509	-1663	-1671
2	-1.33	-1.43	-20.84	-57.28
3	-1.17	-1.25	-47.07	-73.55
4	-21.48	-21.97	-329.35	-371.68
5	-0.90	-0.92	-7.10	-19.97
6	-0.02	-0.02	-0.03	-0.03
7	-0.26	-0.26	-1.32	-2.27
8	-0.09	-0.09	-0.30	-0.43
9	0.0	0.0	0.0	0.0
10	0.0	0.0	0.0	0.0
11	0.0	0.0	0.0	0.0
12 (cabeza)	0.0	0.0	0.0	0.0

Nota: El transporte neto (V_s) se calculó por separado para cada tamaño de grano suponiendo arenas homogéneas en el tamaño de grano. No deben sumarse los transportes estimados para los diferentes tamaños de grano.

En las Figuras 13 y 14 se puede observar que la mayor parte del transporte de sedimento ocurre únicamente durante 6 de los 12 días del ciclo de marea que se están considerando. En los restantes días del ciclo de marea el reflujó en la región de la boca del estero pierde su capacidad de dragar, dando oportunidad a que el oleaje acumule sedimento, que a su vez vuelve a ser expulsado durante las

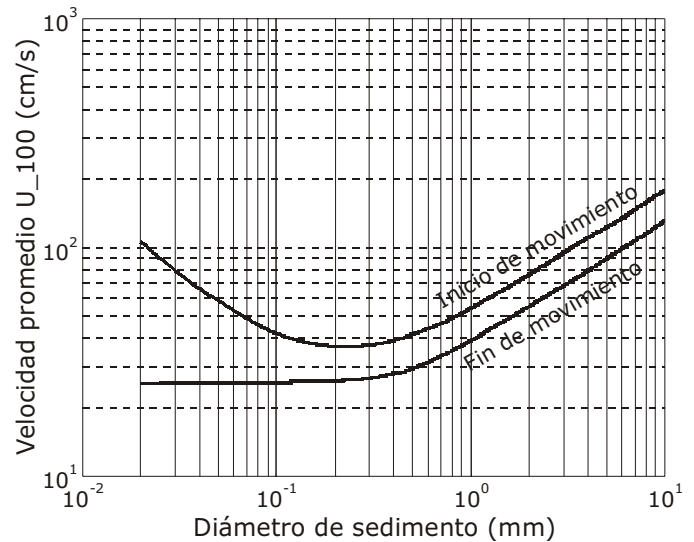


Figura 12. Umbrales de velocidad a 100 cm del fondo en función del diámetro del sedimento.

mareas vivas. Este proceso no significa que necesariamente en cada ciclo de mareas vivas el reflujó transporte ~ 1500 m³ de arena a través de la boca del estero. El proceso asegura que en condiciones extremas de transporte de sedimento hacia la boca, ya sea debido al oleaje o debido a la descarga del arroyo San Calos, el reflujó tiene capacidad de dragar ~ 1500 m³ por ciclo de marea hasta recuperar el área de la boca.

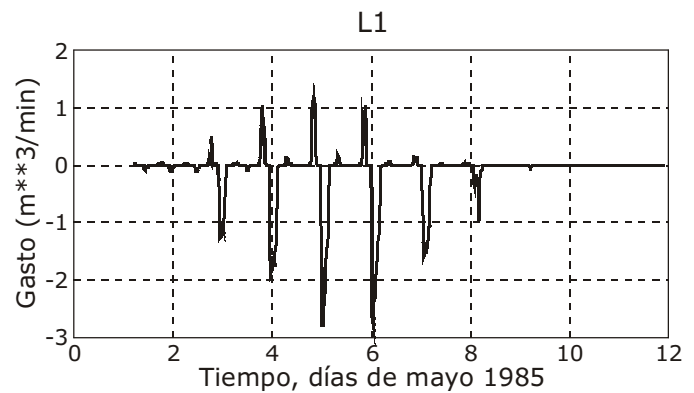


Figura 13. Transporte de sedimento (tamaño de grano 0.28 mm) a través de la boca del estero. El signo negativo indica transporte hacia fuera del estero.

Al interior del estero la capacidad de transporte de sedimento es considerablemente menor que la capacidad de transporte de sedimento en la región de la boca. El hecho de que la capacidad de transporte al interior del estero sea casi despreciable es un excelente resultado del modelo; si el transporte fuese mayor, el canal del estero estaría en proceso de erosión, lo que aumentaría su profundidad cada ciclo de mareas vivas, contrario a lo que se ha observado al paso de los años. Esta incipiente capacidad de transporte neto de sedimento actúa a manera de agente de limpieza del canal, evitando que las arenas provenientes de la región de la boca penetren al interior del estero. Es notable que hacia la cabeza del estero la capacidad de transporte de arena es nula.

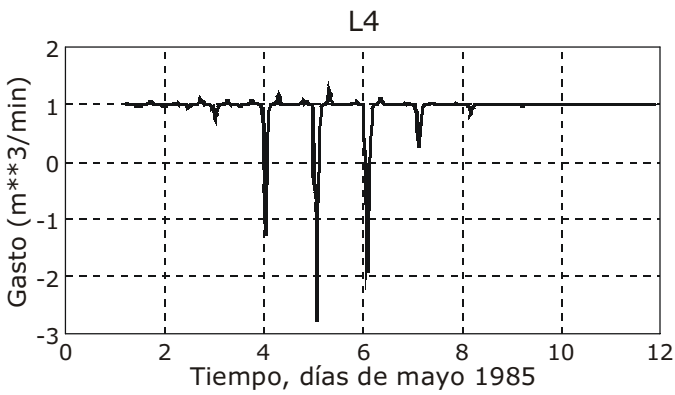


Figura 14. Transporte de sedimento a través de la sección transversal del canal principal en la localidad 4 indicada en la Figura 14. El signo negativo indica transporte hacia fuera del estero.

APERTURA SINTÉTICA DE UNA SEGUNDA BOCA EN LA PARTE SUR DEL ESTERO MANTENIENDO ABIERTA LA BOCA NATURAL

Una vez calibrados y acoplados ambos modelos (hidrodinámico y de transporte de sedimento) para un estero con una sola boca, se procedió a simular la apertura sintética de una segunda boca en la parte sur del estero para estimar el cambio en el patrón de corrientes y sus consecuencias en el transporte de sedimento. En el modelo hidrodinámico se suplieron simultáneamente en ambas bocas los datos de nivel del mar del Puerto de Ensenada correspondientes al ciclo de marea del 1 al 12 de mayo de 1985 (los mismos datos que en el caso anterior). La profundidad de la boca artificial se fijó en 8 metros con ancho de 125 m manteniendo fijo el ancho de la boca en la parte norte (aprox. 125 m). En la Figura 15 se muestran los vectores de máxima velocidad alcanzada durante el flujo y reflujó de la marea (resultados del modelo) en las 12 localidades a lo largo del canal principal del estero y en la localidad 13 que corresponde a la boca artificial en la parte sur del estero. En la Tabla 4 se indican las magnitudes correspondientes.

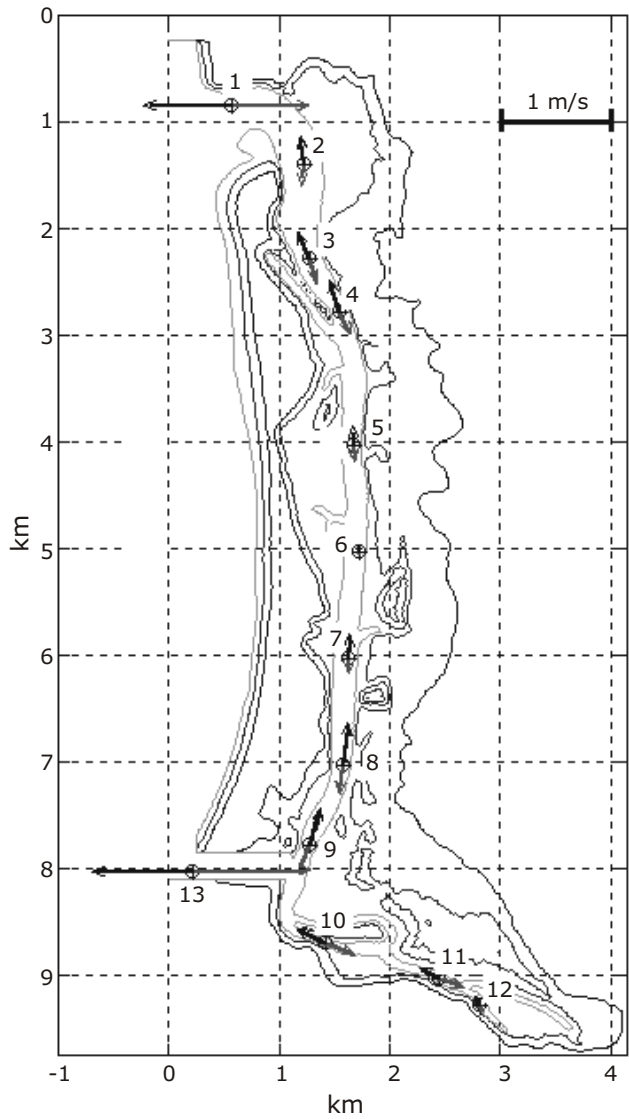


Figura 15. Velocidad máxima alcanzada durante el flujo y reflujó de la marea durante el ciclo de marea del 1 al 12 de mayo de 1985 en las 12 localidades a lo largo del canal principal del estero y en la localidad 13 que corresponde a la boca artificial en la parte sur del estero cuando ésta tiene 125 m de ancho y la boca norte se mantiene abierta. La escala de velocidad se muestra en el extremo superior derecho de la figura.

Tabla 4. Magnitud de la máxima velocidad del flujo y reflujó a lo largo del Estero de Punta Banda (resultados del modelo para el caso de un estero con dos bocas). Las localidades se señalan en la Figura 15. El signo negativo en las localidades 2 a 9 indica agua fluyendo en dirección de la boca norte. El signo negativo en las localidades 1 y 13 indica agua saliendo del estero.

Localidad	Flujo, cm/s	Reflujó, cm/s
1 (boca)	72	-75
2	12	-22
3	23	-29
4	20	-25
5	9	-12
6	-4	2
7	-19	10
8	-34	24
9	-22	20
13 (boca artificial)	102	-88
10	26	-24
11	20	-16
12 (cabeza)	6	-6

Con esta configuración de una boca natural y otra artificial se aprecian tres cambios importantes en el patrón de circulación. Como era de esperarse, la magnitud del máximo flujo y reflujó disminuye tanto en la boca norte como al interior del estero. En la boca norte la velocidad máxima durante el reflujó (agua saliendo) es ligeramente mayor que durante el flujo, mientras que lo contrario ocurre en la boca artificial: la velocidad máxima durante el flujo (102 cm/s) es mayor que durante el reflujó (-88 cm/s). En las localidades 2 a 9 (en el canal principal) las velocidades máximas están orientadas hacia la boca norte, lo que indica una circulación residual entrando por la boca sur y saliendo por la boca norte. Las velocidades máximas durante el flujo y reflujó disminuyen hacia el centro del cuerpo del estero a partir de ambas bocas. En particular, en la vecindad de la localidad 6 se aprecia una región de baja velocidad propicia para que el sedimento en suspensión se deposite tanto en el canal prin-

cial como a los lados de éste. En caso de mantener ambas bocas abiertas artificialmente, los lodos finalmente terminarían cubriendo el canal formando un área de marisma. Con excepción de las bocas, en las restantes localidades las velocidades máximas del flujo y reflujo no sobrepasan el umbral de velocidad necesario para iniciar el transporte de sedimento. En la Tabla 5 se muestra el volumen neto V_s de sedimento transportado durante los 12 días del ciclo de marea en ambas bocas. En la boca norte el transporte neto de sedimento es hacia afuera del estero mientras que en la boca sur el transporte neto es hacia adentro. Sin embargo, en ambas bocas el transporte neto de sedimento es insignificante, comparado con el transporte neto cuando solamente existe una sola boca. Este transporte neto insignificante indica que aun cuando en forma natural ambas bocas presentan una tendencia a cerrarse, la boca sur se cerraría primero, dando lugar a que la boca norte iniciase el proceso de autodragado hasta alcanzar el equilibrio entre el área de la boca y el prisma de marea. El prisma de marea es el volumen de agua dentro de una laguna costera comprendido entre los niveles de pleamar y bajamar, es decir, es el volumen de agua que la laguna intercambia con el océano cada ciclo de marea.

Tabla 5. Volumen neto de sedimento (V_s , metros cúbicos) a través de las 13 secciones transversales al canal principal durante los 12 días del ciclo de marea para tamaños de grano de 0.19 mm; 0.28 mm; 0.45 mm y 0.93 mm, para el caso en el que la boca artificial tiene 125 m de ancho. Las 13 localidades se señalan en la Figura 15. El signo negativo en las bocas indica volumen neto saliendo del estero.

Localidad	V_s , m ³ ; (0.19 mm)	V_s , m ³ ; (0.28 mm)	V_s , m ³ ; (0.45 mm)	V_s , m ³ ; (0.93 mm)
1 (boca)	-2.57	-2.83	-88.49	-157.86
2	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.0	0.0	0.0	0.0
6	0.0	0.0	0.0	0.0
7	0.0	0.0	0.0	0.0
8	0.0	0.0	0.0	0.0
9	0.0	0.0	0.0	0.0
13 (boca artificial)	71.86	72.12	98.66	120.08
10	0.0	0.0	0.0	0.0
11	0.0	0.0	0.0	0.0
12 (cabeza)	0.0	0.0	0.0	0.0

Nota: El transporte neto (V_s) se calculó por separado para cada tamaño de grano suponiendo arenas homogéneas en el tamaño de grano. No deben sumarse los transportes estimados para los diferentes tamaños de grano.

APERTURA SINTÉTICA DE UNA SOLA BOCA EN LA PARTE SUR CERRANDO LA BOCA NATURAL

Finalmente se hizo un experimento en el que se cerró artificialmente la boca norte dejando abierta la boca sur con un ancho de 125 m. Las velocidades máximas de flujo y reflujo se muestran en la Tabla 6.

En este caso la boca sur adquiere capacidad de autodragado comparable a la capacidad de autodragado en la boca norte cuando solamente existe la boca norte, por lo que la boca sur permanecería abierta en forma natural. El flujo neto de sedimento en el canal principal es ahora en dirección de la boca sur, por lo que al paso del tiempo aumentaría la profundidad del canal principal en la región de

Tabla 6. Magnitud de la máxima velocidad del flujo y reflujo a lo largo del Estero de Punta Banda. Resultados del modelo para el caso en el que el ancho de la boca artificial es de 125 y la boca norte se cierra artificialmente. Las localidades se señalan en la Figura 16. El signo negativo en las localidades 2 a 9 indica agua fluyendo en dirección de la boca norte. El signo negativo en las localidades 12 a 13 indica agua saliendo del estero.

Localidad	Flujo, cm/s	Reflujo, cm/s
1 (boca)	0	0
2	-5	5
3	-16	18
4	-23	23
5	-23	30
6	-29	30
7	-50	63
8	-81	93
9	-41	62
13 (boca artificial)	105	-128
10	21	-25
11	18	-18
12 (cabeza)	6	-7

la nueva boca. Sin embargo, en la cabeza del estero la velocidad no alcanza a sobrepasar el umbral de velocidad necesario para iniciar el arrastre de sedimento. En la región de la boca norte del estero, ahora cerrada, las velocidades son prácticamente nulas, por lo que esta región se convertiría en una trampa para todo grano de arena aportado por el arroyo San Carlos. En la Figura 16 se muestra el patrón de velocidades máximas de flujo y reflujo cuando únicamente permanece abierta la boca sur. En la Tabla 7 se muestra el correspondiente transporte neto de sedimento durante los 12 días del ciclo de marea para las 13 localidades a lo largo del estero indicadas en la Figura 16.

Tabla 7. Volumen neto de sedimento (V_s , metros cúbicos) para el caso en el que se cierra la boca norte y se mantiene abierta la boca artificial en la parte sur del estero. Las localidades se señalan en la Figura 16. El signo negativo en la boca artificial indica volumen neto saliendo del estero. El signo positivo en las localidades a lo largo del canal indica volumen neto en dirección de la boca artificial.

Localidad	V_s , m ³ ; (0.19 mm)	V_s , m ³ ; (0.28 mm)	V_s , m ³ ; (0.45 mm)	V_s , m ³ ; (0.93 mm)
1 (boca norte)	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.0	0.0	0.0	0.0
6	0.0	0.0	0.0	0.0
7	0.82	0.89	10.40	40.09
8	0.96	1.04	12.00	45.00
9	102	106	112	106
13 (boca artificial)	-1211	-1225	-1385	-1389
10	0.0	0.0	0.0	0.0
11	0.0	0.0	0.0	0.0
12 (cabeza)	0.0	0.0	0.0	0.0

Nota: El transporte neto (V_s) se calculó por separado para cada tamaño de grano suponiendo arenas homogéneas en el tamaño de grano. No deben sumarse los transportes estimados para los diferentes tamaños de grano.

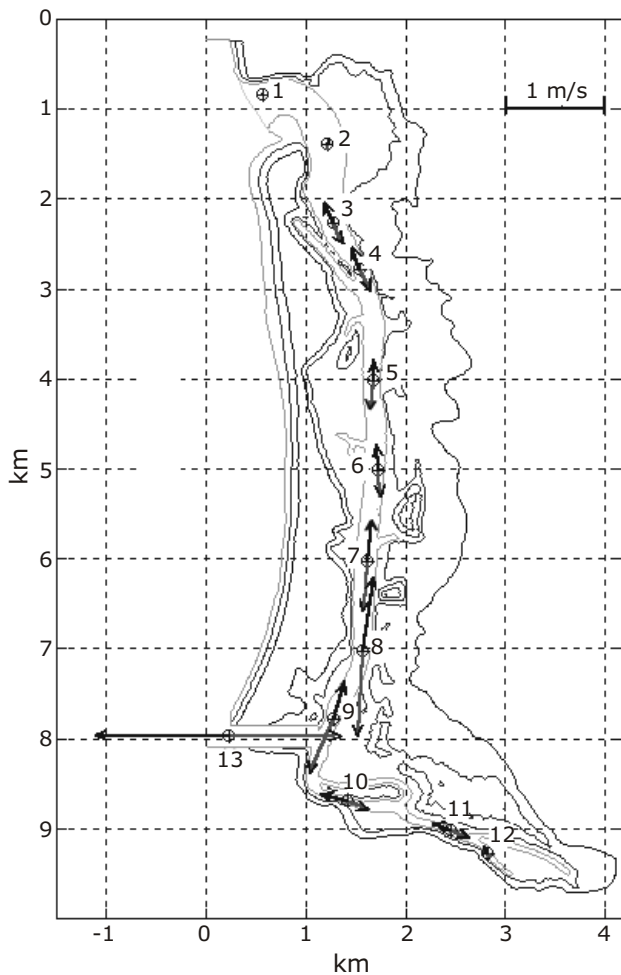


Figura 16. Velocidad máxima alcanzada durante el flujo y reflujo de la marea durante el ciclo de marea del 1 al 12 de mayo de 1985 en las 12 localidades a lo largo del canal principal del estero y en la localidad 13 que corresponde a la boca artificial en la parte sur del estero cuando ésta tiene 125 m de ancho y la boca norte se cierra artificialmente. La escala de velocidad se muestra en el extremo superior derecho de la figura.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El estero de Punta Banda, en su condición actual de una sola boca, mantiene un equilibrio natural de autdragado de arenas en la boca y en el canal principal en la región de la boca. El hecho de que la velocidad del reflujo sea mayor que la velocidad del flujo a lo largo del canal principal del estero propicia una circulación residual hacia afuera del estero. A su vez, la circulación residual previene la acumulación de sedimento en suspensión que continuamente está siendo diluido durante el flujo y es expulsado del estero durante el reflujo.

La cabeza del estero y la región del canal principal hacia la cabeza del estero no tienen capacidad para transportar sedimento por tracción, lo que convierte a la región de la cabeza en una trampa para todo grano de arena aportado por el arroyo San Antonio. Cabe mencionar que el aporte total de sedimento del Arroyo San Antonio durante el período 1972-1983 (Ávila-Serrano, 1983) fue de

2,537,231 m³, equivalente a un promedio anual de 230,657 m³/año. Por otra parte, el volumen desde el fondo hasta el nivel de pleamar media superior en la región de la cabeza del estero es de 6,930,000 m³ (volumen calculado con el modelo digital de la batimetría de 1989 entre el Km 7 y el Km 10 de la Figura 10). Con la razón de aporte de sedimento estimada por Ávila-Serrano, la región de la cabeza del estero debe azolverse totalmente en un lapso aproximado de 30 años, a menos que en años de precipitación pluvial extrema el caudal del arroyo San Antonio pudiera abrir naturalmente una boca en la parte sur de la barra de arena para evacuar el sedimento acumulado durante más de 20 años.

La apertura sintética de una segunda boca en la parte sur del estero, manteniendo abierta la boca natural, genera una condición inestable para ambas bocas debido a una disminución general en la magnitud del flujo y del reflujo, por lo que ambas bocas tienden a cerrarse en forma natural, cerrándose primero la boca sur y dando lugar a que la boca norte inicie el proceso de autdragado hasta alcanzar el equilibrio entre el área de la boca y el prisma de marea. Este resultado respalda la hipótesis de que, en años de precipitación extrema, el caudal del Arroyo San Antonio pudiese abrir una boca en la parte sur de la barra de arena. De hecho, en el "Plano de la Ensenada de Todos Santos" (Figura 17), trazado en el año 1879 por el Ingeniero A. Savín (Savín, 1879), está delineada una boca en la parte sur del estero cuyo ancho es aproximadamente 3 veces menor que el ancho de la boca norte. Por desgracia no será posible observar con facilidad la apertura de esta boca, debido a que en el año 1986 se construyó un dique rectangular en la parte sur del estero en el área en donde abría la boca en forma natural (el dique se observa en la Figura 1).

De acuerdo con la observación del estero al paso de los años, la modificación de la barra de arena en la región de la boca del estero se puede explicar con la inercia del reflujo del agua que erosiona el extremo norte del estero al girar para salir por la boca, transportando sedimento hacia afuera del estero. Este continuo proceso ha socavado el depósito de arena en la parte norte de la boca y a su vez ha transportado arena del interior de la barra hacia la punta de ésta haciendo que la posición de la boca migre hacia el norte con una consecuente disminución del volumen de arena de la punta de la barra. Conforme la arena es expulsada del estero, el transporte litoral inducido por el oleaje distribuye la arena a lo largo de la playa, al sur o al norte de la boca dependiendo de la dirección del oleaje. Durante eventos extremos de precipitación pluvial, el aporte de arena del Arroyo San Carlos recarga el volumen de arena en la región de la boca. Por ejemplo, en los años 1979-1983 aumentó considerablemente el volumen de arena en la región de la boca y en las playas aledañas y la posición de la boca retrocedió hacia el sur con respecto su posición en 1972 debido al caudal extremo del arroyo San Carlos. El conjunto de fotografías aéreas tomadas en 1972, 1989, 1993 y 2001 (Figura 18), ilustra el proceso de transporte de sedimento en la región de la boca del estero. En la fotografía de 1972 se observa una barra delgada y dos canales bien definidos al interior de la barra. En la fotografía de 1989 se observa el resultado del aporte masivo de arena del arroyo San Carlos durante los años 1979-1983; se puede observar el azolve del canal próximo a la barra y el aumento del depósito de arena tanto

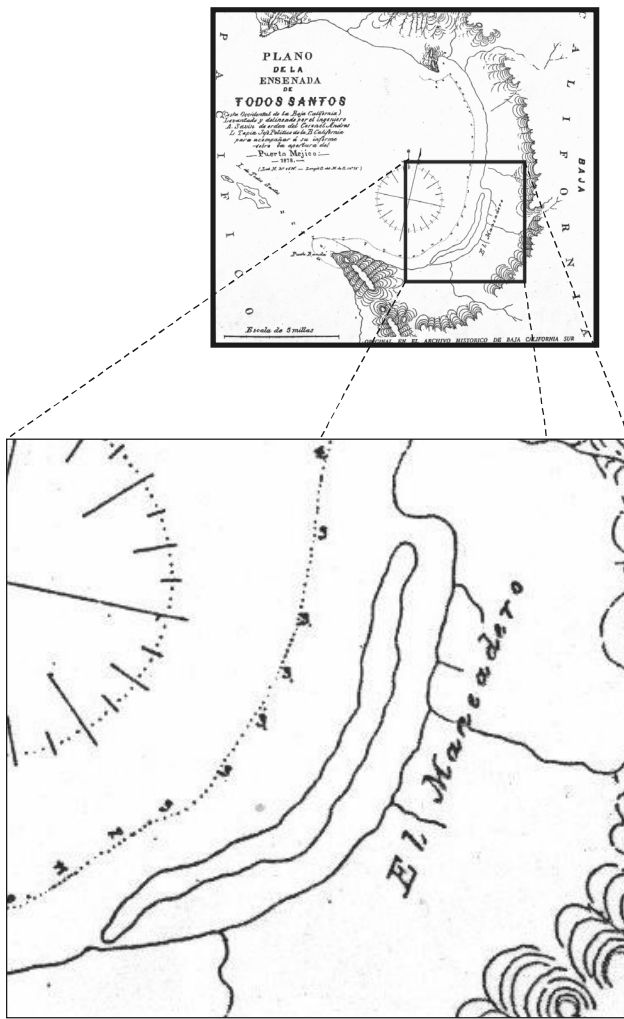


Figura 17. "Plano de la Ensenada de Todos Santos", (Costa Occidental de Baja California). Levantado y delineado por el Ingeniero A. Savín de orden del Coronel Andrés L. Tapia, Jefe Político de la B. California para acompañar a su informe sobre la apertura del "Puerto Mejico", 1878. Original en el archivo histórico de Baja California Sur. En el mapa se observa una boca en la parte sur del estero.

en la punta de la barra como en la playa que se localiza frente a la punta. En la fotografía de 1993 se observa la erosión parcial de la playa frente a la punta y el avance de la punta de la barra hacia el norte, respecto a su posición en 1989. Finalmente, en la fotografía del 2001 se observa la desaparición de la playa frente a la punta, el avance de la punta de la barra hacia el norte y la erosión del interior de la barra debido al flujo de arena hacia afuera del estero. Mientras que no ocurra un evento extremo de precipitación pluvial no se recargará el volumen de arena en la región de la boca y es de esperarse que la punta de la barra adquiera una forma similar a la que tenía en 1972. También se corre el riesgo de que aún con una precipitación extrema no se recargue el volumen de arena de la región de la boca si se extrae irresponsablemente la arena del lecho del Arroyo San Carlos.

El proceso de transporte de sedimento en la región de la boca del estero es sólo un ejemplo del equilibrio sutil que existe entre los arroyos y el litoral en las regiones semidesérticas. En estas regiones

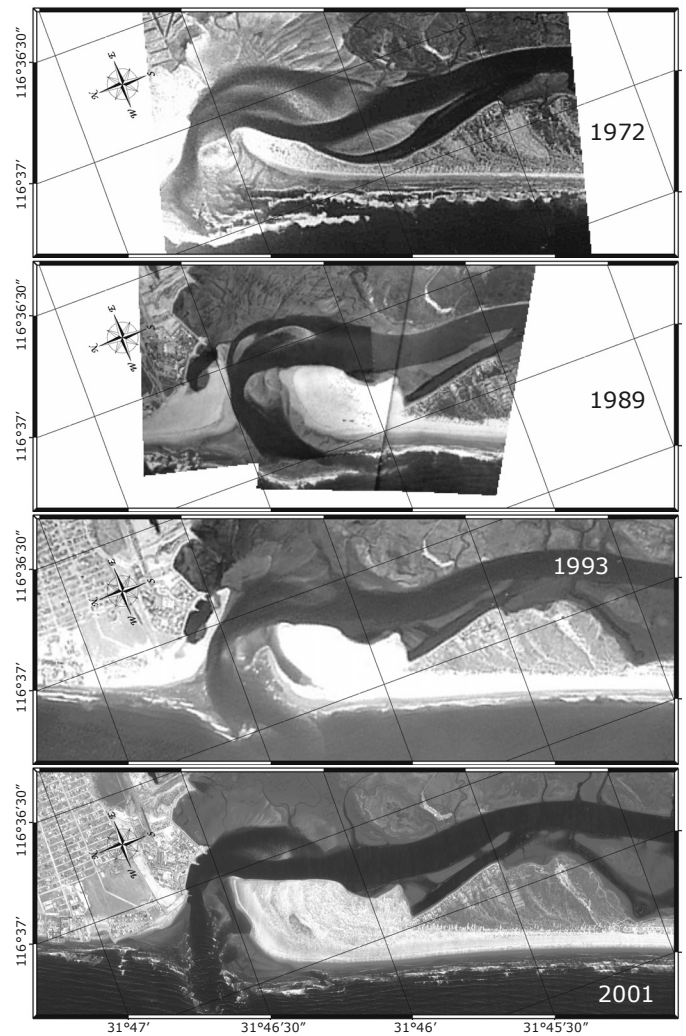


Figura 18. Secuencia de fotografías aéreas de la región de boca del Estero de Punta Banda tomadas en 1972, 1989, 1993 y 2001. Estas fotografías ilustran el proceso de transporte de sedimento en la región de la boca del estero (ver texto). Fotografías: INEGI-1972, Pro-Esteros-1989, INEGI-1993, IKONOS-2001.

el equilibrio se da en dos escalas de tiempo diferentes: durante 20 ó 30 años consecutivos el transporte de arena de los arroyos al litoral no es significativo debido a que la precipitación pluvial es escasa y no es suficiente para inducir el transporte de arena hasta el litoral. Sin embargo, durante este tiempo se acumula pausadamente el material que va a ser transportado al litoral en tan solo un lapso de tiempo de pocos días durante los eventos de precipitación extrema. Por ejemplo, en los años 1978-1983 ocurrieron unas lluvias extraordinarias, las mayores del siglo pasado, y los arroyos descargaron grandes volúmenes de sedimento en los litorales de Baja California. Este frágil equilibrio hace que la extracción irresponsable de arena del lecho de los arroyos pueda tener un impacto no deseado en los litorales, debido a que se estaría extrayendo la arena que se espera sea transportada al litoral en años de lluvias extraordinarias.

Otra actividad, que a la fecha se considera remota, y que podría afectar significativamente el proceso de erosión-depositación, es la de construir áreas urbanas con embarcaderos turísticos o privados dentro del cuerpo de agua del estero, áreas urbanas que se

construirían rellenando áreas de marisma. Actualmente, con excepción de los hoteles "Estero Beach" y "Campo Tony", no se observan asentamientos humanos. Al rellenar áreas de marisma disminuye el prisma de marea y consecuentemente disminuye el área de la boca. Esta relación no aparente se debe a que la magnitud del reflujo es proporcional al volumen de agua que se evacua del estero en el lapso de tiempo comprendido entre la pleamar y la bajamar, y a que pequeños cambios en la magnitud del reflujo ocasionan grandes cambios en la capacidad de arrastre de sedimento (ver Tablas 1 y 3). Es por esta relación que conforme el prisma de marea disminuye lentamente, la capacidad de autodragado en la región de la boca se pierde rápidamente, hasta el grado de ocasionar el cierre total de la boca debido al flujo de arena hacia adentro del estero producido por el oleaje.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos Rafael Blanco y a Román Lizárraga por proveer el equipo necesario y por su valiosa colaboración durante el trabajo de campo en el Estero de Punta Banda para la obtención de los perfiles batimétricos. A Isabel Ramírez Aguilar y a Salvador Farreras por su contribución con material bibliográfico y fotográfico del estero.

Los datos de nivel del mar y de corrientes que se emplearon en este trabajo fueron recabados manualmente hora a hora, día y noche durante una semana de observaciones. Semana en la que los alumnos de Décimo Semestre del Área de Física de la XX Generación de Oceanólogos de la Facultad de Ciencias Marinas – UABC, acamparon por turnos en el Estero de Punta Banda para lograr la continuidad de las observaciones. Nuestro aprecio y reconocimiento.

Este trabajo fue financiado por el proyecto interno del Departamento de Oceanografía Física de CICESE "Respuesta de la Costa del Pacífico Oriental al Impacto de Tsunamis", como parte del proyecto de tesis de licenciatura de Laura Huerta-Tamayo en la Facultad de Ciencias Marinas de la Universidad Autónoma de Baja California.

REFERENCIAS

- Ames-Sigala, L.F., 1985. Distribución de los ambientes sedimentarios en el Estero de Punta Banda, B.C., México. Tesis de Licenciatura, Escuela Superior de Ciencias Marinas, UABC, Ensenada, B.C., México.
- Ávila-Serrano, G., 1983. Volumen de sedimentos aportados anualmente a la Bahía de Todos Santos, B.C., por los arroyos: El Carmen, Ensenada, El Gallo, San Carlos y Las Animas 1972-1983. Tesis de Licenciatura. Escuela Superior de Ciencias Marinas, UABC. Ensenada, B.C., México.
- Bagnold, R.A., 1963. Mechanics of marine sedimentation. In "The Sea: Ideas and Observations" (M.N. Hill, ed.), Vol. III, Interscience, New York.
- Goto, C., Ogawa, Y., Shuto, N., and F. Imamura, 1997. IUGG/IOC TIME Project: Numerical Method of Tsunami Simulation with the Leap-Frog Scheme, Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, Manuals and Guides # 35, Paris, 4 Parts.
- Huerta-Tamayo, L., 2002. Transporte de sedimento por tracción en la boca y en el canal principal del Estero de Punta Banda, Baja California, México. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias Marinas, UABC.
- Inman, D.K., 1963. In "Submarine Geology" (F.P. Shepard, ed.), Chapter V, 2nd Ed., Harper and Row, New York.
- Pritchard, D.W., De La Paz-Vela, R., Cabrera-Muro, H., Farreras-Sanz S. y Morales, E., 1978. Hidrografía física del Estero de Punta Banda. Parte I: Análisis de datos. *Ciencias Marinas*, Vol. 5, No. 2. Diciembre 1978.
- Savín, A., 1878. "Plano de la Ensenada de Todos Santos", (Costa Occidental de Baja California). Levantado y delineado por el Ingeniero A. Savín de orden del Coronel Andrés L. Tapia, Jefe Político de la B. California para acompañar a su informe sobre la apertura del "Puerto Mejico", 1878 (original en el archivo histórico de Baja California Sur).
- Sternberg, R.W., 1967. Measurements of sediment movement and ripple migration in a shallow marine environment. *Marine Geol.* 5, 195-205.
- Sternberg, R.W., 1968. Friction factors in tidal channels with differing bed roughness. *Marine Geol.* 6, 243-260.
- Sternberg, R.W., 1971. Measurements of incipient motion of sediment particles in the marine environment. *Marine Geol.* 10, 113-119.
- Sternberg, R.W., 1972. Predicting Initial Motion and Bedload Transport of Sediment Particles in the Shallow Marine Environment. Dowden, Hutchinson & Ross, Inc. Shelf Sediment TRANSPORT: Process and Pattern, 3, pp. 61-82.
- Sundborg, A., 1967. Some aspects of fluvial sediments and fluvial morphology. I. General views and graphic methods. *Geograf. Ann.* 49A, 333-343.
- Svedrup, H.U., M.W. Johnson and R.H. Fleming, 1942. "The Oceans, Their Physics, Chemistry, and General Biology". Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

Recepción del manuscrito: 2 de marzo, 2004

Recepción del manuscrito corregido: 25 de mayo, 2004

Aceptación del manuscrito: 29 de mayo, 2004