

## FLUJO Y TRANSPORTE SOBRE UN LECHO CUBIERTO CON DUNAS

Serra Silvina G., Gaudin Horacio, Vionnet Carlos A.  
Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas. Universidad Nacional del Litoral  
E-mail: sserra@fich1.unl.edu.ar , vionnet@fich1.unl.edu.ar

### RESÚMEN

Hoy en día hay un renovado interés por profundizar el conocimiento que se tiene sobre la mecánica de dunas. Este impulso se debe al reciente forum “Flujo y transporte sobre dunas”, adelantado por un Comité de Tareas específicamente formado en el seno de la Asociación de Ingenieros Civiles de los Estados Unidos (ASCE). No obstante, el problema siempre ha estado en el centro de la Ingeniería Fluvial, puesto concentró la atención de ingenieros y científicos por igual. El problema en sí es de interés para estudios de navegación fluvial, donde en ocasiones el crecimiento persistente de dunas –previamente “cepilladas”– origina costosas obras de dragado para el mantenimiento de la vía navegable, hasta los riesgos que ocasiona el pasaje de grandes dunas sobre obras enterradas en el lecho, las que requieren de una tapada de seguridad para garantizar su estabilidad. Este trabajo presenta algunos resultados obtenidos con registros históricos de las grandes crecidas de 1983, 1992, y 1998. Un rasgo distintivo es el filtrado de Fourier de las dunas pequeñas de las grandes para la estimación de la carga de fondo. El cálculo del transporte verificado en dos trincheras de prueba permite una comparación del transporte entre aguas medias y altas.

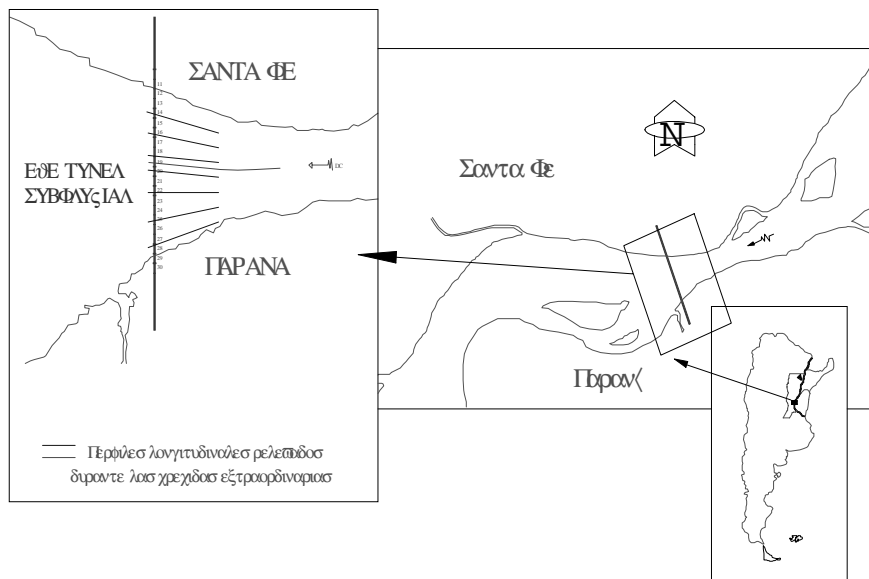
### ABSTRACT

There is a renewed interest to deep the current knowledge on the mechanics of dunes. A major part of the interest was triggered by the recent forum “Flow and transport over dunes” established by the Task Committee of the American Society of Civil Engineers (ASCE). Nevertheless, the problem has been at the hart of the Fluvial Hydraulics, since dunes mechanics has always attracted the attention of engineers and scientists for equal. The problem is still of considerable interest for navigation studies, where the persistent growth of dunes induces costly maintenance dredging to keep the waterways open, to the stability of structures that requires a thick cover of sand to keep them in place. This communication presents the outcome of the analysis being made on historical records of migrating dunes over the underwater tunnel “Hernandarias” on the occasion of the big floods of 1983, 1992, and 1998. A salient feature of the analysis is the Fourier filtering of sand waves of high frequency (mega-ripples) to separate the contribution of large dunes to the bed-load transport. A complimentary analysis, based upon the temporal evolution of two trenches allows the comparison of the bed-load being transported in period of normal and high waters.

### INTRODUCCIÓN

Recientemente, un comité de expertos de la Asociación Norteamericana de Ingenieros Civiles (ASCE Task Committee, 2002) concluía que si bien los ingenieros y científicos interesados en describir la evolución de cauces aluviales están en condiciones de predecir la capacidad de transporte de sedimentos del río, la cuantificación de los procesos de erosión de márgenes, de sedimentación de canales de navegación, de formación, crecimiento y eventual desintegración de islas, entre otros muchos problemas de relevancia tanto práctica como académica, aún presentan un margen de error considerable. En rigor, el comité fue muy explícito en formular, en términos muy sencillos, el problema básico de la ingeniería fluvial: *dado un tipo particular*

de sedimento y fluido, una cierta geometría del cauce, y una descarga líquida impuesta; ¿cuál será el tirante de agua esperado y la cantidad de sedimento transportado? Aún considerando el escenario más simple de todos; lecho con sedimento de granulometría uniforme en cantidad suficiente, en un canal inicialmente rectilíneo y de sección transversal prismática y uniforme con márgenes estables, la respuesta a esta pregunta puede darse únicamente en términos probabilísticas, con una gran incertidumbre en los valores finales. Esta dificultad técnica para encontrar una respuesta sencilla a cuestionamiento tan elemental, tiene sus raíces en la naturaleza triplemente diferenciada de ciertos mecanismos que gobiernan la evolución morfológica de cauces aluviales (continua competencia entre la resistencia al escurrimiento, el transporte de sedimentos, y la reacción del flujo ante cambios en ambos mecanismos). Por tanto, es imposible desarrollar una teoría para analizar una faceta del problema con independencia de los otros mecanismos actuantes. En rigor, el comportamiento de un sistema aluvial está condicionado por una multiplicidad de mecanismos tipificados por otras tantas escalas temporales y espaciales, lo que obstaculiza la obtención de un único modelo teórico que explique desde la conocida resistencia de piel -a escala del grano de sedimento en un lecho inicialmente plano- hasta la resistencia y transporte que se verifica a escala de los meandros del río (Parker, 1998). No obstante, hay una escala del problema en la cual es posible analizar resistencia y transporte en condiciones de cuasi-equilibrio dinámico; y este es el rango de valores de los parámetros del flujo que caracteriza la existencia de dunas y de barras (o grandes bancos) de arena.



**Figura 1:** Tramo del río Paraná analizado. Líneas de corriente relevadas

El interés por profundizar el conocimiento de la mecánica de dunas tiene motivaciones prácticas, como por ejemplo, determinar el calado efectivo en ciertos puntos críticos de una vía navegable ante un recrecimiento considerable de las crestas de dunas, determinar la pérdida de estabilidad de obras de arte enterradas en un lecho erosionable (túneles, gasoductos, etc.) ante el pasaje de dunas de gran amplitud que, eventualmente, dejan al descubierto la estructura, o la posibilidad que minas antisubmarinas sean tapadas, o destapadas, por la acción de dunas.

## Objetivos

En esta comunicación técnica, la discusión se restringe al análisis de los parámetros que tipifican la migración -o la cinemática- de dunas en el tramo del río Paraná que comprende la traza del Túnel Subfluvial Hernandarias (Fig. 1). El trabajo pretende continuar y ahondar ciertos aspectos del problema teniendo en cuenta la experiencia acumulada por la FICH en estos últimos años (Pujol et al., 1994; entre otros). El presente trabajo tiene los siguientes objetivos específicos: (i) la generación de una base de datos, partiendo tanto de información histórica como de información de campo recolectada por el grupo de trabajo, que permita la cuantificación de parámetros que caracterizan la migración de dunas: amplitud, longitud de onda, celeridad relativa de la forma de fondo, concentración relativa de la fase sólida, etc. (ii) la estimación de tasas de transporte a partir de los datos compilados en la primera fase, con miras a su posterior reproducción mediante simulaciones numéricas. En síntesis, la generación de un banco de datos, ya sea por captura directa de información de campo con la lancha hidrográfica de la FICH, o por procesamiento de información histórica de crecidas extremas (registros de sonda ecógrafa obtenidas por el Ente Adm. del Túnel), cumple con el doble propósito de dar sustento al presente trabajo, y a su vez, de servir como información de contraste y validación de herramientas numéricas preexistentes y en desarrollo.

## METODOLOGÍA

En primer lugar, se está actualizando la base bibliográfica de manera que refleje el estado del arte a partir del reciente impulso que recibió el tema a nivel internacional (ASCE Task Committee, 2002). Paralelamente, el trabajo se divide en cuantificar el transporte de sedimento de fondo por métodos indirectos (seguimiento de la migración de un tren de dunas), y métodos directos (seguimiento de la evolución de dos trincheras de prueba excavadas en la zona). Para la aplicación del método directo, se parte de considerar los registros históricos producidos por el Ente de Adm. del Túnel Subfluvial durante las crecidas excepcionales de 1982/82, 1992, y 1998. En este caso, se apunta a separar la contribución al transporte de fondo producido por el desplazamiento de grandes dunas de las pequeñas mediante un filtrado de Fourier.

Si bien la información sobre evolución del lecho, relevada por personal del Túnel Subfluvial durante las crecidas extraordinarias y consistente en perfiles longitudinales a lo largo de transectas (Fig.1), es abundante, no es de interpretación ni tratamiento directo ya que consisten en registros de faja ecógrafa realizada desde una embarcación en movimiento. En consecuencia, la información no presenta escalas verticales y longitudinales uniformes. En todo caso, es segmentada, por lo que la primera etapa del trabajo consistió en la transformación de la información a datos digitales, muestreados uniformemente tal como lo requiere el análisis espectral (Nordin y Algert 1966). La información producida fue convenientemente referenciada en coordenadas Gauss Krüger y en cotas del Instituto Geográfico Militar.

Para el seguimiento de la evolución de dos trincheras excavadas en el lecho sobre la traza del túnel, se contó con información de la trinchera realizada en 1960, previo a la construcción del Túnel, y la otra en el año 1992, previo a la colocación de la cubierta protectora de la estructura.

La estimación de los caudales sólidos del fondo se realizó aplicando tres metodologías:

• *Estimación indirecta de  $q_b$  mediante el seguimiento de la migración de trenes de grandes dunas* (Van Rijn, 1993): Para un tren de dunas que se propaga a celeridad constante  $c_b$  sin cambio de forma, se aplicará la siguiente expresión,

$$q_b = \sigma c_b \Delta$$

siendo  $\Delta$  la amplitud de la duna y  $\sigma$  un coeficiente que tiene en cuenta la forma de la duna y la porosidad del material del lecho.

• *Estimación indirecta, y corregida, de  $q_b$  mediante la separación de Fourier de los trenes de dunas de menor tamaño.* En este caso, se intentará aplicar la fórmula desarrollada por Sidorchuk (1990), que incorpora la contribución de pequeñas dunas superimpuestas a dunas mayores,

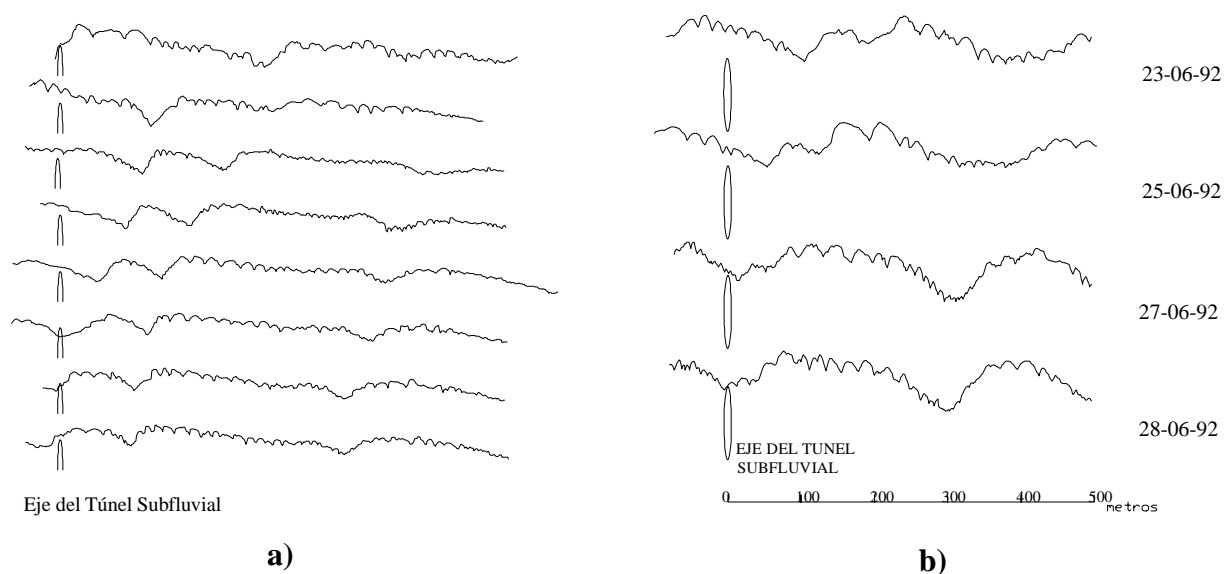
$$q_b = \sigma_2 c_{b2} \Delta_2 + (\sigma_1 c_{b1} \Delta_1)_{1,2}$$

donde los subíndices indican el orden de frecuencia dominante de duna (1:duna pequeña, 2:duna grande). Para dunas deformables,  $\sigma$  se transforma en una variable.

• *Estimación directa de  $q_b$  mediante el análisis de la evolución de trincheras:* la integración de las ecuaciones de gobierno del proceso hidro-sedimentológico permite, bajo el sustento de una serie de hipótesis simplificadoras, el cálculo directo de la carga de fondo por la comparación sucesiva -a diferentes tiempos- del estado de la trinchera.

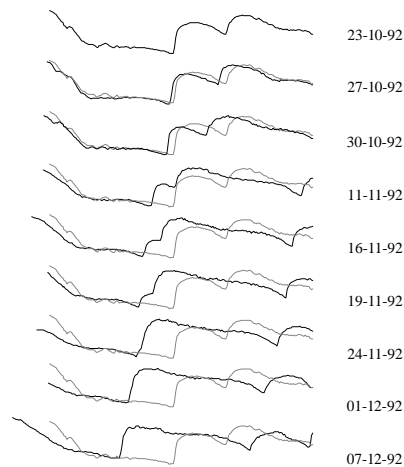
## RESULTADOS

Con el procesamiento de los datos se obtuvieron gráficos de la evolución de dunas durante las crecidas extraordinarias como la que se muestra en la Fig. 2 y de la evolución de trincheras como puede verse en la Fig. 3.



**Fig. 2:** Seguimiento de grandes dunas, datos relevados : a) a lo largo de la progresiva transversal 1256 entre el 2

y el 31 de julio de 1983, b) a lo largo de las progresivas 1200, 1250, 1300 y 1350 entre el 23 y el 28 de junio de 1992.



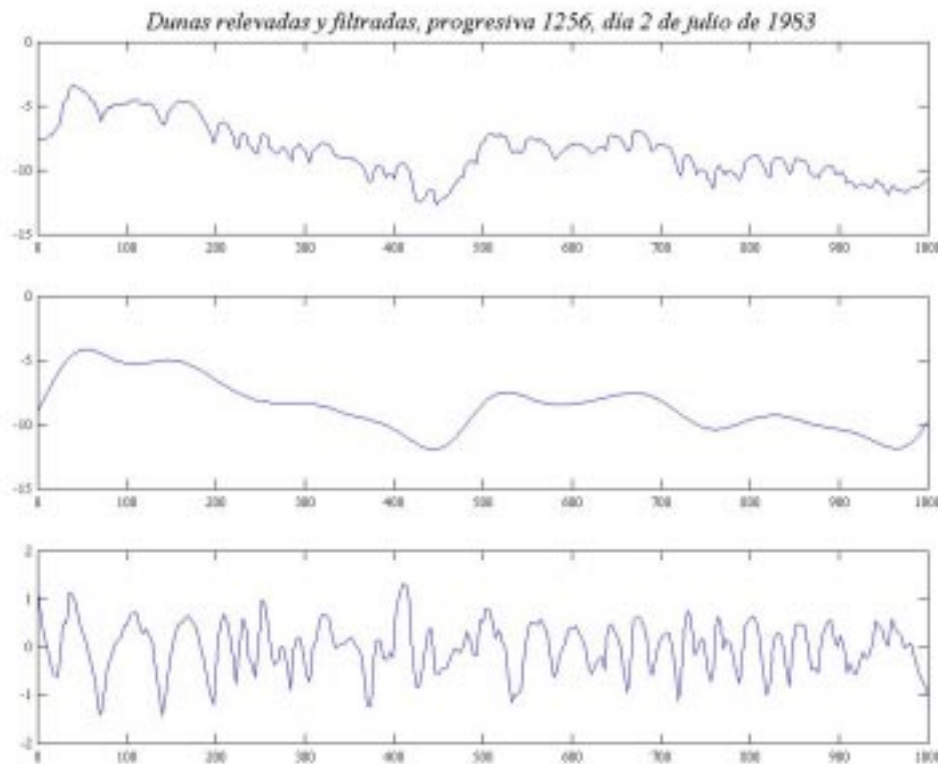
**Fig. 3:** Evolución de la trinchera excavada sobre el eje del Túnel Subfluvial. Datos relevados sobre la progresiva 1538 entre los días 23-10 y 7-12 de 1992.

• *Estimación indirecta de  $q_b$  mediante el seguimiento de la migración de trenes de grandes dunas (Van Rijn, 1993):* Se presentan magnitudes de los parámetros hidráulicos y sedimentológicos promedio obtenidos para cada crecida extraordinaria. El cálculo se realizó con la metodología detallada en el punto anterior.

**Tabla 1:** Parámetros estimados con seguimiento de grandes dunas.

Fecha	H (m)	U (m/s)	$q(m^2/s)$	$\Delta(m)$	$c_b(m/día)$	$q_b(m^2/día)$	$\psi_b=q_b/q$
Julio '83	6.61	1.84	25.67	4.40	18.0	31.4	1.42e-5
Junio '92	6.70	1.94	26.46	5.50	21.8	47.5	2.08e-5
Mayo '98	6.60	1.78	24.83	3.35	17.2	22.8	1.06e-5

• *Estimación indirecta, y corregida, de  $q_b$  mediante la separación de Fourier de los trenes de dunas de menor tamaño (Nordin, 1966):* Se procedió a la separación de las dunas pequeñas de las dunas grandes, llamándose dunas de primer orden a las pequeñas y de segundo orden a las grandes. La separación se realizó aplicando el método de la Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transformed, FFT*), el que permite transformar el espacio físico en un espacio de frecuencias, pudiéndose dentro de éste identificar las amplitudes de dunas dominantes y por medio de un filtro del tipo Butterworth separar las altas de las bajas frecuencias. Una vez separadas las frecuencias se puede volver al espacio físico utilizando la Transformada Rápida de Fourier Inversa. La eficiencia del método de filtrado se muestra en la Fig. 4.



**Fig. 4:** Dunas relevadas el día 02/07/83, durante la crecida extraordinaria de 1982-83, en el sentido de arriba hacia abajo se muestran el perfil original, las dunas grandes o de segundo orden y las dunas pequeñas o de primer orden.

Los cálculos realizados sobre las dunas separadas permitieron observar que las dunas de primer orden poseen las mismas características en cuanto a su geometría y cinemática que las usualmente encontradas en el mismo lecho durante estados hidrológicos normales. El valor promedio del caudal sólido aportado por éstas es del orden de  $1\text{m}^3/\text{día}$  el que, según la fórmula de Sidorchuck presentada, aumenta al caudal sólido de fondo determinado con la migración de las dunas de segundo orden entre el 2 al 4 %, llegando en algunos casos a ser del orden del 10%, y no altera el orden de magnitud del parámetro de transporte  $\psi_b$ .

• *Estimación directa de  $q_b$  mediante el análisis de la evolución de trincheras:* la integración de las ecuaciones de gobierno permitieron estimar el caudal sólido de fondo en forma directa por medio de la evaluación de la variación volumétrica de cada trinchera. Los valores obtenidos se presentan en la tabla 2.

**Tabla 2:** Parámetros estimados con seguimiento de trincheras.

Fecha	H (m)	U (m/s)	$q(\text{m}^2/\text{s})$	$q_b(\text{m}^2/\text{día})$	$\psi_b=q_b/q$
Dic-ene.'60-'61	2.65	1.00	11.40	3.1	$3.15\text{e-}6$
Oct-dic.'92	4.32	1.33	15.53	2.5	$1.86\text{e-}6$

**CONCLUSIONES:**

En la Fig. 5 se plotean los valores preliminares de transporte de sedimento (como carga de fondo) estimados por los dos métodos (seguimiento de dunas, evolución de trincheras) Puede verse que hay un orden de magnitud de diferencia lo que indicaría que el transporte se intensifica notablemente en situaciones decrecida.

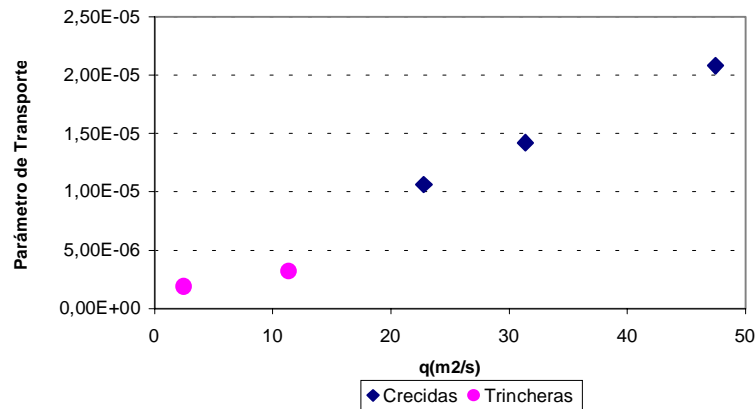


Fig. 5: Parámetro de transporte vs. caudal líquido unitario. Valores determinados por seguimiento de grandes dunas y por seguimiento de evolución de trincheras.

### LISTA DE SÍMBOLOS:

$h$ : tirante hidráulico

$u$ : velocidad media de la corriente

$q$ : caudal líquido unitario

$\Delta$ : altura de la duna

$c_d$ : celeridad de la duna

$q_b$ : caudal sólido de fondo

$\Psi_d$ : parámetro de transporte resultante del cociente entre el caudal sólido y el caudal líquido.

### Referencias

ASCE Task Committee (2002): "Forum on flow and transport over dunes", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 128, pp 726-728.

Nordin C., and Algert J. (1966): "Spectral analysis of sand waves." *Journal of Hydraulic Division*, Vol. 92, HY5, pp 95-114.

Pujol A., Amsler M., Schreider M., Trento A., Toniolo H., and Gaudin H. (1994): "Estudio experimental de un escurrimiento sobre dunas rígidas con pequeñas dunas superimpuestas, XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica, IAHR, Vol. 2, pp 405-416.

Sidorchuk A. (1990): "Cálculo de la velocidad de transporte de formas de fondo y del caudal de material en suspensión". *Recursos Hídricos*, Vol. 5 (Navka, traducido del ruso por P. Kurganski).

Tassi P., Vionnet C., Serra S. (2003): "Simulación numérica 1D de la evolución del lecho de un cauce aluvial con el método de Galerkin Discontinuo". I Simposio Reg. de Hidráulica de Ríos. Ezeiza, nov.2003

Van Rijn L.C.(1993): "Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas". *Agua Publications. Amsterdam. Holland.*