

MIGRACIÓN DE DUNAS DURANTE EVENTOS EXTREMOS DEL RÍO PARANÁ

Silvina G. Serra, Carlos A. Vionnet

Centro Nacional de Estudios Hydroambientales (CENEHA), Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH)
Universidad Nacional del Litoral. Ciudad Universitaria, CC 217 (3000), Santa Fe, Argentina. TE +54(342)4575233.
E-mail: sserra@fich1.unl.edu.ar – vionnet@fich1.unl.edu.ar

RESUMEN

El Método de Seguimiento de Dunas (MSD) es comúnmente usado para el cálculo del transporte sólido de fondo, y de sencilla aplicación cuando se dispone de registros de perfiles longitudinales del lecho del curso fluvial en interés relevados durante sucesivos períodos de tiempo. Sin embargo, las dunas observadas durante las grandes crecidas del río Paraná en su tramo medio presentan características que ponen en juicio las bases teóricas del método y su aplicabilidad por presentar dunas pequeñas o megarizos desplazándose sobre éstas. También, las grandes dunas pueden presentar una pendiente de su cara de avance cercana al ángulo de reposo del material de fondo o muy por debajo de éste. En este trabajo se presenta una metodología para evaluar el transporte sólido de fondo, partiendo del SMD y teniendo en cuenta la presencia de formas de fondo jerárquicas, siguiendo ideas tomadas de la escuela rusa, y la pendiente del frente de las grandes dunas. La misma se aplica a datos relevados en el tramo medio del río Paraná, específicamente a la altura del emplazamiento del Túnel Subfluvial Hernandarias que une las ciudades de Santa Fe y Paraná, durante las grandes crecidas de los años 1983, 1992 y 1998.

ABSTRACT

A commonly used method to estimate bed load transport rate is to track dunes migration. Then, whenever enough echo sounding records are available along the same profile on a sandy riverbed at successive periods of time, a simple formula provides the sought bed load rate. However, a dominant feature of the large dunes observed in the sandy bed of the Paraná River is the persistent presence of wavelets migrating on top of their carrier sand waves. These larger dunes may present steep-slope fronts, or occasionally, low-slope fronts. In this work, a methodology is used to quantify the bed load transport associated with a hierarchy of migrating bedforms, following ideas borrowed by the Russian school. This approach is applied to the echo sounding records that show the riverbed evolution of the Paraná River in Argentina during few days of the extreme floods of 1983, 1992, and 1998.

INTRODUCCIÓN

Como ha sintetizado el Comité de la ASCE, conformado a los fines de examinar el estado del arte concerniente al conocimiento del flujo y transporte en ríos con lecho no cohesivo (ASCE 2002), las dunas resultan de una clase de modelo de onda conformadas por la continua interacción entre el flujo y el lecho arenoso del río al que pertenecen (Best 2004). Estas juegan un importante rol en el transporte de sedimentos de fondo (Van Rijn 1993), tanto como en la estructura turbulenta desarrollada cerca del lecho (Nelson et al. 1995). De todas formas, es importante conocer su evolución y movilidad en ríos navegables, donde pueden llegar a adquirir amplitudes tales que sus crestas crezcan por sobre los calados medios (Van Rijn 1993), y a la vez, sus valles pueden destapar conductos y otras estructuras ubicadas por debajo del lecho (Morelissen et al. 2003). Un caso puntual está dado por lo ocurrido en el Túnel Subfluvial Hernandarias que une las ciudades de Santa Fe y Paraná (Fig. 1). La estabilidad de la estructura ha corrido serios riesgos durante la crecida extraordinaria del año 1983, cuando una gran duna de casi 7m de altura descubrió parte de la obra. La estructura requiere de una tapada mínima de 3m de arena para asegurar su estabilidad, de otra forma tendería a flotar por el principio de Arquímedes (Fig. 2).

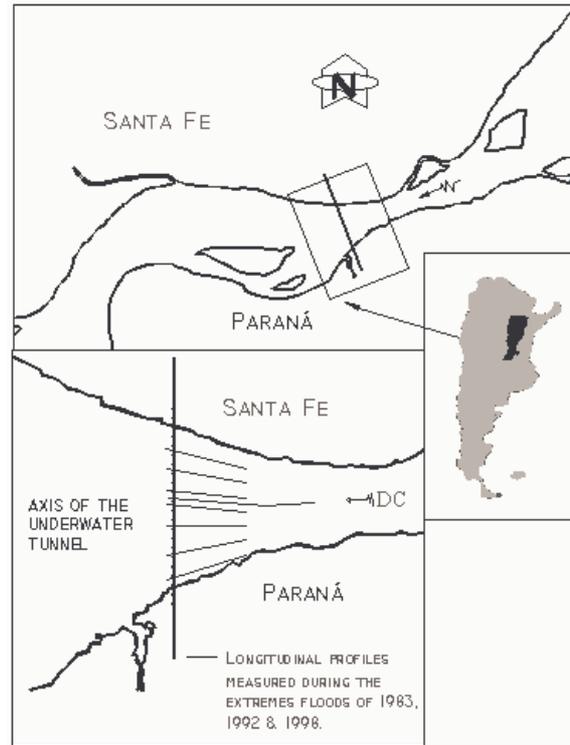


Figura 1. Río Paraná, área de análisis.

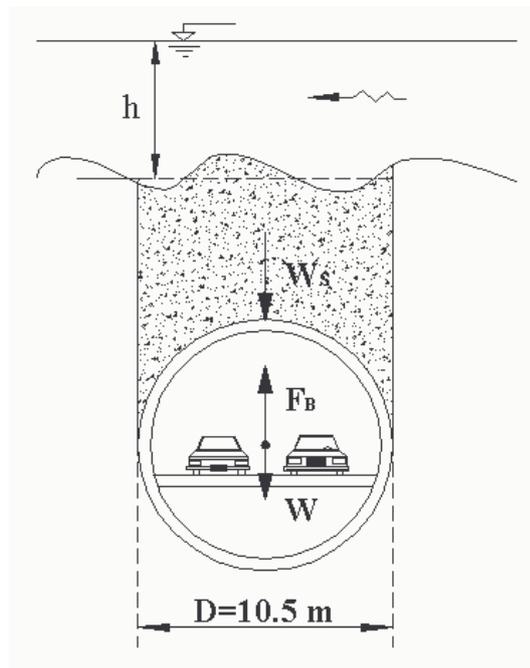


Figure 2. Gráfica esquemática del comportamiento estructural del Túnel Subfluvial Hernandarias que une las ciudades de Santa Fe y Paraná. La estructura debe tener una tapada de arena mínima que asegure su estabilidad.

Esta comunicación técnica intenta describir el tratamiento realizado a una serie de datos provenientes de fajas ecográficas correspondientes a relevamientos realizados durante las crecidas de los años 1983, 1992 y 1998 en el tramo del río Paraná que contiene la traza del Túnel Subfluvial Hernandarias mostrado en la Figura 1. El principal objetivo es estimar la capacidad de transporte de sedimentos de fondo en condiciones de aguas altas usando el

método de migración de dunas (Van Rijn 1993), basado en la dificultad de obtener mediciones directas (Lelievre y Navntoft 1980). El método asume que el perfil longitudinal de una duna típica es esencialmente asimétrico con una pendiente de la cara de aguas arriba que forma un ángulo con el lecho cercano al ángulo de reposo del material sumergido. ($\approx 20^\circ$), donde se atrapan todas las partículas de sedimento que vienen viajando por la cara de aguas arriba de la duna, caracterizada por poseer una pendiente muy tendida. Una característica común en los grandes ríos de llanura, es la presencia de formas de fondo jerárquicas, esto es, formas de fondo superpuestas a otras de mayor tamaño, que se pueden identificar por el orden de magnitud de sus escala espacial como, de orden 1 u $O(1)$ las de mayor tamaño y menor frecuencia espacial, de orden 2 u $O(2)$ la siguiente escala y así sucesivamente. En el río Paraná es común la persistente presencia de dunas de menor tamaño o “*megarizos*” (dunas de $O(2)$) migrando sobre grandes dunas (dunas de $O(1)$). Para complicar aun mas las cosas, las dunas de orden $O(1)$, pueden presentar una pendiente de su cara de aguas arriba cercana al ángulo de reposos del material (Amsler y Schreider 1992) o, ocasionalmente, un frente muy tendido. Consecuentemente, en éste trabajo se utiliza una metodología para tener en cuenta estas diferentes situaciones.

METODOLOGÍA

Crecidas extremas del río Paraná:

El tramo medio del río Paraná corre sobre un valle de muy escasa pendiente. Este puede considerarse de escurrimiento entrelazado, con un ancho de cauce promedio de 1000 m y una profundidad media de 10-12 m. Está limitado por una costa barrancosa del lado de la Provincia de Entre Ríos y por un valle de inundación de unos 15 km de ancho del lado de la Provincia de Santa Fe (Fig. 1). La pendiente de energía es de aproximadamente 4×10^{-5} , y el sedimento de fondo está compuesto de arenas finas y medias, mientras que el material del lecho del valle de inundación se constituye de sedimentos limo-arcillosos, en un espesor de unos 4-6 m. Los registros de datos del tramo medio del Paraná se extienden a un siglo de información, siendo la primer gran crecida registrada la del año 1905.

En la Tabla 1, Q_t es el caudal total en el valle y el cauce, Q_{mc} es el caudal sólo en el cauce principal, H es la altura hidrométrica en Puerto Paraná, ubicado cerca de la traza del Túnel Subfluvial (Fig. 1). Los caudales fueron estimados usando una relación empírica entre el nivel hidrométrico y el Caudal total y del cauce principal.

Tabla 1. Crecidas extremas del Río Paraná.

Año	Q_t (m^3/s)	Q_{mc} (m^3/s)	H (m)
1905	50,100	30,100	6.70
1911-1912	39,000	23,500	5.65
1922	38,100	22,900	5.53
1928	39,200	23,500	5.65
1966-1967	42,000	26,400	6.16
1982-1983	62,500	31,000	6.83
1990	44,000	25,000	5.92
1992	54,000	31,500	6.89
1998	50,600	30,200	6.72

Estimación del caudal sólido de fondo por el Método de Seguimiento de Dunas (MSD)

La Fig. 1 muestra los perfiles del lecho relevados con ecosonda acústica durante la últimas tres grandes crecidas del río Paraná incluidas en la Tabla 1. Estos contienen las formas de fondo periódicas y de amplitud Λ finita que se desarrollan en el lecho del Paraná, las que, si no cambian de forman, permiten calcular el transporte de material de fondo por unidad de ancho del cauce (L^2T^{-1}) con la ya bien conocida expresión

$$q_B = n\sigma c_B \Lambda \quad (1)$$

donde n es la fracción sólida del material del lecho (i. e. $=1-p$ donde p es la porosidad media del arena), σ es un coeficiente de forma de la duna y c_B es la celeridad de las dunas. La fórmula puede ser derivada de la ecuación de conservación de la masa junto con una relación cinemática válida para propagación de ondas que no cambian de forma, i.e., si z es la posición del lecho respecto de un datum, entonces la onda de arena de forma permanente debe satisfacer $z = z(x - c_B t)$, donde x es la coordenada en el sentido de la corriente y t es el tiempo (Fredsoe 1982, Van Rijn 1993). Entonces, el principio básico para la aplicación de la fórmula (1) es contar con relevamientos del mismo perfil del río medidos durante distintos lapsos de tiempo y bajo similares condiciones del flujo.

Procesamiento de los datos.

Las fajas ecográficas (Fig. 3) fueron recortadas en partes de escala longitudinal aproximadamente constante (la escala longitudinal de la faja varía con la velocidad de la lancha hidrométrica en la que de encuentra el equipo de medición). Los trozos de faja fueron escalados, llevándolos a coordenadas Gauss-Krüger, y referenciando a la profundidad del lecho con cotas IGM. Luego los trozos de faja se volvieron a unir conformando un registro georeferenciado.

Luego, el par progresiva x , cota del lecho z fueron digitalizados con un incremento espacial de los puntos de 0.80 m. La Figura 4 muestra el resultado de este procedimiento para relevamientos correspondientes a la crecida de 1983.

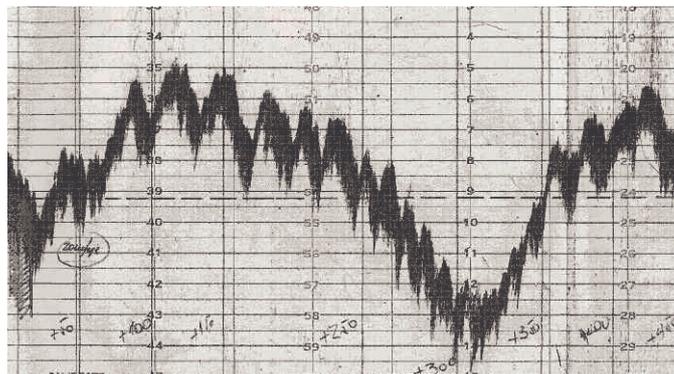


Figure 3.- Faja ecográfica relevada el día 28/06/1992 sobre la progresiva 1250, a la altura del eje del Túnel Subfluvial Hernandarias.

Para mayor detalle, la variación de la geometría de la sección transversal como la expansión del flujo luego de la contracción (ver Fig. 1), y el tamaño medio de la partícula de sedimento se muestran en la Figura 5, junto con los perfiles del lecho correspondientes a la tres crecidas

extraordinarias aquí citadas. En ésta Figura se puede notar la diferencia entre la pendiente de la cara de aguas arriba de las dunas para las crecidas de 1983 y 1998 (pendiente abrupta para la primera y suave para la segunda). Notar que mientras la Figura 4 utiliza un sistema de coordenadas local, implementado por las Autoridades Administrativas del Túnel Subfluvial, la Fig. 5 utiliza el sistema de coordenadas geográfico local de Argentina (i.e., proyección Gauss-Krüger)

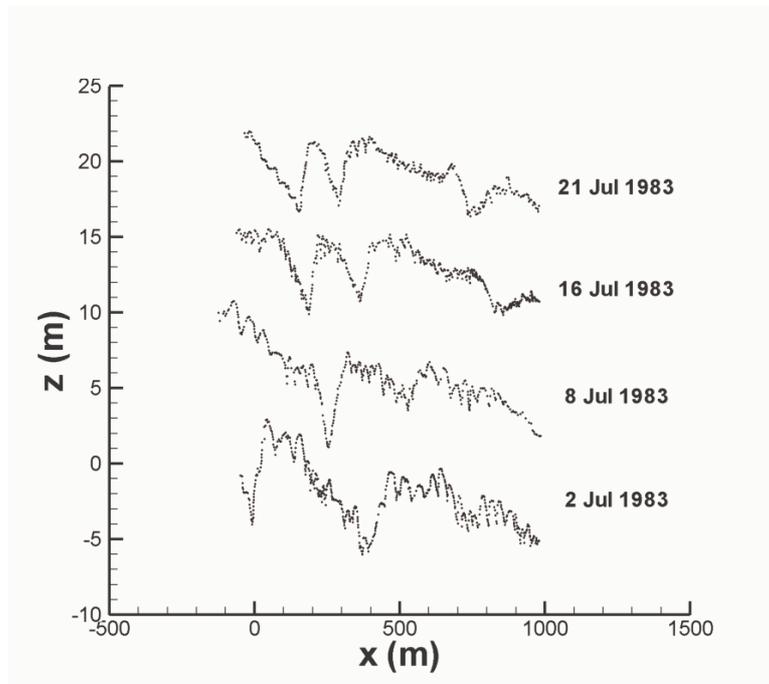


Figura 4. Relevamientos del lecho durante la crecida extraordinaria de 1983.

Consecuentemente, si la pendiente de la cara de aguas arriba de la duna de O(1) es importante, es razonable asumir que todo el material que pasa por sobre la cresta de la duna es capturado por la zona de recirculación y depositado. De lo contrario, si la pendiente de la cara de aguas arriba de la duna de O(1) es suave, no habrá separación del flujo (Best et. Al. 2004) y una indeterminada cantidad de partículas se moverán hacia aguas arriba por rodamiento, deslizamiento o saltación (Fig. 6). De esta forma, una tasa constante de transporte de fondo deja de contribuir a la migración de las grandes dunas y la ecuación (1) debe ser modificada para tener ahora en cuenta la superposición de las dunas mas pequeñas o de O(2) (Sidorchuck, 1990).

$$q_B = \frac{n}{2} c_{B_1} \Lambda_1 + f_2(c_{B_2}, \Lambda_2) \quad (2)$$

Donde los subíndices 1 y 2 hacen referencia a las dunas de O(1) y O(2). Para cuantificar la contribución de f_2 de las pequeñas dunas que se superponen a las mayores, se aplicó la fórmula de Sidorchuck (Vionnet 2004). A esos efectos, las series con cotas del lecho digitalizadas, fueron primeramente tratadas con el Método de Transformadas Discretas de Fourier (TDF) al fin de separar las dunas grandes de las pequeñas.

En otras palabras, la posición instantánea de la cota del lecho se expresa en el dominio del espacio de las frecuencias con una transformada de Fourier

$$\hat{z}(f;t) = \int_{-\infty}^{\infty} z(x,t) e^{i2\pi f x} dx \quad (3)$$

Donde f es la frecuencia espacial, entonces luego pueden separarse las dunas de $O(1)$ de las de $O(2)$, identificándolas como ondas de alta y baja frecuencia (si se supone que la progresiva longitudinal reemplaza al tiempo en el análisis clásico de Series de Fourier) utilizando un filtro.

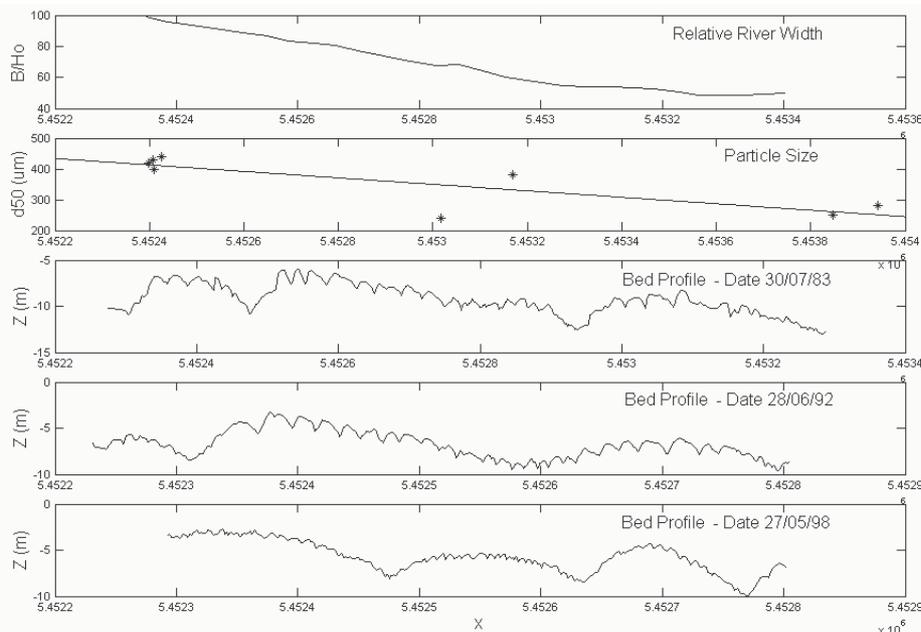


Figure 5.- Características del tramo de cauce y registros de los perfiles longitudinales digitalizados.

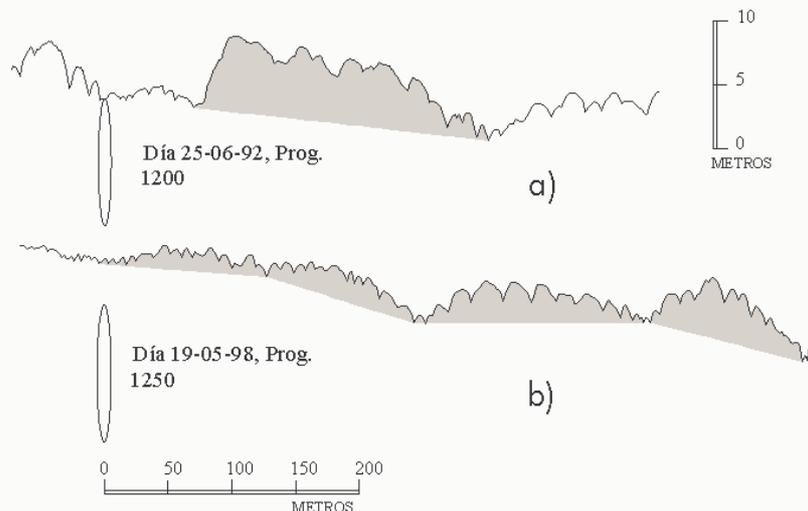


Figura 6.- a) duna de frente abrupto, b) duna de frente suave.

En otras palabras, es importante filtrar en el dominio de las frecuencias, lo que requiere una transformación previa de la serie completa de datos con FFT (la forma rápida de calcular la TDF), multiplicando la salida de la FFT por una función filtro $H(f)$, y luego calculando la

FFT inversa para volver al dominio físico. Una vez que se dispone de los datos filtrados (Fig.7), se obtiene el desplazamiento de las dunas de distinto orden (1 o 2) por comparación de las series correspondientes a un mismo perfil medidas en distintos tiempos.

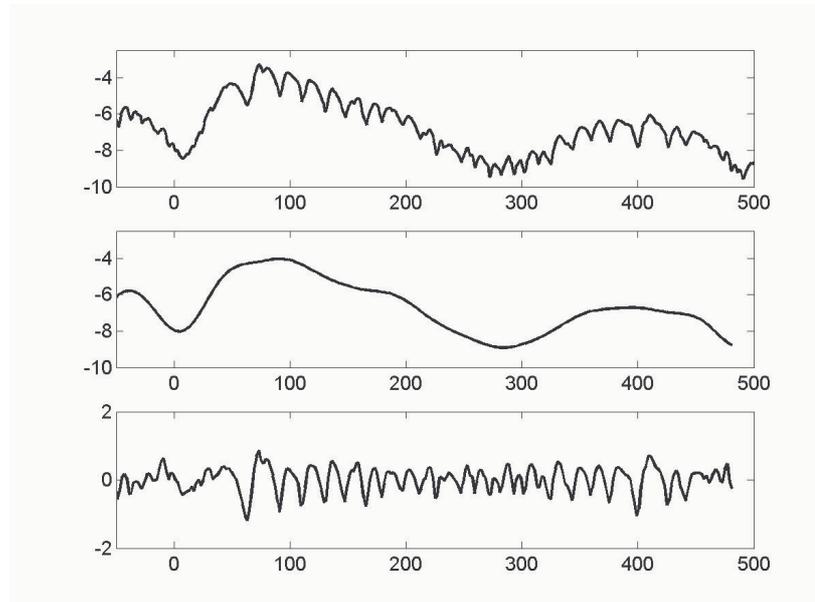


Figura 7.- Filtrado de los perfiles: arriba: perfil longitudinal original, al medio: dunas de O(1), abajo: dunas de O(2).

RESULTADOS

Los resultados preliminares muestran que los ángulos de la cara de aguas arriba de las dunas observadas durante los eventos extremos de los años 1983, 1992 y 1998 han ido cambiando por razones aún no claras (Tabla 2)

Tabla 2. Ángulo del frente de avance de las dunas.

Crecida	Ángulo cara de avance
1983	3-10°
1992	3-9
1998	3-6°

Sin embargo, cálculos preliminares han demostrado que la contribución de la función f_2 en la Ecuación (2) por la presencia de las dunas de O(2) puede llegar a representar el 40% de la carga de fondo total, cantidad que no se tendría en cuenta en el caso de aplicar la Ecuación (1).

CONCLUSIONES

Se ha encontrado que cuando la dinámica de dunas es comúnmente caracterizada por la alta variabilidad de su amplitud, longitud y celeridad, el problema de calcular el transporte de fondo por el método de desplazamiento de dunas se complica por la presencia de dunas superpuestas a dunas mayores migrando sobre ellas. Consecuentemente, se ha aplicado una metodología simple para calcular el transporte de fondo teniendo en cuenta la migración de formas de fondo jerárquicas, siguiendo una metodología que fue desarrollada por la escuela Rusa. En este caso, cálculos preliminares muestran que la contribución de la función f_2 en la

Ecuación (2) por la presencia de ondas mas rápidas puede aumentar hasta en un 40% la magnitud obtenida si se implementaría la Ecuación (1). Al presente, se realizan cálculos a los fines de obtener una estimación independiente, utilizando datos obtenidos del seguimiento de la evolución de una trinchera excavada en el mismo emplazamiento en que se relevaron los perfiles batimétricos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASCE.** (2002). “Flow and transport over dunes”, ASCE Task Committee on Flow and Transport, *J. Hydraul. Engineering*, 127: 726-728.
- Best, J.** (2004). “The dynamics and morphology of river dunes: synthesis and future research directions”, In: Hulscher, Garlan & Idier (eds.), *Marine Sandwave and River Dune Dynamics II, Proc. intern. Workshop*, Enschede, the Netherlands, 1-2 April 2004, I-VI.
- Best, J.; Kostaschuck R.; & Hardy, R.** (2004). “The fluid dynamics of low-angle river dunes: results from integrated field monitoring, laboratory experiments and numerical modelling”. In: Hulscher, Garlan & Idier (eds.), *Marine Sandwave and River Dune Dynamics II, Proc. intern. Workshop*, Enschede, the Netherlands, 17-23
- Fredsoe, J.** (1982). “Shape and dimensions of stationary dunes in rivers”. *J. Hydraul. Div. ASCE*, 108: 932-947.
- Lelievre, J. & Navntoft, E.** (1980). “Measuring sediment load in the Paraná River”. *Water Power and Dam Construction*, (April): 21-24.
- Morelissen, R.; Hulscher S.J.M.H.; Knaapen M.A.F.; Németh A.A. & Bijker R.** (2003), “Mathematical modelling of sand wave migration and the interaction with pipelines”. *Coastal Engineering*, 48: 197-209.
- Nelson, J.M.; Shreve R.L.; McLean S.R. & Drake T.G.** (1995). “Role of near-bed turbulence structure in bed load transport and bed form mechanics”. *Water Resources Research*, 31: 2071-2086.
- Schreider, M. I. & Amsler, M. L.** (1992). “Bedforms Steepness in Alluvial Streams”, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 30. No 6: 725 – 743.
- Sidorchuk, A.**(1990), “Cálculo de la velocidad de transporte de formas de fondo y del caudal de material en suspensión”. *Recursos Hídricos*, Vol. 5.
- Van Rijn, L.C.** (1993). “Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas”, *Aqua Pub.* The Netherlands.
- Vionnet, C.A.** (2004). “Estimates of bed load transport by a hierarchy of bedforms (a series of papers of A. Sidorchuk translated to Spanish from Russian by P. Kurgansky)”. Int. Report Ceneha 02-04, FICH, UNL, Santa Fe., May 2004.