

Research Article

Morfodinámica de un campo de dunas submarinas en una entrada de marea: San Blas, Argentina

Diana G. Cuadrado^{1,2} & Eduardo A. Gómez^{1,3}

¹Instituto Argentino de Oceanografía (CONICET) CC804, 8000 Bahía Blanca, Argentina

²Universidad Nacional del Sur, Departamento Geología, San Juan 670, 8000 Bahía Blanca, Argentina

³UTN Regional Bahía Blanca, 11 de Abril 360, 8000 Bahía Blanca, Argentina

RESUMEN. Se estudió la morfología de un campo de dunas submarinas desarrollado en una entrada de marea que conecta la plataforma continental argentina con bahía Anegada (sur de la provincia de Buenos Aires). Se infiere la circulación sedimentaria a partir del desplazamiento diferencial de las geoformas medido en relevamientos consecutivos. Como parte de la metodología se utilizó un ecosonda y un sistema batimétrico por medición de fase (SBMF) denominado GeoSwath que permitieron obtener la morfología submarina en detalle. Se observaron dunas grandes sobre el límite sur del campo de dunas con altura entre 4,5 y 5,0 m y espaciamiento entre 100 y 120 m, a profundidades de 24 m, que se desplazan hacia el exterior del canal a una rapidez entre 18 y 75 m año⁻¹. Hacia el límite norte del campo, a 21 m de profundidad las dunas eran de menor magnitud, entre 2,0 y 2,5 m de altura y espaciamiento entre 40 y 80 m, y se desplazaron a una rapidez entre 18 y 36 m año⁻¹ hacia el interior de bahía Anegada. Se obtuvo la distribución del flujo de agua en toda la columna, en un perfil perpendicular al canal relevado, mediante ADCP. Los valores máximos de rapidez de corriente fueron durante la marea creciente, alcanzando 2,0 m s⁻¹. Los resultados obtenidos permiten definir un modelo circulatorio de transporte de sedimentos arenosos, con la formación de un delta de marea de flujo en la cabecera de la entrada de marea y un delta de reflujos en el límite del dominio oceánico, unidos por una garganta de marea profunda, exenta de sedimentos inconsolidados.

Palabras clave: campo de dunas, velocidad de migración, transporte de sedimentos, GeoSwath, ADCP, Argentina.

Submarine dune field morphodynamics in a tidal inlet: San Blas, Argentina

ABSTRACT. The morphology of a submarine dune field developed in a tidal inlet that connects the Argentinean continental shelf with Anegada Bay (southern Buenos Aires province) was studied. The sediment circulation was inferred from the differential displacements of the bedforms evaluated by comparing consecutive surveys. An echosounder and a Phase Measuring Bathymetric System (PMBS) called GeoSwath were used to obtain a detailed submarine morphology. Large dunes, with heights between 4.5 and 5.0 m and from 100 to 120 m separating them, were present near the southern limit of the dune field at 24 m depth. These dunes move towards the outer part of the channel at a speed of 18 to 75 m year⁻¹. At the northern end of the dune field, at 21 m depth, the dunes are smaller, being 2.0 to 2.5 m in height and separated by 40 to 80 m. The smaller dunes move towards the interior of Anegada Bay at 18 to 36 m year⁻¹. The distribution of the water flow in the entire water column was obtained through a perpendicular profile of the channel by means of an ADCP. Maximum current speeds were 2 m s⁻¹, and were found during flood tide. The results obtained indicate a circulatory transport model of sedimentary sands, with the formation of ebb and flood deltas at both ends of the deep inlet throat, which lacks of unconsolidated sediments.

Keywords: dune field, migration velocity, sediment transport, GeoSwath, ADCP, Argentina.

Corresponding author: Diana Cuadrado (cuadrado@criba.edu.ar)

INTRODUCCIÓN

Tanto desde el punto de vista geomorfológico como químico-biológico, las entradas de marea (*tidal inlets*)

juegan un rol muy importante dentro del sistema hidrodinámico por ser la vinculación entre el océano abierto y las cuencas interiores (Davis & Fitzgerald, 2004). Su importancia radica principalmente en que

entre estos ambientes se produce un intercambio de agua salina y dulce, transporte de sedimentos finos y gruesos, nutrientes, organismos planctónicos y contaminantes.

Como rasgos geomorfológicos significativos dentro de las entradas de marea se encuentran los deltas de marea y las gargantas que son elementos cruciales del sistema, por lo que requieren estudios de detalle según estimaciones de Van Goor *et al.* (2003) y Van Veen *et al.* (2005). Las gargantas son las partes más profundas y angostas de los canales de marea donde el flujo de agua se modifica incrementando su velocidad. Ello ocasiona la remoción de los sedimentos inconsolidados del fondo, dejando sólo los más gruesos o directamente la exposición de la roca o sedimentos cohesivos antiguos (Davis & Fitzgerald, 2004). Los deltas de marea se forman en los extremos de las entradas de marea como acumulación de los sedimentos transportados en la garganta.

En diferentes entradas de marea, se han aplicado modelos numéricos que han sido desarrollados para entender el comportamiento morfológico y los procesos que controlan la dinámica de estos sistemas. Se han realizado estudios en el Mar de Wadden (Wang *et al.*, 1995), costas de Florida (Fiechter *et al.*, 2006) y de Inglaterra (Siegle *et al.*, 2007). Aunque se estima que los modelos son herramientas útiles como mecanismos predictivos y tienen gran importancia en determinar las variables que afectan el medio, aun no pueden reproducir la realidad con exactitud. Por otro lado, recientes investigaciones realizadas en laboratorio (Maddux *et al.*, 2003; Venditti, 2003) muestran importantes resultados sobre el conocimiento de la estructura del flujo asociado con dunas 3-D. Sin embargo, tanto las investigaciones teóricas como los trabajos de laboratorio tienen que estar asistidos por resultados obtenidos con mediciones de campo para una mejor comprensión de los procesos involucrados. Los resultados expuestos en este trabajo dan a conocer la variabilidad espacial que presenta la morfología de las grandes dunas submarinas en un ambiente de fuerte energía como consecuencia de corrientes de marea reversibles.

En las costas norteamericanas o europeas es común encontrar este tipo de geofomas asociadas a islas de barrera o en las bocas de estuarios y rías (Jelgersma *et al.*, 1995). Sin embargo, en la costa argentina hay muy pocos ejemplos de entradas de marea (Isla & Bujalesky, 1995). El conocimiento de la dinámica sedimentaria en una entrada de marea está íntimamente asociado a la mejor comprensión del sistema ecológico en general. Es por ello que el estudio de los complejos procesos de transporte de sedimentos, como los de transporte de contaminantes

y especies biológicas son relevantes para un mejor manejo de estos ambientes.

El presente estudio se realizó en el canal San Blas que conecta a la plataforma continental con bahía Anegada ubicada al sur de la provincia de Buenos Aires (Argentina). El único estudio oceanográfico realizado en el área de estudio fue de Álvarez & Ríos (1988), quienes efectuaron una batimetría general y midieron variables oceanográficas, aunque el registro de datos no fue permanente ni sistemático. En dicho estudio, las mediciones fueron puntuales obteniéndose las corrientes de marea mediante un correntómetro y un correntógrafo fondeados a una profundidad fija en la columna de agua. Por lo tanto, el presente estudio es el primero efectuado en el ambiente subacuático que involucra estudios geomorfológicos submarinos e hidrodinámicos de detalle, identificando variaciones espaciales y temporales utilizando equipamiento de alta precisión.

El objetivo del trabajo es determinar la migración diferencial de un campo de dunas y establecer la circulación del sedimento en la entrada de marea de San Blas, a fin de proponer un modelo conceptual del transporte de los sedimentos arenosos. La interpretación de la dinámica de este ambiente costero no sólo implica ampliar el conocimiento hidrosedimentológico en este tipo de sistemas, sino que también proporciona las bases para un efectivo manejo del canal en aspectos ambientales y pesqueros.

MATERIALES Y MÉTODOS

Zona de estudio

Bahía Anegada abarca la zona costera de baja profundidad ubicada en el sur de la provincia de Buenos Aires (Argentina) bordeada por varias islas que la separan del océano Atlántico. Estas islas están separadas entre sí por canales afectados por las mareas (Fig. 1). De norte a sur se encuentra la isla Gaviota separada de la isla de los Riachos por el canal Oruga. La isla de los Riachos está separada de la isla Gama por el canal Culebra y esta última isla se encuentra separada del continente por el canal San Blas.

La zona de San Blas, donde se efectuó el presente estudio, se encuentra entre 40°28'–40°36'S y 62°06'–62°20'W; comprende la denominada isla Jabalí, limitada por dos canales de marea someros, los llamados arroyos Jabalí y del Guanaco. El primero es un canal funcional que recibe los efectos de la marea, bordeado por planicies de marea compuestas de sedimentos finos y vegetadas mayormente por *Spartina alterniflora*. El arroyo del Guanaco se encuentra actualmente obstruido en su desembocadura



Figura 1. Ubicación de bahía Anegada en el sur de la provincia de Buenos Aires, Argentina. El área de estudio se indica en el recuadro y corresponde al canal San Blas.

Figure 1. Location of bay Anegada at the southern of Buenos Aires province, Argentina. The study area is shown, corresponding to San Blas channel.

en el océano Atlántico por cordones de arena (Isla & Espinosa, 2005).

El canal San Blas tiene una longitud aproximada de 13 km y un ancho promedio de 2 km. La localidad de Bahía San Blas se encuentra en la costa sur del canal homónimo y la zona presenta una marea mixta predominantemente semidiurna caracterizada por un rango medio de 1,62 m (Servicio de Hidrografía Naval, 2010). Según la clasificación de Hayes (1979) este ambiente correspondería al límite del régimen micromareal-mesomareal. Los vientos fuertes que caracterizan el área de estudio, provenientes del NNE, modifican las alturas y horarios de las mareas (Beigt *et al.*, 2011) y por otro lado generan formas costeras que permiten inferir la dirección de deriva litoral hacia el exterior del canal.

Geología del área

La geología regional está detallada en el trabajo de Cuadrado & Gómez (2010). En síntesis se puede decir que estudios de la geología de la zona indican que el

sustrato corresponde a la formación Río Negro (Andreis, 1965). Esta formación está compuesta por una alternancia de bancos gruesos de areniscas de grano fino a mediano, gris azulados a gris pardos, con estratificación laminar a entrecruzada y arcilitas limosas finamente estratificadas de colores gris blanquecino, pardo claro y rosado. En la región de San Blas los afloramientos son escasos, de reducido espesor y están cubiertos por sedimentos más recientes. Sobre esta formación se depositó un manto de gravas y cantos rodados de naturaleza volcánica, denominados “rodados patagónicos” (Fidalgo & Riggi, 1970). Por encima, se encuentra un sedimento loessoide, castaño amarillento. Los depósitos recientes corresponden a cordones litorales de grava de las playas actuales y sedimentos arenosos de origen eólico.

Metodología

Para determinar la batimetría de la zona se relevó el canal con un ecosonda Bathy500 MF posicionada con DGPS, cubriéndose una superficie de 50 km². Se obtuvieron 15 perfiles transversales al canal y tres longitudinales. En un área de 3,5 km² caracterizada por un campo de dunas, se relevó con el sistema batimétrico por medición de fase (SBMF) denominado GeoSwath Plus de GeoAcoustics Ltd. Con este sistema se efectuó un relevamiento batimétrico por fajas, que permitió visualizar cambios en la textura del fondo (*i.e.* sedimentos cohesivos y sedimentos sueltos) y detalles morfológicos con precisión centimétrica. Se efectuaron ocho líneas de barrido con una superposición del 50%, abarcando un total de 900 m de ancho y 4 km de largo.

Se obtuvieron 20 muestras de sedimento en la zona del campo de dunas submarinas, utilizando una draga Van Veen. Como todas las muestras correspondían al tamaño arena, se tamizaron siguiendo el método propuesto por Folk & Ward (1957) y luego se determinaron los parámetros estadísticos para su análisis.

Para estudiar la dinámica de la zona se midió la velocidad de las corrientes de marea (magnitud y dirección) durante un ciclo completo (13 h) con un ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) de 600 kHz con una configuración de celdas de 50 cm, sobre una transecta perpendicular al canal San Blas. Los registros obtenidos permitieron conocer la rapidez y dirección de las corrientes de marea sobre todo el perfil en la columna de agua, por cuanto se pueden determinar tanto variaciones espaciales como temporales. Se utilizó el software asociado WinRiver que permite graficar los resultados obtenidos de las corrientes. Todas las tareas de campo fueron efec-

tuadas con la lancha IADO IV de 6,5 m de eslora, perteneciente al Instituto Argentino de Oceanografía.

RESULTADOS

Batimetría y sedimentología

El mapa batimétrico permitió identificar tres zonas, cada una con una morfología diferente (Fig. 2). Una zona central, que se extiende por 5 km desde Bahía San Blas hacia el extremo sudeste del canal, caracterizada por las mayores profundidades del canal, alcanzando 28 m de profundidad (perfil E-F, Fig. 2). Dicha profundidad es constante en un ancho de 900 m en sentido transversal al canal. El perfil transversal es en forma de U con un fondo plano, sin formas de fondo. Se observó una diferencia entre las pendientes de los veriles (costados) del canal, ya que la inclinación del veril sur es más abrupta que la del veril norte con pendientes de 6,5 y 3,5% respectivamente. La zona sur está caracterizada por una profundidad máxima de 30 m sobre la costa sur, en un perfil en forma de V (perfil G-H, Fig. 2).

La zona norte, ubicada al extremo norte del canal San Blas y al interior de bahía Anegada, se caracteriza por canales con profundidades de 10 a 16 m separados por bancos. El perfil A-B (Fig. 2) permite apreciar que estos bancos se forman a escasa profundidad, del orden de 3 m, por lo que quedan expuestos en condiciones de marea baja y se pueden identificar en imágenes satelitales.

En la zona central del canal San Blas, el sedimento inconsolidado forma un campo de dunas que se extiende en una superficie aproximada de 3,5 km². Se observan las dunas en el perfil C-D (Fig. 2) que atraviesa el campo. Las dunas tienen grandes dimensiones, superando los 2 m de altura y espaciamientos mayores a 40 m.

El análisis granulométrico de las muestras de sedimento del fondo del canal determinó que el lecho está tapizado fundamentalmente por arena fina a media (Fig. 3). Sin embargo, algunas muestras presentan un alto porcentaje de grava, principalmente hacia el extremo sur del canal San Blas donde el fondo es plano y también sobre el borde septentrional del extremo norte del canal San Blas a 20 m de profundidad. También se encuentra un alto porcentaje de grava sobre el borde sur de la zona central del canal, a 10 m de profundidad, mientras que hacia el interior del canal aumenta la proporción de arena. La costa sur está tapizada por rodados de diferentes tamaños que conforman cordones litorales.

Morfología del campo de dunas

El campo de dunas relevado abarca una superficie de 3,5 km². Se localiza en el centro del canal San Blas a profundidades entre 19 y 25 m (ver recuadro, Fig. 2). Hacia el norte del campo y según la clasificación de Ashley (1990), se reconocieron dunas grandes, con espaciamientos entre 40 y 80 m, y alturas de 2,5 m a una profundidad de 21 m (perfil AB, Fig. 4). Hacia el sur del campo, a profundidades de 24 m, se hallaron dunas de máxima dimensión (perfil CD, Fig. 4). Estas últimas alcanzan 4,5-5,0 m de altura, con un espaciamiento entre 100 y 150 m. En general, todas las grandes dunas aparecen tapizadas por dunas pequeñas (ver recuadro E en Fig. 4), cuyas mediciones indican espaciamientos entre 0,70 y 0,90 m y alturas desde 0,3 a 1 m. El relevamiento con el sistema SBMF permite identificar detalles submétricos de la morfología de las geoformas.

El tamaño medio del sedimento que forman las dunas varía entre 1,80 y 0,28 phi, correspondiendo a arenas medianas a gruesas (ver recuadro, Fig. 3). La mayoría de las muestras presenta una selección de moderada a buena (0,5 a 1 phi), mientras que una minoría está pobremente seleccionada (1 a 2 phi). La asimetría es negativa para la mayoría de las muestras (< -0,1 phi), siendo dos de ellas casi simétricas (entre 0,1 y -0,1 phi).

Un detalle importante que se ha identificado en la morfología de las dunas es que la simetría que ellas exhiben no es homogénea en todo el campo. Las grandes dunas localizadas cerca del límite sur del campo exhiben perfiles simétricos, mientras que las ubicadas sobre el límite norte del campo presentan perfiles asimétricos con el talud orientado hacia el interior de bahía Anegada. La altura de las crestas disminuye desde el centro del campo hacia los límites norte y sur hasta que estas grandes geoformas desaparecen. Las dunas muy grandes aumentan su espaciamiento hacia el límite sudeste del campo de dunas, desde 100 a 150 m.

Las líneas de cresta son claramente identificables en planta. Muchas de ellas tienen una continuidad en todo el ancho de 900 m de la zona relevada, siendo más bajas hacia los límites norte y sur. Varias de las líneas de crestas presentan curvaturas pronunciadas. Sobre el límite norte tienen una curvatura cóncava hacia el océano. En la parte media de la zona relevada, la curvatura cóncava es seguida por una curvatura convexa y cóncava nuevamente. También se presentan confluencias y bifurcaciones de las crestas. Considerando que la orientación del canal San Blas es de 132° (SE-NW), las dunas grandes y muy grandes presentan una orientación entre 48° y 72° con respecto

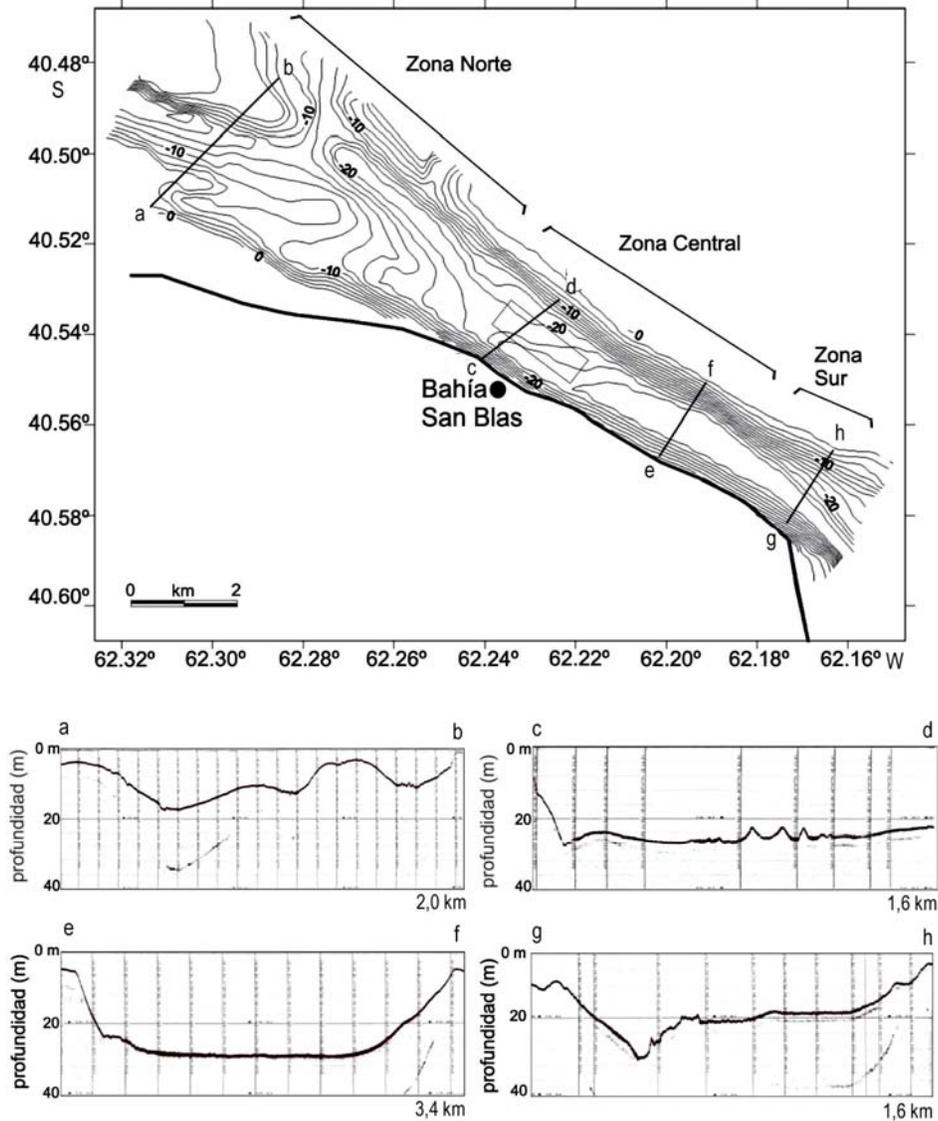


Figura 2. Mapa batimétrico del canal San Blas. Se muestran cuatro perfiles transversales al canal. Isobatas cada 2 m. El recuadro indica la ubicación del campo de dunas, (Modificado de Cuadrado & Gómez, 2010).

Figure 2. Bathymetric map of San Blas channel. Four profiles across to the channel are shown. Isobaths each 2 m. The box indicates the dune field location (Modified from Cuadrado & Gómez, 2010).

al canal. Sin embargo, las dunas pequeñas que tapizan las de mayor magnitud tienen una orientación media de 83° con respecto a la orientación del canal.

Luego de ocho meses desde el primer relevamiento del campo de dunas, se realizó un segundo relevamiento que permitió determinar el desplazamiento de las geoformas. En la Figura 5 se muestra un desplazamiento diferencial de las dunas. Las geoformas ubicadas sobre el límite norte migran en dirección hacia el interior de bahía Anegada con una rapidez extrapolada que varía entre 18 y 36 m año^{-1} con un promedio de 27 m año^{-1} . En el límite sur, las dunas se desplazan en la dirección opuesta, hacia el exterior del

canal, a una rapidez entre 18 y 75 m año^{-1} con un promedio de $37,5 \text{ m año}^{-1}$. En este caso, la velocidad de desplazamiento de las geoformas disminuye hacia el extremo sur, coincidiendo con un aumento en el espaciamiento de las dunas y una modificación en su morfología, ya que dicho espaciamiento presenta un fondo plano sobre el límite sur del campo (perfil CD, Fig. 4).

Hidrodinámica

Los resultados de las mediciones de las corrientes de marea indican que existe una diferencia en la magnitud entre el flujo y reflujo (Fig. 6). Las máximas

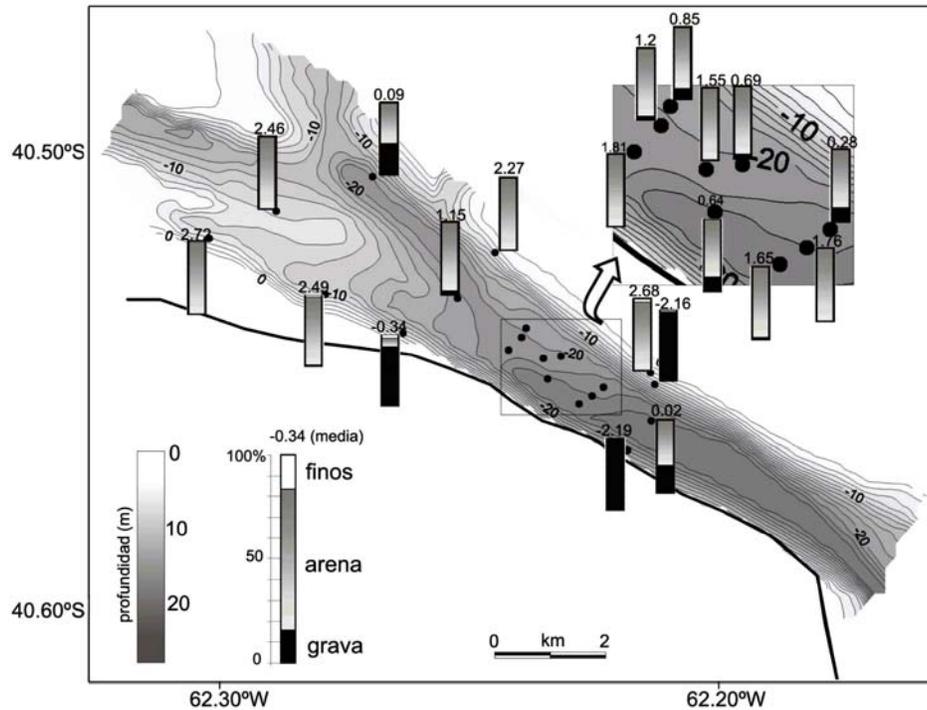


Figura 3. Distribución sedimentológica en el canal San Blas. Los puntos indican la posición de las muestras de sedimento y la barra adyacente indica el porcentaje de grava, arena y fango. Sobre la barra se muestra el valor de la media en unidades (phi). El recuadro encierra las muestras extraídas en el campo de dunas y se muestra el sector aumentado en la parte superior.

Figure 3. Sedimentological distribution in San Blas channel. The circles indicate the sample position and the bar indicates the percentage in gravel, sand and mud. The mean value (in phi units) is shown above the bar. The box includes the samples extracted from the dune field, enlarged in the superior border.

corrientes de flujo alcanzaron valores de 2 m s^{-1} , mientras que las máximas corrientes de reflujo lograron una velocidad de $1,8 \text{ m s}^{-1}$. Ambas corrientes presentaron sentidos opuestos y longitudinales al canal.

En sentido espacial también se registraron diferencias entre los dos estados de marea. Las corrientes de flujo presentaron su máxima velocidad en el veril norte. Estos mayores valores de velocidad se registraron desde la superficie hasta la mitad de la columna de agua (10 m), llegando en algunos casos hasta cerca del fondo. Los menores valores de velocidad (cerca de $1,7 \text{ m s}^{-1}$) se registraron simultáneamente cerca del extremo sur donde la profundidad llega a 26 m, y también cerca de la mitad del canal donde la profundidad se reduce a 18 m. En estos dos últimos casos, las mayores magnitudes de la corriente se registraron desde la superficie hasta 15 m de profundidad. Por otra parte, las mayores magnitudes de las corrientes de reflujo se registraron en las mayores profundidades, hacia el extremo sur, desde la superficie hasta los 18 m, aproximadamente.

DISCUSIÓN

Los resultados de la morfología, sedimentología del fondo del canal y dinámica de las corrientes de marea permiten definir claramente las tres zonas conspicuas de las entradas de marea: una garganta de marea coronada en ambos extremos por deltas de marea. La depositación de sedimentos en ambos extremos del canal San Blas se debe a la pérdida de capacidad de transporte por el aumento de la sección, formando un delta de marea, dependiendo de la dominancia de las corrientes que lo forman. Así, en el dominio oceánico se forma un delta de reflujo, mientras que en la zona hacia bahía Anegada, se forma un delta de flujo.

El fondo del canal San Blas, en su extremo cercano al océano Atlántico, está exento de arena como consecuencia de las fuertes corrientes de marea de alrededor de 2 m s^{-1} , tanto en flujo como reflujo, quedando sólo la grava como sedimento característico. Por otra parte, la morfología del fondo exhibe una topografía plana, evidenciando la presencia de capas resistentes a la erosión hídrica en el fondo del canal.

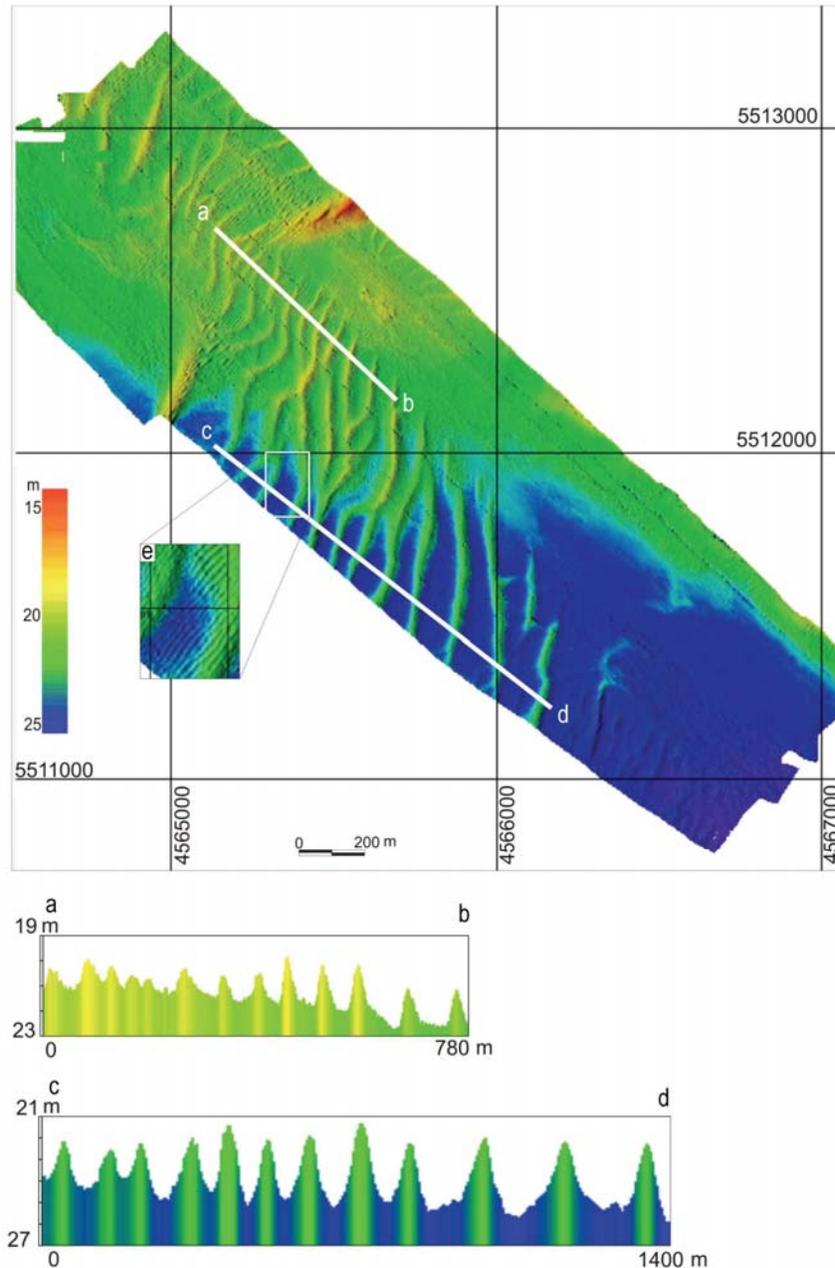


Figura 4. Mapa morfológico de un sector del fondo del canal San Blas (ver recuadro Fig. 2), donde se observan las dunas submarinas. Coordenadas en Gauss-Krüger (similar a UTM). Se muestra un detalle de la morfología en el recuadro E.
Figure 4. Morphological map of the submarine dunes (see box in Figure 2). Coordinates are in Gauss Krüger projection (similar to UTM). Detailed morphology is shown in box E.

Ello significa que las características sedimentarias del área controlan la geometría y estabilidad de la entrada de marea, tal como lo indican Elias & Van der Spek (2006).

Varios modelos conceptuales han sido propuestos para explicar la formación de los deltas de reflujos (Hayes, 1975, 1979; Oertel, 1975; Hubbard *et al.*, 1979). En general, su geometría depende fundamen-

talmente del balance energético entre las fuerzas de las corrientes de marea y de las olas al desembocar en el ambiente oceánico. En el presente estudio se ha analizado la carta náutica H-260 del Servicio de Hidrografía Naval de Argentina, donde se muestran las geformas submarinas (entre 6 y 8 m de profundidad) que constituyen el delta de reflujos (bancos del Medio y Hellgat, Fig. 7). Se observa una

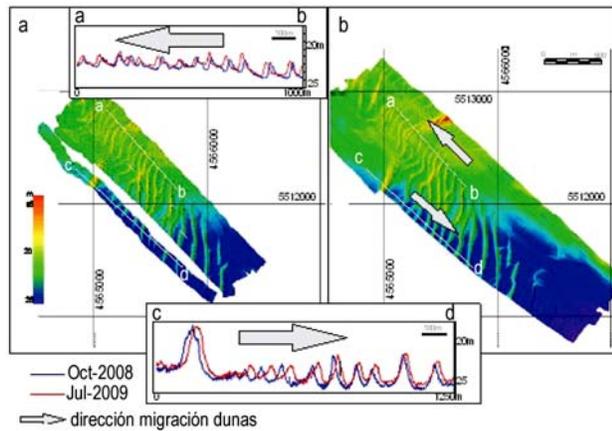


Figura 5. Comparación de dos mapas morfológicos sobre la misma grilla de coordenadas donde se observa el desplazamiento de las geoformas. a) Mapa obtenido en octubre de 2008, b) mapa obtenido en julio de 2009 (el área relevada es mayor). Las flechas grises indican el sentido de desplazamiento de las dunas. Coordenadas en Gauss-Krüger.

Figure 5. Morphological maps comparison over the same coordinates grid where the bedforms displacement is shown. a) Map obtained in October 2008, b) map obtained in July 2009 (it comprises a larger area). The arrows show the displacement direction of dunes. Coordinates are in Gauss Krüger projection.

deflexión de la totalidad de los bancos sumergidos del delta de reflujo en sentido horario. Según el análisis estadístico realizado sobre un año de datos en una estación meteorológica ubicada en la localidad de San Blas (Beigt *et al.*, 2011), el viento más frecuente es de dirección norte y el más fuerte proviene del N-NE. Ambas direcciones producen olas que afectan las geoformas provocando la curvatura de bancos y canales hacia el sur.

Por otro lado, el delta de flujo formado hacia el interior de bahía Anegada, aunque se genera por el mismo principio que el delta de reflujo, tiene una morfología diferente. En el delta de flujo se forman bancos elongados paralelos a la dirección del canal y a las corrientes de marea, los que son visibles en las imágenes satelitales. En la zona intermedia, entre la garganta de marea y el delta de flujo, se forma un campo de dunas que ocupa una superficie de aproximadamente 3,5 km². Las dunas medianas y pequeñas que tapizan las geoformas de mayor magnitud se caracterizan por cambiar la pendiente durante el ciclo de mareas en función de la dirección de las corrientes de marea (Bartholdy *et al.*, 2002). Las crestas del tipo de dunas estudiadas en el presente trabajo tienen una orientación de alrededor de 83° con respecto a la orientación del canal, siendo aproximadamente perpendiculares a la dirección de transporte

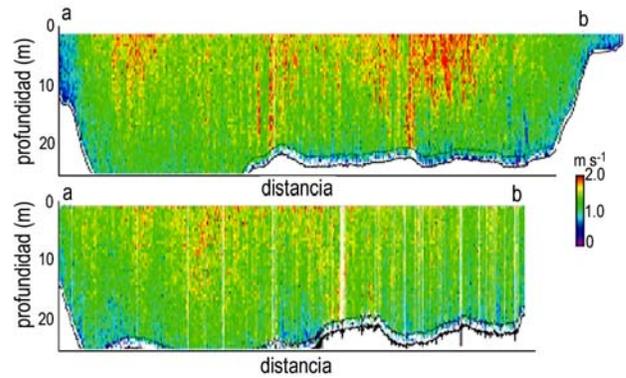


Figura 6. Distribución de la velocidad de la corriente de marea en un perfil transversal al canal San Blas. El punto a se encuentra en el extremo sur (en la cercanía de la bahía San Blas, ver Figura 2) y el punto b se encuentra sobre el extremo norte. a) Perfil que corresponde al máximo de corrientes de flujo, b) perfil que corresponde al máximo de corrientes de reflujo (Modificado de Cuadrado & Gómez, 2010).

Figure 6. Distribution of tidal current speeds in a cross-channel profile. The point a is closed the southern flank (near Bay San Blas town, see Figure 2) and point b is closed the northern flank. a) Maximum flood currents profile, b) maximum ebb currents profile (Modified from Cuadrado & Gómez, 2010).

instantáneo. Por consiguiente, las dunas medianas y pequeñas son generadas por corrientes de marea. Por el contrario, las dunas de mayores dimensiones presentan una orientación entre 48° y 72° con respecto a la dirección del canal, respondiendo su formación a un transporte residual. Por otro lado, a pesar que Dalrymple & Rhodes (1995) sostienen que las dunas de grandes dimensiones generalmente son asimétricas indicando su asimetría la dirección de desplazamiento, en el presente trabajo se demuestra que las dunas muy grandes que se encuentran sobre el límite sur del campo de dunas son simétricas (perfil CD, Fig. 4) y sin embargo se desplazan hacia el exterior del canal (perfil CD, Fig. 5).

El equipamiento y la metodología utilizados en los relevamientos consecutivos sobre el campo de dunas en el canal San Blas permiten obtener una detallada información de los cambios temporales y consecuentemente una estimación (*i.e.* desplazamiento de las geoformas) de los procesos comprometidos. Las dunas grandes, ubicadas sobre el límite norte del campo, migran a una velocidad entre 18 y 36 m año⁻¹ hacia el interior de bahía Anegada; mientras que las dunas muy grandes, presentes sobre el límite sur, migran hacia el exterior del canal a una rapidez entre 18 y 75 m año⁻¹. Por consiguiente, la morfología de las dunas permite inferir una circulación diferencial durante el

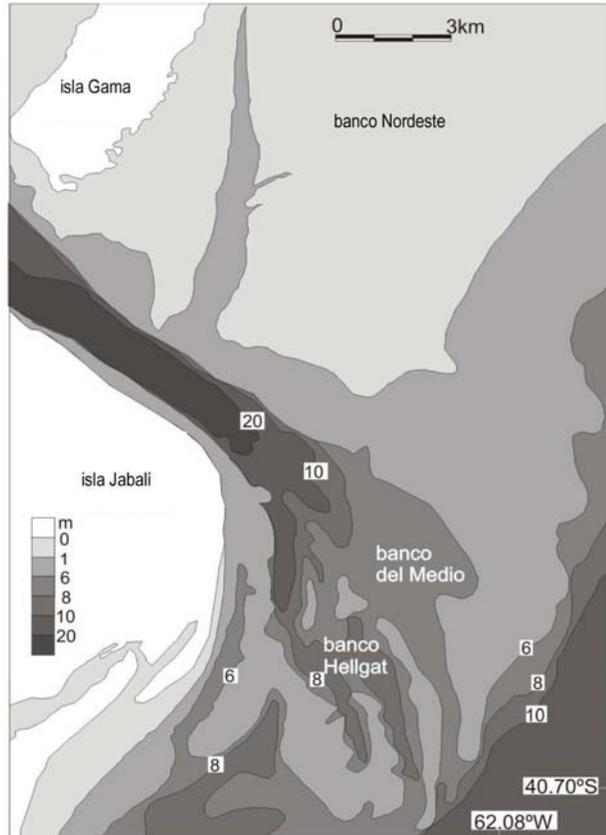


Figura 7. Carta náutica H-260 (Servicio de Hidrografía Naval, República Argentina) digitalizada que muestra los bancos submarinos formados en el dominio oceánico.

Figure 7. Digitized Nautical chart (Servicio de Hidrografía Naval, República Argentina) showing the submarine banks in the ocean domain.

transcurso del ciclo de marea, ingresando el flujo de agua a bahía Anegada por el borde norte y saliendo por el borde sur.

A partir del análisis del desplazamiento de las dunas se infiere la circulación del sedimento local. En la (Fig. 8) se presenta un esquema o modelo conceptual, a modo de resumen, de las características identificadas en el sistema de entrada de marea de San Blas. En dicho esquema se pueden observar las características en planta y perfil, las cuales se explican a continuación.

Las altas intensidades de las corrientes de marea que ocurren en la garganta de marea, alrededor de los 2 m s^{-1} , no permiten el desarrollo de formas de fondo acumulativas en ese lugar, observándose en consecuencia el sustrato resistente prácticamente sin cubierta sedimentaria. La escasez de sedimento se debe a que ha sido transportado por las corrientes de marea hacia ambos extremos de la garganta. Así, los

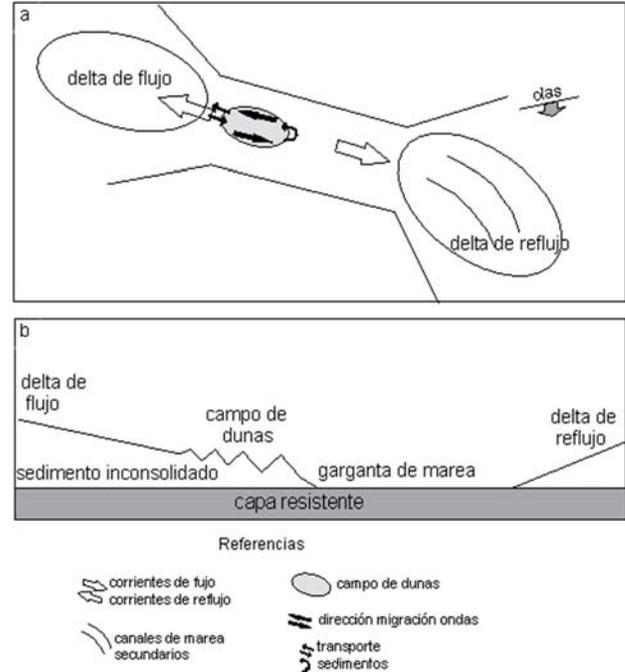


Figura 8. Modelo de circulación: a) Vista en planta, b) vista en perfil.

Figure 8. Circulation pattern: a) Plan view, b) profile view.

sedimentos transportados hacia el interior durante la creciente, finalmente conforman el delta de flujo, mientras que los que son transportados hacia el exterior conforman el delta de reflujo. Desde el delta de flujo hacia el interior del canal se ha generado un campo de dunas que presenta un transporte diferencial en sentido transversal al canal. Existe un transporte de sedimentos hacia el interior de bahía Anegada, ingresando principalmente por el flanco norte del canal, mientras que por el flanco sur el transporte de sedimentos tiene dirección hacia el exterior del canal. Esta circulación diferencial en el campo de dunas durante un ciclo de marea, genera las diferentes curvaturas que exhiben las líneas de cresta y la orientación menor a 90° con respecto a la dirección del canal. Por otra parte, la cantidad de sedimento disminuye hacia el límite sur del campo de dunas, donde se comprueba que a profundidad de 26 m es insuficiente para mantener la formación de estas grandes dunas. Ello se infiere por la morfología de las geoformas, ya que el espaciamiento de las dunas muy grandes aumenta y simultáneamente el espacio interdunal es plano. Según estudios de Dalrymple & Rhodes (1995), esta morfología se presenta en condiciones de escasez de sedimentos sobre un sustrato subyacente resistente a la erosión.

CONCLUSIONES

La entrada de marea estudiada está altamente controlada por la litología de los sedimentos aflorantes en el fondo del canal y los sedimentos característicos del veril sur. El lecho del canal está formado por sedimentos consolidados mientras que el flanco sur está constituido por rodados, lo cual provoca una fuerte pendiente. Estas características le otorgan a la entrada de marea una gran estabilidad.

La hidrodinámica del ambiente muestra una importante energía revelada por las fuertes corrientes de marea que son el principal agente que transporta y distribuye los materiales a través de la garganta de marea. Los valores de las intensidades máximas de las corrientes de flujo y reflujo son de alrededor de 2 m s^{-1} .

El modelo conceptual de circulación sedimentaria que se propone, indica que todo el sedimento arenoso es transportado hacia los deltas de marea ubicados en los extremos del canal San Blas, por lo que la garganta de marea propiamente dicha carece de una cubierta de sedimentos inconsolidados dejando expuesto un material resistente a la erosión, formando un lecho uniforme y plano. El delta de marea de reflujo es retrabajado en el ambiente oceánico por acción de las olas locales, generando bancos flexionados hacia el sur en el sector exterior.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a Carlos Galán, Ernesto Alberdi y Eduardo Fernández por su apoyo en las tareas de campo y a Hugo Pellegrini y Miguel Colombani por el procesamiento de las muestras de sedimento. Asimismo a la tripulación del "Iado IV", Alberto Conte y Enio Redondo por su invaluable conocimiento en navegación. El presente trabajo fue financiado por PAE N°22666/04 y parcialmente por PICT N° 109 y 1878 ANPCyT y PGI 24/ZH15 SCyT UNS.

REFERENCIAS

- Alvarez, J.A. & F.F. Ríos. 1988. Estudios litorales en las bahías San Blas y San Antonio Oeste. I. Caracterización oceanográfica preliminar de la zona interior de Bahía San Blas (B.A. Argentina). Informe Instituto para la Investigación de los Problemas del Mar. UNMP-CONICET, 39 pp.
- Andreis, R. 1965. Petrografía y paleocorrientes de la Formación Río Negro. Rev. Mus. La Plata, V. Geología, 36: 245-310.
- Ashley, G.M. 1990. Classification of large scale subaqueous bedforms: a new look at an old problem. 1987, SEPM Bedforms and Bedding Structures Research Symposium, Austin, TX. J. Sediment. Petrol., 60: 160-172.
- Bartholdy, J., B. Bartholomae & W. Flemming. 2002. Grain-size control of large compound flow-transversal bedforms in a tidal inlet of the Danish Wadden Sea. Mar Geol., 188: 391-413.
- Beigt, D., D.G. Cuadrado & M.C. Piccolo, 2011. Study of the surface water circulation in San Blas channel (Argentina) using Landsat imagery. Braz. J. Oceanogr., 59(3): 241-252.
- Cuadrado, D.G. & E.A. Gómez. 2010. Geomorfología y dinámica del canal San Blas, provincia de Buenos Aires. Lat. Am. J. Sediment. Basin Anal., 17(1): 3-16.
- Dalrymple, R.W. & R.N. Rhodes. 1995. Estuarine dunes and bars. In: G.M.E. Perillo (ed.). Geomorphology and sedimentology of estuaries. Dev. Sedimentology 53, Elsevier, Amsterdam, pp. 359-422.
- Davis, Jr.R. & D. Fitzgerald. 2004. Beaches and coasts. Blackwell Science, London, 405 pp.
- Elias, E.P.L. & A.J.F. Van der Spek. 2006. Long-term morphodynamic evolution of texel inlet and its ebb-tidal delta. Mar. Geol., 225: 5-21.
- Fidalgo, F. & J.C. Riggi. 1970. Consideraciones geomórficas y sedimentológicas sobre los rodados patagónicos. Rev. Asoc. Geol. Buenos Aires, 25(4): 430-443.
- Fiechter, J., K.L. Steffen, Ch.N.K. Mooers & B.K. Haus. 2006. Hydrodynamics and sediment transport in a southeast Florida tidal inlet. Estuar. Coast. Shelf Sci., 70: 297-306.
- Folk, P.L. & W.C. Ward. 1957. Brazos river bar – a study in the significance of grain size parameters. J. Sediment. Petrol., 27: 3-26.
- Hayes, M.O. 1975. Morphology of sand accumulation in estuaries. En: L.E. Cronin (ed.). Estuarine research. Academic Press, New York, Vol. 2, pp. 3-22.
- Hayes, M.O. 1979. Barrier island morphology as a function of wave and tide regime. En: S.P. Leatherman (ed.). Barrier islands from the gulf of St. Lawrence to the gulf of Mexico. Academic Press, New York, pp. 1-29.
- Hubbard, D.K., J.H. Barwis & D. Nummendal. 1979. The role of waves and tidal currents in the development of tidal inlet sedimentary structures and sand body geometry: examples from the North Carolina, South Carolina and Georgia. J. Sediment. Petrol., 49: 1073-1092.
- Isla, F. & G. Bujalesky. 1995. Tendencias evolutivas y disponibilidad de sedimentos en la interpretación de

- formas costeras: casos de estudio de la costa argentina. *Rev. Asoc. Arg. Sediment.*, 2(1-2): 75-89.
- Isla, F. & M. Espinosa. 2005. Holocene and historical evolution of fan estuarine complex: the gravel spot of the Walter creek, southern Buenos Aires. *Actas XVI Congreso Geológico Argentino*, pp. 149-154.
- Jelgersma, S., M.J.F. Stive & L. Van der Valk. 1995. Holocene storm surge signatures in the coastal dunes of the western Netherlands. *Mar. Geol.*, 125: 95-110.
- Maddux, T.B., J.M. Nelson & S.R. McLean. 2003. Turbulent flow over three-dimensional dunes. 1. Free surface and flow response. *J. Geophys. Res.*, 108(F1), 6009, doi:10.1029/2003JF000017.
- Oertel, G.F. 1975. Ebb-tidal deltas of Georgia Estuaries. In: L.E. Cronin (ed.). *Estuarine research*. Academic Press, New York, Vol. 2, pp. 267-276.
- Servicio de Hidrografía Naval (SHN), 2010, Tabla de mareas. http://www.hidro.gov.ar/oceanografia/Tmareas/Form_Tmareas.asp, acceso libre. Revisado: 30 agosto 2010.
- Siegle, E., D.A. Huntley & M.A. Davidson. 2007. Coupling video imaging and numerical modeling for the study of inlet morphodynamics. *Mar. Geol.*, 236: 143-163.
- Van Goor, M.A., T.J. Zitman, Z.B. Wang & M.J.F. Stive. 2003. Impact of sea-level rise on the morphological equilibrium state of tidal inlets. *Mar. Geol.*, 202: 211-227.
- Van Veen, J., A.J.F. Van der Spek, M.J.F. Stive & T.J. Zitman. 2005. Ebb and flood channel systems in the Netherlands tidal waters. *J. Coast. Res.*, 21(6): 1107-1120.
- Venditti, J.G. 2003. Initiation and development of sand dunes in river channels. Ph.D. Thesis, University of British Columbia, Vancouver, 291 pp.
- Wang, Z.B., T. Louters & H.J. de Vriend. 1995. Morphodynamic modelling for a tidal inlet in the Wadden Sea. *Mar. Geol.*, 126: 289-300.

Received: 13 May 2010; Accepted: 28 December 2011