

# Resumen

El Método de Seguimiento de Migración de Dunas (SMD) 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 formas de fondo observadas durante las grandes crecidas del río Paraná en su tramo medio presentan características que complican su aplicabilidad. Estas características se pueden diferenciar en: presencia de formas jerárquicas superpuestas y variación en la pendiente de la cara de avance, diferenciándose en dunas con pendiente cercana al ángulo de reposo del material de fondo, las que responden a la geometría de las dunas típicas analizadas en la bibliografía clásica, o con una pendiente muy por debajo de ésta, donde no se puede asegurar exista separación de la lámina líquida.

En esta tesis se presenta una metodología que permite 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. Un segundo objetivo de la tesis es extender el análisis anteriormente descrito al caso particular de un tramo de río no uniforme, aspecto novedoso de la tesis. Para ello se realizaron mediciones en un tramo de unos 1000mts de longitud ubicado inmediatamente aguas abajo del eje del Túnel Subfluvial Hernandarias que presenta divergencia del flujo en planta.

Los resultados son presentados en forma de parámetros adimensionales que indican la relación entre la dinámica del lecho o transporte de fondo con la hidrodinámica del flujo para los distintos eventos de crecidas, teniendo en cuenta las particularidades de las dunas del Paraná y el caso de un tramo de cauce no uniforme.

# 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 Thesis, 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.

A secondary objective in this Thesis is to extend the analysis to the particular case of a non uniform river reach. In this way, measurements on a 1000*mts* long river reach near the underwater tunnel Hernandarias were made. This reach presents divergent flux streamlines and convergence in depth.

The results are shown with nondimensional parameters that represent the relationship between the bed dynamic and the flux hydrodynamics for the different flood events, taking account of the Paraná dunes particularities and the non uniform reach.

# Índice general

<b>1. Motivación de la Tesis</b>	<b>6</b>
1.1. Introducción . . . . .	6
1.2. Antecedentes Bibliográficos . . . . .	10
1.2.1. Lecho erosionable con dunas en equilibrio dinámico . . . . .	11
1.2.2. Lecho erosionable con dunas en transición (en amplitud y en longitud) . . . . .	12
1.3. Antecedentes del Tema en la FICH . . . . .	13
1.4. Objetivos . . . . .	14
1.5. Aspectos Metodológicos . . . . .	15
1.5.1. Captura de la información . . . . .	16
1.5.2. Procesamiento de la información . . . . .	16
1.6. Figuras . . . . .	18
<b>2. Marco Teórico para el Análisis de las Formas de Fondo</b>	<b>22</b>
2.1. Modelo Matemático . . . . .	22
2.1.1. Secciones Transversales Variables . . . . .	24
2.2. Método SMD para la estimación de $q_B$ . . . . .	28
2.2.1. Formas de Fondo Periódicas Simples, o Formas de $\mathcal{O}(1)$ -orden uno- . . . . .	29
2.2.2. Formas de Fondo Periódicas Compuestas ( $= \mathcal{O}(1) + \mathcal{O}(2)$ ) . . . . .	36
2.3. Geometría de dunas: Análisis estadístico. . . . .	45
2.4. Método de Evolución de Trincheras de Prueba . . . . .	45
2.4.1. Fundamento teórico e hipótesis de cálculo . . . . .	46
2.5. Cuadros y Figuras . . . . .	48
<b>3. Información de Campo</b>	<b>55</b>
3.1. Introducción . . . . .	55
3.2. Recopilación de Observaciones Históricas y obtención de Mediciones Propias. . . . .	57

3.2.1.	Migración de Dunas . . . . .	58
3.2.2.	Evolución de trincheras . . . . .	63
3.3.	Procesamiento de los Registros Ecográficos . . . . .	65
3.4.	Sobre la granulometría del cauce del río Paraná . . . . .	66
3.5.	Conformado de la Base de Datos . . . . .	67
3.6.	Cuadros y Figuras . . . . .	69
<b>4.</b>	<b>Estimación de <math>q_B</math> por SMD para eventos de crecida</b>	<b>83</b>
4.1.	Resumen teórico y su aplicación a los datos de campo . . . . .	83
4.2.	Estimación de $q_B$ mediante el SMD de Formas de Fondo Periódicas Simples. . . . .	84
4.2.1.	Porosidad del material $p$ y factor de forma $\sigma$ : . . . . .	84
4.2.2.	Estimación directa de $c_B$ y $\Lambda$ . . . . .	85
4.2.3.	Estimación de $q_B$ . . . . .	85
4.3.	Estimación de $q_B$ mediante el SMD de Formas de Fondo Compuestas ( $= O(1) + O(2)$ ). . . . .	86
4.3.1.	Orden de Jerarquía de las dunas registradas. . . . .	87
4.3.2.	Separación por componentes de Fourier. . . . .	87
4.3.3.	Análisis visual de la superposición de formas en la cara de avance de las grandes dunas. . . . .	88
4.3.4.	Estimación de $\Lambda$ por métodos estadísticos . . . . .	89
4.3.5.	Estimación de $q_B$ . . . . .	90
4.3.6.	Estimación del $q_{B_{2,1}}$ por el Método de Diferencia de Formas . . . . .	92
4.3.7.	Consideraciones sobre los resultados . . . . .	93
4.4.	Cuadros y Figuras . . . . .	93
<b>5.</b>	<b>Estimación de <math>q_B</math> por Seguimiento de Evolución de Trincheras (SET)</b>	<b>112</b>
5.1.	Estimación de $q_B$ mediante análisis de evolución de trincheras excavadas en el lecho. . . . .	112
5.1.1.	Trinchera del año 1960 . . . . .	113
5.1.2.	Trinchera del año 1992 . . . . .	114
5.1.3.	Comentarios sobre las estimaciones . . . . .	115
5.2.	Cuadros y Figuras . . . . .	116
<b>6.</b>	<b>Comparación de las estimaciones de <math>q_B</math> con las producidas por otras metodologías y/o investigadores</b>	<b>125</b>
6.1.	Datos de laboratorio . . . . .	125

6.2.	Datos de campo . . . . .	126
6.3.	Estimación de $q_B$ con datos de Laboratorio (Guy, Simons and Richardson, 1967) . .	127
6.3.1.	Sobre los valores medidos . . . . .	128
6.4.	Estimación de $q_B$ con datos de campo . . . . .	128
6.4.1.	Sobre los datos sin superposición . . . . .	128
6.4.2.	Sobre los datos con superposición . . . . .	129
6.5.	Comentarios sobre las comparaciones . . . . .	129
6.6.	Figuras . . . . .	132
<b>7.</b>	<b>Estimación de <math>q_B</math> en una zona divergente en planta y convergente en profundidad</b>	<b>140</b>
7.1.	Descripción topográfica de la zona relevada . . . . .	140
7.1.1.	División del área transversal en tubos de corriente . . . . .	141
7.2.	Estimación del $q_B$ . . . . .	142
7.2.1.	Estimación de la velocidad de desplazamiento de las dunas $c_B$ . . . . .	142
7.2.2.	Análisis del comportamiento de las variables sedimentológicas . . . . .	143
7.3.	Relación entre $q_B$ y la geometría del cauce . . . . .	143
7.4.	Cuadros y Figuras . . . . .	144
<b>8.</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones</b>	<b>160</b>
8.1.	Conclusiones finales . . . . .	160
8.2.	Recomendaciones para posibles extensiones del presente trabajo . . . . .	162
<b>9.</b>	<b>Anexo: Datos para la estimación de <math>q_B</math> por el método SMD</b>	<b>165</b>
9.1.	Mediciones de cada duna registrada en los datos analizados . . . . .	165

# Capítulo 1

## Motivación de la Tesis

### 1.1. Introducción

En los últimos años, y a pesar de una intensa labor de investigación y desarrollo, los ingenieros y científicos interesados en describir el comportamiento y la evolución de los cauces aluviales llegaron a la conclusión que el problema presenta aún dificultades considerables (ASCE Task Committee 2002). Si bien hoy en día los especialistas del tema están en condiciones de predecir la capacidad de transporte de sedimentos de un río, fundamentalmente debido al aporte de complejos y poderosos códigos computacionales capaces de resolver la hidrodinámica del flujo con gran detalle (Wu *et al.* 2000), los procesos de erosión de márgenes, de sedimentación de canales de navegación, de formación y posterior desintegración de islas, y de estabilización de obras de arte emplazadas en el cauce, siguen presentando un grado de incertidumbre significativo, por mencionar algunos de los problemas irresueltos que aquejan a la comunidad científica en particular, y a la actividad económica de poblaciones ribereñas en general.

Desde otra óptica, el problema básico de la ingeniería fluvial puede ponerse en términos muy sencillos (ASCE Task Committee 2002): dado un tipo particular de sedimento y fluido, una cierta geometría del cauce, y una descarga líquida ‘impuesta’ *¿cual será el tirante de agua esperado y la cantidad de sedimento transportado?* Aún partiendo del caso más sencillo, lecho de sedimento de granulometría uniforme en cantidad suficiente, en un canal inicialmente rectilíneo y de sección transversal prismática y constante con márgenes estables (fijas), la respuesta a esta pregunta sólo puede darse en términos casi probabilísticos, con escasa certeza sobre los valores finales esperados. Esta dificultad, o incapacidad, para encontrar una respuesta sencilla a un cuestionamiento tan elemental, tiene raíces en la multiplicidad de escalas temporales y espaciales que tipifican los distintos mecanismos que contribuyen -y que en ocasiones compiten entre sí- a moldear la geomorfología de

un cauce aluvial. Dietrich y Whiting (1989), y más recientemente Parker (1998), señalaban que si un investigador analiza el problema desde la escala de los granos de sedimento (arena), es muy posible que los conciba conformando un lecho localmente plano. Para un contorno de esas características, la llamada resistencia de piel -o de grano- es conocida. Sin embargo, si la ventana de observación del problema se expande, es probable que los granos de arena conformen la cara posterior de una duna -cuya superficie es localmente plana-, y cuya cara delantera -de mayor pendiente y cercana al ángulo de reposo del material- induce una pérdida de energía al flujo mucho mayor que la resistencia de piel (McLean y Dungan Smith 1986). Por tanto, en presencia de un tren de dunas, el analista o ingeniero deberá usar un coeficiente de resistencia mucho mayor que el valor correspondiente a un lecho plano. Sin embargo, muchas veces ocurre que una duna está en el tope de otra duna de mayor tamaño, donde cada una de ellas contribuye a restar energía del flujo, y por ende, a adicionar más y más resistencia. Si ahora el problema se analiza desde una ventana aún mucho mayor, quizás sea posible ver que el tren de dunas compuestas se asienta sobre una barra o banco de arena, quién a su vez quita más energía al flujo. Si finalmente el observador analiza el problema a una escala muy extensa, apreciará que el cauce presenta divagaciones laterales -o meandros, los cuales restan energía de la corriente pues la misma necesita desviarse una y otra vez. Por tanto, a medida que el observador va recorriendo las escalas típicas del problema, de las menores a las mayores, encuentra que la resistencia al movimiento del agua cambia (Figura 1.1). En breve, no hay una única resistencia hidráulica que tipifique el problema, depende de la escala de análisis.

Lo mismo ocurre con el transporte de sedimento. La relación de transporte que un observador obtiene analizando las variables del flujo y del sedimento en equilibrio local<sup>1</sup> para un lecho plano no es la misma que la que se obtiene si se incorpora la variación de la morfología del cauce a gran escala. En definitiva, aún no fue posible diseñar una teoría universal capaz de incorporar todo el rango de escalas que tipifican el problema y que sea aplicable a los casos concretos que deben resolver los ingenieros fluviales, mas allá del interés académico *per-se* que la mecánica de dunas despierta en la comunidad científica (ASCE Task Committe 2002). No obstante, hay una escala del problema en la cual es posible analizar resistencia y transporte en condiciones de equilibrio 'dinámico', y este es el rango de valores de los parámetros hidro-sedimentológicos que caracteriza la existencia de dunas y de barras (Dietrich y Whiting 1989). En este rango, la dinámica del escurrimiento condiciona la cantidad de sedimento transportado, el que a su vez modifica las condiciones de resistencia ante la aparición de dunas, o formas de fondo. Por esta razón, podría decirse que las

---

<sup>1</sup>Que es la forma en que se obtienen las relaciones de transporte en canales de ensayo de laboratorio

dunas presentan características duales, por un lado influyen significativamente en la resistencia hidráulica al escurrimiento, y por otro, reflejan la cantidad de sedimento transportado como carga de fondo<sup>2</sup>. Por tanto, es imposible analizar una faceta del problema con independencia del otro. Como se mencionó previamente, dunas pequeñas desplazándose sobre dunas de mayor tamaño, y conformando a su vez un tren de dunas compuestas en movimiento, adicionan más y más resistencia al escurrimiento modificando, a su vez, la relación de transporte que se obtendría en presencia de un único nivel jerárquico de dunas en movimiento. Ahora bien, desde el punto de vista del primer principio de la termodinámica, el incremento de resistencia, y por ende, la disminución de energía mecánica del flujo no es otra que la energía requerida para mover el sedimento, es decir, para transportarlo como carga de fondo (Bagnold, 1973), entre otros mecanismos que compiten por el balance de energía (turbulencia, erosión y transporte del sedimento en suspensión).

En definitiva, esta Tesis de Maestría en Ingeniería de los Recursos Hídricos se concentra en analizar -desde un punto de vista fenomenológico- la cinemática de dunas compuestas (ondas de arena de menor jerarquía desplazándose sobre formas mayores) tal como se observa comúnmente en el lecho del río Paraná, en la vecindad de la zona de emplazamiento del Túnel Subfluvial Hernandarias (Figura 1.2). No obstante el interés científico que la cinemática, y en mayor medida, la mecánica de dunas despierta *per se*, existen aspectos del tema que tienen gran relevancia ingenieril como ser:

- La disminución del calado efectivo requerido para la navegación por un recrecimiento considerable -superior al esperado- de las crestas de las dunas en ciertos puntos críticos de la ruta de navegación de un cauce aluvial. Tal es el caso de los pasos Canal del Muelle, frente al Puerto de Rosario, y Paso Borghi, inmediatamente aguas arriba del emplazamiento del puente Rosario-Victoria (Huespe 2003), donde dunas de gran altura obligan a un sobredragado de la zona a expensas de un incremento en los costos de mantenimiento de la ruta de navegación (Figura 1.3)
- La pérdida de estabilidad de obras de arte enterradas en un lecho erosionable -como ser el propio Túnel Subfluvial Hernandarias- gasoductos, oleoductos, etc., ante el pasaje de dunas de gran amplitud que, eventualmente, dejan al descubierto la estructura. En el caso particular del Túnel Subfluvial, la obra tiende a flotar por el principio de Arquímedes, con lo cual requiere de una tapada de seguridad de unos tres metros para garantizar su estabilidad. Esto puede

---

<sup>2</sup>La naturaleza no discrimina entre carga suspendida y carga de fondo, simplemente es más sencillo desarrollar teorías mecanicistas desagregadas para cada una de las modalidades de transporte.



demostrarse por medio del clásico balance de fuerzas que determina la fuerza de flotación de un cuerpo sumergido:

Si  $F_F$  es la fuerza de flotación,  $P_{TA}$  es el peso de la tapada de sedimento colocada sobre el Túnel,  $P_T$  es el peso de la estructura del Túnel,  $P_A$  es el peso del agua desplazada por la estructura,  $H$  es el espesor de la tapada de sedimento y  $D$  el diámetro del Túnel, el balance de fuerzas para el estado de equilibrio crítico va a resultar (Figura 1.4):

$$P_{TA} + P_T - P_A - F_F = 0 \quad (1.1)$$

$$F_F = P_{TA} + P_T - P_A \quad (1.2)$$

Si  $F_F < 0$  la estructura se vuelve inestable; si  $F_F > 0$  la estructura es estable, y si  $F_F = 0$  la estructura se encuentra en estado de estabilidad crítica o de flotación neutra. Para asegurar la estabilidad de la estructura es necesario que  $P_{TA} + P_T > P_A$ , siendo  $P_T$  un dato del proyecto y pudiéndose calcular  $P_A$ , se presenta una expresión cuya única incógnita resulta ser el espesor de la tapada de sedimento  $H$ :

$$HDL(1-p)\rho_{TA}g + P_T > \frac{\pi D^2}{4}L\rho_Ag + HDL(1-p)\gamma_A \quad (1.3)$$

$$HDL(1-p)\gamma_{TA} + P_T > \left( \frac{\pi D^2}{4}L + HDL(1-p) \right) \gamma_A \quad (1.4)$$

siendo  $p$  la porosidad del sedimento,  $\rho_{TA}$  la densidad del sedimento que compone la tapada de la estructura,  $\gamma_{TA}$  el peso específico del mismo sedimento,  $g$  la aceleración de la gravedad,  $\rho_A$  la densidad del agua y  $\gamma_A$  el peso específico del agua.

El único parámetro que puede variar en la expresión obtenida es el espesor de la tapada  $H$ , pudiendo obtenerse un valor mínimo para el estado de flotación neutra, el que debe superarse a los fines de asegurar la estabilidad.

Como dato de diseño de la obra se sabe que cada tubo que compone el Túnel tiene 64m de longitud, 10,5m de diámetro y pesa 4000 toneladas, con lo que se le puede dar valores a la expresión:  $P_T = 4 \times 10^6 kg$ ,  $L = 64m$ ,  $D = 10,5m$ . Por otro lado, las arenas del Paraná presentan una porosidad media  $p = 0,4$ , con un peso específico  $\gamma_{TA} = 2650 kg/m^3$ ,  $g = 9,81 m/s^2$  y  $\gamma_A = 1000 kg/m^3$ .

El peso específico aparente de la estructura del Túnel puede calcularse:

$$\gamma_T = \rho_T g \quad (1.5)$$

$$= \frac{4P_T}{\pi D^2 L} \quad (1.6)$$

$$= 721,8 \text{ kg/m}^3 \quad (1.7)$$

la expresión anterior queda:

$$HDL(1-p)(\gamma_{TA} - \gamma_A) = \frac{\pi D^2}{4} L(\gamma_A - \gamma_T) \quad (1.8)$$

$$H = \frac{1}{(1-p)} \frac{\pi D^2}{4} \left( \frac{\gamma_A - \gamma_T}{\gamma_{TA} - \gamma_A} \right) \quad (1.9)$$

$$H = 2,31m \quad (1.10)$$

Valores superiores a  $H = 2,31m$  pueden asegurar la estabilidad de la estructura.

Durante la crecida extraordinaria de 1982/83, parte de la obra ubicada en la zona del thalweg del río Paraná quedó al descubierto ante el paso de una gran duna ( $H = 0$ ), lo que comprometió en forma preocupante la estabilidad de la obra de arte e indicó la necesidad de lograr un estudio acabado de la cinemática de las dunas desarrolladas en la sección.

Además, ensayos de laboratorio llevados a cabo en la FICH (Montagnini *et al* 1998) indicaron que la presencia de una duna ante una obra enterrada ya descubierta por cualquier proceso de erosión, aumenta significativamente la intensidad del mismo

## 1.2. Antecedentes Bibliográficos

Las Tesis de Maestría de Marti (1998) y Matar (2002), ambas realizadas en la FICH, contienen una detallada y actualizada revisión del estado del conocimiento de la mecánica de dunas. En esta ocasión, en lugar de reiterar dichas revisiones, se optó por describir el estado del arte desde el punto de vista del forum de discusión sobre dunas recientemente formado por la Asociación Norteamericana de Ingenieros Civiles (ASCE Task Committe 2002), el cual ha conferido un renovado impulso al tema. Hay dos aspectos claramente diferenciados en los que el Comité de la ASCE divide el estado del conocimiento actual de la mecánica de dunas, los interrogantes planteados, y las posibles líneas de acción futuras: a) lecho erosionable con dunas en equilibrio dinámico, b) lecho erosionable con dunas en transición (en amplitud y longitud).

### 1.2.1. Lecho erosionable con dunas en equilibrio dinámico

Para el primer caso, la simplificación más elemental -pero no menos razonable- del problema es considerar un lecho constituido por un tren periódico de dunas de igual tamaño dispuestas longitudinalmente, esto es, en la dirección de la corriente. El Comité agrupa los avances logrados en cuatro aspectos o categorías de trabajos:

- *Trabajos experimentales en canales de ensayo con lechos cubiertos con dunas fijas:* una cantidad considerable de estudios de este tipo se han hecho desde el trabajo pionero de Raudkivi (1966). Notablemente, el Laboratorio de Hidráulica de la FICH montó un canal de ensayo de  $67 \times 1,5 \times 1,0m$  (longitud/anchura/altura) con un fondo cubierto por un tren periódico de dunas fijas construidas en chapa galvanizada (Pujol *et al.* 1994). Toniolo *et al.* (1996), utilizando una combinación de tubo Pitot-Prandtl con un transductor diferencial de presiones, y más recientemente Matar (2002), utilizando un Velocímetro Acústico Doppler (ADV), constituyen dos ejemplos de los muchos trabajos que se hicieron en la FICH en esa línea de investigación. No obstante, sin mencionar la cantidad de trabajos citados, el Comité de la ASCE (ASCE Task Committe 2002), concluye que la turbulencia de pared desarrollada sobre esos contornos difiere marcadamente de la que se observa en los trabajos típicos de capa límite (cara de aguas arriba de la duna), o de estela (cara de aguas abajo de la duna), que constituyen la base teórica adoptada en esta aproximación al problema.
- *Trabajos numéricos sobre lecho con dunas fijas:* los trabajos citados por el Comité (Mendoza y Shen 1990, Yoon and Patel, 1996), basados en modelos de turbulencia de elevada complejidad, han arrojaron resultados poco convincentes.
- *Estudios experimentales sobre estructuras coherentes:* el estudio experimental de estructuras coherentes, como los conocidos procesos de estallidos y barridos turbulentos (Kline *et al.* 1967) sobre un lecho con dunas es extremadamente complejo. A pesar de ciertos esfuerzos realizados para vincular la tasa de sedimento puesto en suspensión por tales estructuras (Bennet *et al.* 1998; Nikora y Goring 2002), no hay mayores indicios que indiquen que un profundo entendimiento del fenómeno de estallidos y subsecuentes barridos turbulentos lleve a contestar la pregunta básica de la ingeniería fluvial en términos relativamente sencillos y útiles para el ingeniero fluvial.
- *Trabajos sobre la interacción fluido-partícula:* si bien es un área donde se han registrado avances significativos (Niño y García 1998), los resultados no alcanzan a explicar la formación

de dunas bajo un flujo que se caracteriza por presentar zonas claramente diferenciadas de separación y de reenganche.

- *Trabajos de campo*: la complejidad intrínseca del fenómeno hace muy difícil la medición simultánea de todas las variables intervinientes: campo de velocidad, intensidad de la turbulencia, carga de fondo, concentración de sedimentos en suspensión, etc., en un río cuyo lecho está cubierto con dunas. Además, a pesar de ciertos progresos recientes (Kostachuk y Villard 1996), no está del todo claro que clase de procesos adicionales pone de relieve la información de campo que no hayan sido explicitados en resultados anteriores. ¿Existen relaciones de escala entre los experimentos realizados en canales de ensayo y las mediciones en prototipo que alteran las relaciones teóricas propuestas? Por mencionar un ejemplo, Marti y Vionnet (1998) establecen que el costo de mantener la similitud cinemática en modelos físicos Froudi-anos equivale a distorsionar la escala de transporte de sedimentos en unos dos órdenes de magnitud.

El Comité de la ASCE, luego de enumerar los avances y dificultades encontradas en cada una de las áreas mencionadas, se pregunta *¿hasta que punto tales detalles son necesarios para contestar el cuestionamiento básico de la ingeniería fluvial con un grado razonable de confianza?* Aún en el caso de que se realicen ingentes progresos en la descripción de flujos turbulentos, la resolución de todas las escalas del flujo que pueden influenciar el perfil de equilibrio de una duna puede demandar muchos años antes que esté al alcance del ingeniero fluvial en términos accesibles. Por tanto, es razonable esperar contribuciones teóricas al tema que partan de promediaciones en el espacio a fin de hacer la condición de borde fluido-lecho más tratable desde el punto de vista ingenieril.

### **1.2.2. Lecho erosionable con dunas en transición (en amplitud y en longitud)**

Respecto del segundo tópico de interés para el estudio del flujo y transporte de sedimentos asociado a la presencia de dunas en un cauce aluvial, esto es, la evolución temporal y espacial de dunas en un lecho erosionable, el Comité de la ASCE sintetizó los logros recientes de la siguiente manera

- *Trabajos teóricos*: es razonable asumir que no sólo desde un punto de vista teórico sino también experimental, un lecho que presenta dunas en continua evolución adiciona nuevas dificultades al ya de por sí difícil problema de determinar el perfil de equilibrio cuasi-estático de las dunas para ciertas condiciones hidro-sedimentológicas dadas. Trabajos recientes (Coleman y Melville 1996; Coleman y Fenton 2000) se concentraron en el proceso de iniciación de

las perturbaciones del lecho, partiendo de análisis de estabilidad hidrodinámica similares al utilizado por Kennedy (1969). Sin embargo, la complejidad de los desarrollos teóricos hace que la aproximación ingenieril al problema siga siendo predominantemente empírica (Van Rijn 1984a, b, c).

- *Trabajos experimentales*: los mecanismos que intervienen en la formación inicial de las formas de fondo ha sido dilucidado (Coleman y Melville 1994), al igual que la tasa de crecimiento de las dunas para el caso de flujo estacionario (Nikora y Hicks 1997). Por otra parte, Coleman y Eling (2000) demostraron que la turbulencia no es una característica esencial en la formación inicial de wavelets de arena en un flujo laminar.

Por último, el Comité de la ASCE remarca que la determinación de la configuración final de las dunas ante cambios en el flujo constituye un problema aún abierto. Lo mismo puede decirse de la transición de un tipo de lecho a otro, por ejemplo, de un lecho cubierto con dunas a un lecho plano. El Comité concluye que es mucho lo que resta por hacerse en el campo de la mecánica de dunas, entre otros motivos, por la dispersión de esfuerzos que se han venido realizando hasta la fecha en áreas disciplinares que muy pocas veces se agrupan para intercambiar experiencias: la Geomorfología y la Mecánica Teórica de Ríos. Es de hacer notar que este aspecto había sido explícitamente señalado por Parker (FICH 1998) en el Taller Regional sobre Hidráulica Fluvial organizado en la ciudad de Santa Fe (Argentina) en agosto de 1998.

Más tarde, científicos interesados en la temática fueron reunidos en la Marine Sandwave and River Dynamics, donde se expusieron los interesantes progresos realizados luego de las exposiciones del Forum de la ASCE (Best 2004). Allí fue citada la necesidad de abordar distintas temáticas dentro de las cuales, la influencia del ángulo del frente de avance de las dunas y la superposición y amalgamamiento de formas, tratadas en esta Tesis, se citan como las áreas prometedoras en la investigación de la dinámica y morfología de dunas de ríos (Best 2004).

### **1.3. Antecedentes del Tema en la FICH**

Los trabajos de asesoramiento y de desarrollo científico-tecnológico que se han realizado en la FICH, aprovechando la fuente de información provista por el Túnel Subfluvial Hernandarias, fructificaron en numerosas comunicaciones técnicas en conferencias de la especialidad, y en trabajos científicos donde se plantearon, en su mayoría, fórmulas de pronóstico de la evolución del cauce (Schreider y Amsler 1992; Amsler *et al.* 1998; Fedele 2000). En el año 1988 se construyó en la FICH un canal vidriado de  $67. \times 1,5 \times 1,0m$ , con fondo de pendiente fija constituido por dunas lisas, y

luego con con dunas menores super-impuestas a las dunas lisas de mayor tamaño. Este corrugado fue realizado en chapa galvanizada y se hicieron respetando la escala de similitud hidrodinámica con las formas de fondo características del tramo en estudio. En este canal se han realizado numerosos ensayos, tendientes a comprender las estructuras del flujo en presencia de las formas de fondo (Trento *et al.* 1990, 1992; Toniolo *et al.* 1996; Tevez 1999; Matar 2002). Numerosas mediciones se realizaron a partir de su construcción, aunque las más valiosas se obtuvieron a partir de la adquisición de un Velocímetro Doppler Acústico de laboratorio (ADV). Las mediciones realizadas del flujo con este equipo fueron sustento de la Tesis de Maestría de Matar (2002), en la que se pudieron caracterizar las escalas del flujo turbulento sobre estas formas de fondo.

## 1.4. Objetivos

A tono con el estado actual del conocimiento del tema, con la experiencia acumulada por la FICH en los últimos veinte años de labor ininterrumpida en el ámbito de la ingeniería fluvial (Trento *et al.* 1990, Schreider y Amsler 1992, Pujol *et al.* 1994, Matar 2002), con los avances logrados por el grupo de investigación que sustenta el presente trabajo (Marti 1998, Marti y Vionnet 1998), y con el condicionante que significa tener un río de las características del Paraná como entorno, donde la presencia de grandes dunas es un fenómeno cotidiano -exacerbado durante la ocurrencia de crecidas excepcionales- la presente Tesis propone alcanzar objetivos sencillos que sienten las bases para futuros trabajos de doctorado sobre la mecánica de dunas, y por ende, más profundos en su alcance y contenidos. Por tanto, adoptando el tramo del río Paraná que comprende la traza del Túnel Subfluvial (Figura 1.2) como zona de estudio o de referencia, esta Tesis propone alcanzar los siguientes objetivos específicos:

- Generar una base de datos de campo, tanto a partir del procesamiento de información histórica como de aquellos datos adquiridos con el equipamiento de campaña disponible en la FICH, que permita calcular los parámetros hidro-sedimentológicos que caracterizan la cinemática de dunas.
- Estimar tasas de transporte de sedimentos como carga de fondo con los datos compilados en la primera fase del trabajo, utilizando alternativamente las siguientes metodologías:
  1. Por el análisis de la migración de trenes de grandes dunas a diferentes tiempos (Lima *et al.* 1990, Van Rijn 1993, Fedele 2000)

2. Por la separación de Fourier de los distintos componentes que componen los trenes de dunas compuestas observados en la zona (jerarquía de pequeñas y grandes dunas clasificadas según su longitud), con el fin de corregir los valores obtenidos en el caso anterior, es decir, cuando se considera únicamente la presencia de grandes dunas (Sidorchuck 1990).
  3. Por la integración de las leyes de conservación del problema en las trincheras de prueba excavadas en la zona.
- Analizar la influencia que tiene en los parámetros de transporte la divergencia en planta y la convergencia -pérdida de profundidad- de la zona elegida para el estudio. Este es un aspecto novedoso del trabajo que no ha recibido mayor consideración en la literatura especializada.

La generación del banco de datos, ya sea por captura directa de información de campo con la lancha hidrográfica de la FICH, o por digitalización de registros (fajas de ecógrafa) de eventos pasados -grandes crecidas- cumple con el doble propósito de dar sustento al presente trabajo y, a su vez, servir como información de contraste y validación de herramientas numéricas tanto preexistentes como en desarrollo, y orientadas a la simulación de evolución de cauces (Holly y Rahuel 1990, Cheong y Xue 1997, Haserback 1998, Wu *et al.* 2000, Tassi 2006). Por último, la estimación por métodos directos e indirectos del transporte de fondo permitirá verificar la eficacia de algunas fórmulas de transporte que se utilizan comúnmente en la práctica (Strasser *et al.* 1999). En este aspecto, es de esperar que la culminación de la presente Tesis contribuya a enriquecer trabajos previos realizados en el seno del grupo de investigación (Marti 1998; Marti y Vionnet 1998; Strasser 1999; Tassi *et al.* 2000; Tassi 2001), y que a su vez establezca los lineamientos a seguir en un futuro trabajo doctoral.

## 1.5. Aspectos Metodológicos

Se recopiló parte de los datos disponibles en el Departamento de Hidrometría del Ente Administrador del Túnel Subfluvial Hernandarias, con el propósito de recabar los registros de sonda ecógrafa que mejor se adapten a los objetivos perseguidos en esta Tesis. Por último, para el análisis de Fourier de los registros de sonda ecógrafa se siguieron los lineamientos clásicos del procesamiento de series de tiempo, donde en lugar de muestrear la información en el tiempo se la muestrea en el espacio (Nordin 1966 ). Primeramente, y en los aspectos específicamente metodológicos, se diferencié la *captura* del *procesamiento* de la información.

### **1.5.1. Captura de la información**

Este aspecto se refiere pura y exclusivamente a la recolección de datos, tanto históricos como producto de observaciones realizadas con equipamiento propio.

#### **Migración de dunas (estimación indirecta del transporte de fondo)**

- Recopilación de observaciones históricas: se georeferenciaron y digitalizaron los registros de sonda ecográfica obtenidos en la zona elegida durante las crecidas excepcionales del río Paraná en los años 1982/83, 1992, y 1998.
- Recolección de datos propios: se realizaron tres trabajos de campo con la lancha hidrográfica de la FICH -equipada con sonda ecográfica y posicionador satelital con corrección diferencial (GPS)- en la zona elegida, para relevar a lo largo de un cierto número de líneas de corriente las características que toma el campo de dunas en la zona de divergencia/convergencia -aguas abajo de la traza del Túnel Subfluvial. El propósito era evaluar la incidencia que tiene la divergencia en planta y la subsecuente pérdida de profundidad del flujo sobre el desplazamiento de las dunas en la zona de estudio.

#### **Evolución de trincheras de prueba (estimación directa del transporte de fondo)**

- Recopilación de información histórica de dos trincheras de prueba excavadas en la zona del Túnel en los años 1960 (anterior a su construcción), y en 1992 (anterior a la colocación del primer tramo de manta de protección de la obra de arte). Aquí también se georeferenció y digitalizó la información registrada.

### **1.5.2. Procesamiento de la información**

Este aspecto incluye el enfoque teórico adoptado para encuadrar la información de campo recopilada durante la ejecución de la Tesis. En este sentido, merece destacarse que si bien hoy en día es posible recurrir a complejas simulaciones numéricas tri-dimensionales (3D) de flujos a partir de la resolución aproximada de las ecuaciones de Navier-Stokes (Wu *et al.* 2000), los requerimientos computacionales en tiempo y memoria hace impensable su aplicación a un río de dimensiones tan vastas como el Paraná. Para este sistema aluvial, conformado por un cauce principal y una extensa planicie de inundación surcada por numerosos cauces menores y otros tantos cuerpos de agua interiores, la aproximación 2D de ondas largas o ecuaciones de aguas poco profundas (Vreudenghill 1998),



resultantes de integrar en la vertical las ecuaciones de Navier-Stokes previamente promediadas sobre la turbulencia -ecuaciones de Reynolds- constituye una herramienta sumamente apropiada para describir un rango significativo de los procesos comúnmente observados en el sistema (Tassi 2001, Tassi y Vionnet 2002, Carrasco y Vionnet 2004). Por tanto, el modelo matemático adoptado para procesar la información de campo, recolectada en la primera parte del trabajo, parte de considerar las leyes de conservación de las fases líquidas y sólidas en el contexto de la aproximación de distribución hidrostática de presiones, o aproximación de ondas largas (Stoker 1957).

La versión uni-dimensional (1D) de este modelo de ondas largas permite deducir una sencilla relación entre  $q_B$ , transporte de sedimentos de fondo ( $L^2T^{-1}$ ), y celeridad media de desplazamiento de las formas de fondo,  $c_B$ , la cual fue utilizada en este trabajo a partir de los datos de campo recolectados. No obstante, en presencia de multiplicidad de formas de fondo, esta relación debe modificarse en forma apropiada para diferenciar la contribución al transporte medio de formas de mayor y menor orden. En este caso, se utilizó un filtro digital para separar las dos frecuencias dominantes -y distinguibles- del proceso (dunas grandes y pequeñas) aplicando la fórmula desarrollada por Sidorchuk (1990), que incorpora la contribución de pequeñas dunas (megarizos) superimpuestas a las dunas mayores.

Por último, debe tenerse en cuenta que el cálculo del transporte de sedimento de fondo por seguimiento de dunas es una estimación indirecta con un sólido sustento teórico. En consecuencia, y con el propósito de obtener una estimación independiente de la tasa de transporte  $q_B$ , se procesó información histórica de la evolución de trincheras de prueba dragadas en la zona. Para este caso la integración de las ecuaciones de gobierno adoptadas permitió, luego de introducir 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.

En síntesis, lo hasta aquí expuesto se encuentra organizado dentro del cuerpo de la Tesis de la siguiente forma: el sustento teórico de los modelos matemáticos propuestos para la estimación del transporte de material del lecho y la descripción de la metodología implementada se encuentran en el Capítulo 2, la descripción de la información recopilada y relevada así como su procesamiento primario se encuentran en el Capítulo 3. El Capítulo 4 contiene las estimaciones del caudal sólido de fondo realizadas, con los datos de las crecidas extraordinarias en la zona de estudio, por el método de seguimiento de migración de dunas clásico (SMD) y luego por el método de Sidorchuk (1990) en el que se tienen en cuenta las distintas jerarquías de formas del lecho. En el mismo capítulo se presenta el análisis estadístico hecho a las series. El Capítulo 5 presenta la estimación del caudal sólido de fondo en forma directa por seguimiento de la evolución de trincheras de ensayo

(SET). En el Capítulo 6 se toman resultados de análisis realizados por otros autores y de ensayos de laboratorio para contrastar con las estimaciones realizadas en los Capítulos 4 y 5. Por último en el Capítulo 7 se realizan estimaciones del caudal sólido de fondo por SMD teniendo en cuenta la variación geométrica de la sección transversal del cauce. Las conclusiones sobre todo lo expuesto se encuentran en el Capítulo 8.

## **1.6. Figuras**

## Distintas escalas de rugosidad en ríos de llanura:


- de grano 
- por formas de fondo (*rizos*) 
- por formas de fondo (*dunas*) 
- por barras/bancos de arena 
- por meandros 

Figura 1.1: Distintas escalas que caracterizan la rugosidad en los ríos de llanura.

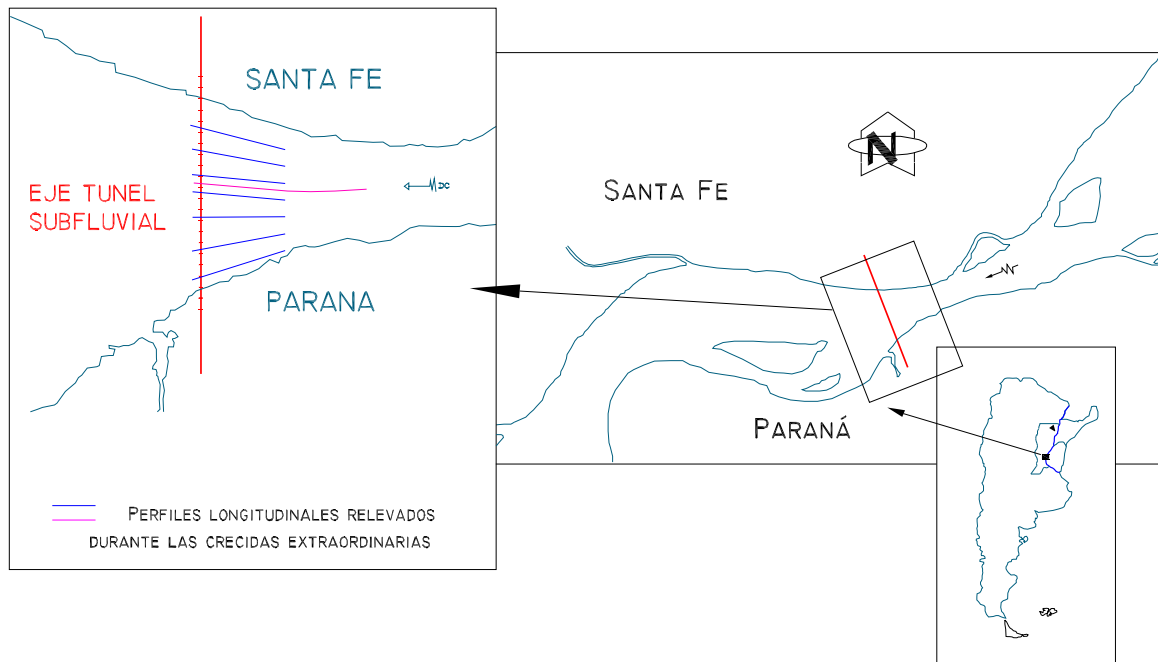


Figura 1.2: Río Paraná. Ubicación del área de estudio, Túnel Subfluvial y algunas líneas de corriente relevadas durante crecidas extraordinarias

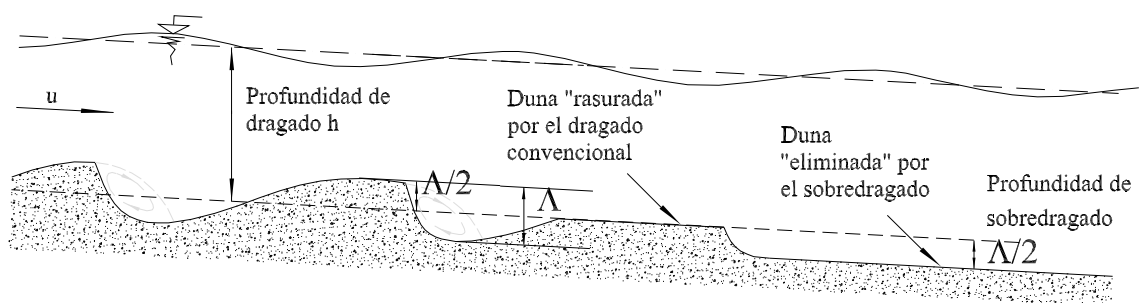


Figura 1.3: Nivel de dragado y nivel de sobredragado en presencia de dunas.

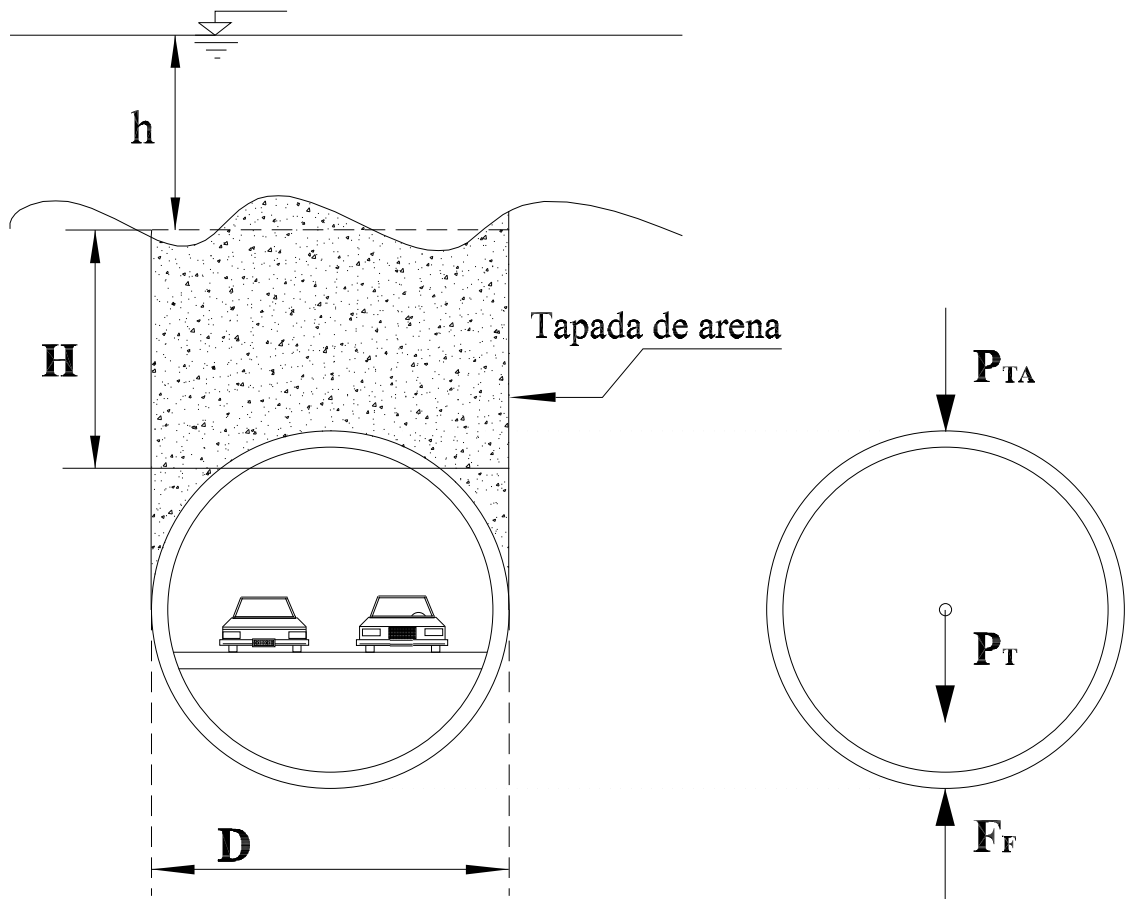


Figura 1.4: Fuerza de flotación sobre el túnel, efecto del espesor de la tapada de arena sobre su estabilidad.

## Capítulo 2

# Marco Teórico para el Análisis de las Formas de Fondo

### 2.1. Modelo Matemático

El modelo matemático adoptado en este estudio para el análisis de la información experimental disponible (tanto de campo como de laboratorio) está dado por la conocida aproximación de ondas largas (Stoker 1958), aproximación que sustenta a las denominadas Ecuaciones de Aguas Poco Profundas (EAPP), también conocidas como las ecuaciones de Saint Venant en la literatura francesa (Pujol y Menéndez 1987). Despreciando los efectos del viento sobre la superficie libre, así como cualquier variación lateral al sentido del escurrimiento, es posible utilizar las EAPP para describir los procesos de erosión y transporte de sedimentos sobre un lecho compuesto por material granular no cohesivo, en cuyo caso el problema se expresa (Van Rijn 1986, Marti 1998)

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\tau_B}{\rho h} + \nu_t \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial(h\theta)}{\partial t} + \frac{\partial(uh\theta)}{\partial x} = E - D \quad (2.3)$$

$$n \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial q_B}{\partial x} = D - E \quad (2.4)$$

Estas ecuaciones representan, en ausencia de aportes o pérdidas laterales, la conservación de la cantidad de masa en la columna líquida, por unidad de longitud y de ancho del canal, de la cantidad de movimiento por unidad de masa, de la cantidad de sedimento transportado en suspensión por unidad de área, y de la cantidad de sedimento almacenado por unidad de área en la denominada *capa activa del lecho*, respectivamente. Aquí, y con referencia a la Figura 2.1,  $x$  representa la

coordenada longitudinal en la dirección del movimiento,  $t$  el tiempo,  $u$  la velocidad media del flujo,  $h$  el tirante de agua,  $\eta$  la cota del lecho,  $g$  la aceleración de la gravedad,  $\rho$  la densidad del agua,  $\nu_t$  la viscosidad de remolinos debida a la turbulencia,  $\theta$  la concentración media de sedimentos en la vertical,  $q_B$  el transporte o carga sólida de fondo,  $E$  y  $D$  las funciones que cuantifican la tasa de erosión y sedimentación del material sólido en el lecho, respectivamente,  $n$  la fracción de volumen sólido en la capa activa del lecho (la que está sujeta al proceso continuo de erosión, transporte, y acumulación de material),  $= 1 - p$ , donde  $p$  es la porosidad del material granular suelto, y  $\tau_B$  la tensión de corte aplicada en el lecho. Ahora bien, es necesario especificar relaciones adicionales que cuantifiquen  $\tau_B$ ,  $q_B$ ,  $E$  y  $D$  para cerrar completamente el problema promediado (2.1)-(2.4). En general se asume que  $q_B$ ,  $E$  y  $D$  son funciones de la tensión de corte que actúa sobre el lecho, la cual se modela a su vez con la relación de Manning o con una ley cuadrática de la clase utilizada para cuantificar la resistencia hidráulica de flujos turbulentos escurriendo sobre superficies planas;

$$\tau_B = C_F \rho u^2, \quad q_B = q_B(\tau_B), \quad D = D(\tau_B), \quad E = E(\tau_B), \quad (2.5)$$

donde  $C_F$  representa el coeficiente de fricción que puede ser evaluado con la relación de Keulegan

$$\frac{1}{\sqrt{C_F}} = 2,5 \ln \left( \frac{11h}{k_s} \right), \quad (2.6)$$

siendo  $k_s$  una medida de la rugosidad del lecho considerado plano ( $\cong 2,5 d_{50}$ ), donde  $d_{50}$  es el diámetro medio del sedimento. En caso de un lecho con dunas la fórmula anterior puede modificarse acorde a Van Rijn (1984).

En la literatura especializada es posible encontrar diversas fórmulas para calcular  $q_B$ ,  $D$  y  $E$ , cuya aplicabilidad depende por lo general de cada problema en particular (Vanoni 1975, García y Parker 1993). Con independencia del problema, y a título ilustrativo solamente, es útil considerar las siguientes formas (Partheniades 1965)

$$q_B = \begin{cases} 0 & , \quad si \quad \tau_B \leq \tau_c \\ b \left( \frac{\tau_B}{\tau_c} - 1 \right)^N & , \quad si \quad \tau_B > \tau_c \end{cases} \quad (2.7)$$

$$D = \begin{cases} \omega_c \theta \left( 1 - \frac{\tau_B}{\tau_{Dc}} \right) & , \quad si \quad \tau_B < \tau_{Dc} \\ 0 & , \quad si \quad \tau_B \geq \tau_{Dc} \end{cases} \quad (2.8)$$

$$E = \begin{cases} 0 & , \quad si \quad \tau_B \leq \tau_{Ec} \\ M \left( \frac{\tau_B}{\tau_{Ec}} - 1 \right) & , \quad si \quad \tau_B > \tau_{Ec} \end{cases}, \quad (2.9)$$

donde  $b$  [ $L^2 T^{-1}$ ] y  $N$  son ciertas constantes que definen la capacidad de transporte como carga de fondo,  $M$  [ $LT^{-1}$ ] el coeficiente de erosión,  $\omega_c$  [ $LT^{-1}$ ] la velocidad de caída de las partículas en

suspensión, función de la concentración  $\theta$ , salinidad, y temperatura del agua,  $\tau_c$  la tensión crítica de iniciación al movimiento de las partículas del lecho,  $\tau_{Ec}$  la tensión crítica de erosión o resuspensión de partículas (es decir, aquella tensión que remueve partículas del lecho de la capa activa y las pone en suspensión), y  $\tau_{Dc}$  la tensión crítica de decantación (es decir, por debajo de la cual las partículas decantan por gravedad). Además, se supone que las tensiones críticas de resuspensión  $\tau_{Ec}$  y de decantación  $\tau_{Dc}$  difieren entre sí ( $\tau_{Ec} > \tau_{Dc}$ ), aunque esto no necesariamente es cierto puesto que puede haber un rango de tensiones donde ambos procesos coexisten (García y Parker 1993). Expresando ambas tensiones en función del campo de velocidades medias, se tendría

$$D = \begin{cases} \omega_c \theta \left( 1 - \left( \frac{u}{u_{Dc}} \right)^2 \right) , & \text{si } \frac{u}{u_{Dc}} < 1 \\ 0 & , \text{ si } \frac{u}{u_{Dc}} \geq 1 \end{cases} \quad (2.10)$$

$$E = \begin{cases} 0 & , \text{ si } \frac{u}{u_{Ec}} \leq 1 \\ M \left( \left( \frac{u}{u_{Ec}} \right)^2 - 1 \right) & , \text{ si } \frac{u}{u_{Ec}} > 1 \end{cases} , \quad (2.11)$$

Por tanto, una simple inspección de las ecuaciones (2.1)-(2.4), y de las fórmulas de cierre (2.5)-(2.11), pone en evidencia el acoplamiento que existe entre la fase líquida y la fase sólida del problema. Por razones que se exponen a continuación, en esta Tesis solamente se hace uso de la ecuación (2.4), aunque para mayor claridad en el análisis se discute primeramente el problema completo.

### 2.1.1. Secciones Transversales Variables

La información histórica recopilada, que se presenta en el Capítulo 3, permite estudiar el proceso del transporte de material del lecho como carga de fondo ante crecidas extremas (datos históricos), y ante condiciones de aguas bajas (datos propios). Ahora bien, para encuadrar los datos de campo con el modelo matemático (2.1)-(2.4) es necesario realizar algún tipo de consideración sobre la geometría no uniforme de las secciones transversales del área de estudio, puesto que el modelo es válido para flujos infinitamente anchos sin variación lateral, o bien restringidos lateralmente por paredes verticales separadas un ancho constante.

En rigor, podría decirse que un escenario aún no estudiado en la literatura especializada es justamente aquel en el cual las dunas se propagan a lo largo de un cauce cuya geometría presenta secciones transversales variables, y por lo tanto, una continua redistribución espacial de las variables del flujo. El escenario real elegido para este estudio no constituye un tramo recto o uniforme de cauce, sino que presenta un ensanchamiento progresivo aguas abajo del eje del Túnel, lo que se traduce en una divergencia del flujo en planta acompañado por una disminución de profundidad. En este caso, las ecuaciones de gobierno deben modificarse a tono con la variación geométrica a fin



de garantizar las leyes de conservación. Luego, para una sección transversal arbitraria  $\Omega = \Omega(x, t)$  [ $L^2$ ], por la cual escurre un caudal  $Q = V\Omega$  [ $L^3T^{-1}$ ], donde  $V$  [ $LT^{-1}$ ] representa la velocidad media del flujo, las dos primeras leyes deben re-escribirse como (Chow *et al.* 1988)

$$\frac{\partial\Omega}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/\Omega)}{\partial x} + g\Omega \frac{\partial h}{\partial x} = g\Omega(S_o - S_F), \quad (2.13)$$

donde  $S_o = -\partial\eta/\partial x$  es ahora la pendiente longitudinal del lecho, y  $S_F = \tau_B/\rho g R$  la denominada pendiente de fricción, para  $R = \Omega/\chi$  el radio hidráulico y  $\chi$  el perímetro mojado de la sección transversal. Estas ecuaciones constituyen la versión clásica de las denominadas ecuaciones de Saint Venant, para las cuales se han ignorado los efectos de la disipación turbulenta al igual que la falta de uniformidad de la velocidad en la sección transversal (usualmente corregido a través del coeficiente de Boussinesq  $\beta$  (Chow *et al.* 1988)). Las ecuaciones (2.12) y (2.13) proveen, por lo general, una más que adecuada descripción del gradiente hidráulico y de la distribución de caudales si el cauce presenta ramificaciones en el tramo considerado.

Ahora bien, para un cauce con secciones transversales arbitrarias, es útil parametrizar la dependencia de  $\Omega$  con el espacio y el tiempo en función de las variables de estado del sistema (Figura 2.2) a fin de calcular la derivada  $\partial\Omega/\partial x$  implícita en (2.13). De este modo, normalmente se consideran dos situaciones (Pujol y Menéndez 1987):

1.  $\Omega = \Omega(x, h(x, t))$ . Luego, y explicitando con un subíndice la variable que se mantiene constante durante la derivación, se tiene

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial\Omega}{\partial x} \right|_t &= \left. \frac{\partial\Omega}{\partial x} \right|_h + \left. \frac{\partial\Omega}{\partial h} \right|_x \left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_t \\ &= \left. \frac{\partial\Omega}{\partial x} \right|_h + B \left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_t, \end{aligned} \quad (2.14)$$

puesto que  $\delta\Omega \cong B\delta h$ , siendo  $B$  el ancho de la sección en la superficie libre (Figura 2.2)

2.  $\Omega = \Omega(x, z(x, t))$ , donde  $z = h + \eta$  representa la cota o elevación de la superficie libre. En este caso se llega a

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial\Omega}{\partial x} \right|_t &= \left. \frac{\partial\Omega}{\partial x} \right|_z + \left. \frac{\partial\Omega}{\partial z} \right|_x \left. \frac{\partial z}{\partial x} \right|_t \\ &= \left. \frac{\partial\Omega}{\partial x} \right|_z + B \left. \frac{\partial z}{\partial x} \right|_t, \end{aligned} \quad (2.15)$$

puesto que también se cumple  $\delta\Omega \cong B\delta z$  (Figura 2.2).

Se asume que las dos formulaciones,  $\Omega = \Omega(x, h(x, t))$  o  $\Omega = \Omega(x, z(x, t))$ , definen una relación unívoca entre  $\Omega$  y  $h$ , o  $z$ , generalmente dada en forma tabular. Por tanto, utilizando alternativamente la forma (1) y (2) para incorporar la variación de  $\Omega$  con  $x$ , la forma no conservativa de la ecuación de movimiento de Saint Venant se expresa como

$$1) \frac{1}{g\Omega} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{g\Omega^2} \frac{\partial Q^2}{\partial x} + (1 - F_R^2) \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{F_R^2}{B} \frac{\partial \Omega}{\partial x} \Big|_h + S_o - S_F \quad (2.16)$$

$$2) \frac{1}{g\Omega} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{g\Omega^2} \frac{\partial Q^2}{\partial x} + (1 - F_R^2) \frac{\partial z}{\partial x} = \frac{F_R^2}{B} \frac{\partial \Omega}{\partial x} \Big|_z - S_F, \quad (2.17)$$

que son las dos formas dadas por Pujol y Menéndez (1987, pp. 15 y 16) en su exhaustivo análisis unidimensional de escurrimientos en canales abiertos. Arriba, el número de Froude  $F_R$  se define por la relación

$$F_R = \left( \frac{Q^2 B}{g \Omega^3} \right)^{1/2} \quad (2.18)$$

Ahora bien, bajo la hipótesis de flujo cuasi-estacionario, o hipótesis de Exner, el cual equivale a asumir que el flujo se adapta instantáneamente a los cambios del lecho (hipótesis que puede ponerse en términos matemáticos rigurosos (Marti 1998)), las derivadas temporales desaparecen ( $\partial_t \rightarrow 0$ ), y las leyes de conservación se reducen al sencillo problema

$$Q = \text{const} \quad (2.19)$$

$$\frac{dh}{dx} = \frac{\frac{F_R^2}{B} \frac{\partial \Omega}{\partial x} \Big|_h + S_o - S_F}{1 - F_R^2} \quad (2.20)$$

$$\frac{dz}{dx} = \frac{\frac{F_R^2}{B} \frac{\partial \Omega}{\partial x} \Big|_z - S_F}{1 - F_R^2} \quad (2.21)$$

Para fijar ideas, si se considera en primer lugar una sección transversal rectangular de ancho constante y luego una cuyo ancho varía gradualmente se tiene

- Para  $B = \text{const}$ ,  $\partial \Omega / \partial x|_h = 0$  y  $\partial \Omega / \partial x|_z = B S_o$ . En consecuencia, la ecuación para calcular la variación del tirante con la distancia es

$$\frac{dh}{dx} = \frac{S_o - S_F}{1 - F_R^2}, \quad (2.22)$$

que es la clásica expresión utilizada en los textos de hidráulica (por ej., Henderson (1966)). Alternativamente, la pendiente del pelo de agua viene dada por

$$\frac{dz}{dx} = \frac{F_R^2 S_o - S_F}{1 - F_R^2} \quad (2.23)$$

- Para  $B = B(x)$ ,  $\partial\Omega/\partial x|_h = h dB/dx$  y  $\partial\Omega/\partial x|_z = h dB/dx + BS_o$ . En consecuencia, la ecuación para calcular la variación del tirante con la distancia es ahora

$$\frac{dh}{dx} = \frac{F_R^2 \frac{h}{B} \frac{dB}{dx} + S_o - S_F}{1 - F_R^2}, \quad (2.24)$$

Alternativamente, la pendiente del pelo de agua viene dada por

$$\frac{dz}{dx} = \frac{F_R^2 \left( \frac{h}{B} \frac{dB}{dx} + S_o \right) - S_F}{1 - F_R^2} \quad (2.25)$$

Todas estas expresiones exhiben la esperada singularidad en la sección crítica ( $F_R = 1$ ), en cuyo caso la hipótesis de Exner deja de ser válida (Marti 1998; Lyn 2002).

Por otra parte, en general se acepta que las dos leyes de conservación del sedimento transportado como carga suspendida y como carga de fondo, ecuaciones (2.3) y (2.4) respectivamente, no deben extenderse a valores promediados a toda el área dada la gran variabilidad que el fenómeno manifiesta a lo ancho de una determinada sección transversal del río Paraná (Lelièvre y Navntoft 1980; HYTSA 1987). En este caso, lo más apropiado es dividir la sección transversal en  $N_t$  tubos de corriente adoptando una metodología similar a la utilizada por el código computacional HEC-6 (USACE 1993) o BRI-STARS (Molinas 1994), donde por hipótesis se asume la inexistencia de transporte lateral de masa (líquida y sólida). A pesar que hay suficiente evidencia que señala la inexactitud de ésta última hipótesis, particularmente en presencia de corrientes secundarias (Engelund 1974, Maddux 2003, Parsons 2004), la evidencia experimental reunida durante la ejecución de esta Tesis indica que la hipótesis de división del flujo en  $N_t$  tubos de corrientes resulta, en principio, aceptable.

Luego, una vez determinado  $h = h(x)$  o  $z = z(x)$  a partir de resolver (2.24) o (2.25), se puede calcular la sección de escurrimiento para cada tubo de corriente con  $\Omega_i = \Omega_i(x, h(x))$ , o  $\Omega_i = \Omega_i(x, z(x))$ . Alternativamente, se puede calcular  $\Omega_i$  directamente asumiendo una profundidad media  $h_i$  en el interior de cada tubo de corriente de seccion media  $\Omega_i = B_i h_i$  (Figura 2.3). Una vez conocida  $\Omega_i$  en cada tubo, es posible calcular la velocidad media  $u_i = Q_i/\Omega_i$  puesto que  $Q_i = const$  (y conocido para cada tubo de corriente (Tassi *et al.* 2000)). Luego, con dicho valor de  $u_i$  se puede estimar  $q_B$ ,  $E$  y  $D$  acorde a las fórmulas dadas previamente, u otras en su defecto. Esta descripción es válida para calcular la hidrodinámica dentro de un paso de Exner, con lo cual, a fin de actualizar la cota del lecho, hace falta modificar entonces las ecuaciones de conservación del sedimento para incorporar la variación geométrica de la sección transversal. Puesto que por definición las condiciones hidrodinámicas son aproximadamente uniformes en el interior de cada tubo de corriente, e invocando nuevamente la hipótesis de Exner de flujo cuasi-estacionario (Marti 1998) bajo equilibrio dinámico entre erosión y decantación (García y Parker 1993), las leyes de

conservación del sedimento transportado como carga de fondo se reducen a

$$n \frac{\partial(\eta B_i)}{\partial t} + \frac{\partial G_B}{\partial x} = 0 \quad , \quad (2.26)$$

donde  $G_B = B_i q_B [L^3 T^{-1}]$  representa la descarga sólida volumétrica en todo lo ancho del tubo de corriente. Luego, operando esta expresión se puede arribar a una forma equivalente a (2.4), modificada para la divergencia en planta de la sección transversal del tubo de corriente

$$n \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial q_B}{\partial x} = -q_B \frac{d \ln B_i}{dx} \quad (2.27)$$

En definitiva, las ecuaciones a utilizarse para secciones transversales (tubos de corriente) uniformes o no uniformes bajo la hipótesis de flujo cuasi-estacionario de Exner y de equilibrio dinámico entre  $D$  y  $E$  son

	$B_i = const$	$B_i = B_i(x)$	
$\frac{dz}{dx} =$	$\frac{F_R^2 S_o - S_F}{1 - F_R^2}$	$\frac{F_R^2 \left( \frac{h}{B_i} \frac{dB_i}{dx} + S_o \right) - S_F}{1 - F_R^2}$	
$F_R^2 =$	$\frac{u^2}{gh}$	$\left( \frac{Q^2 B_i}{g \Omega^3} \right)$	(2.28)
$n \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial q_B}{\partial x} =$	0	$-q_B \frac{d \ln B_i}{dx}$	

donde para estimar la capacidad de transporte del flujo  $q_B$ , se recurre a una fórmula del tipo (2.5) como ya se mencionó previamente. El procedimiento descrito constituye el enfoque 1D del clásico problema de la hidráulica fluvial, cuya solución provee la evolución temporal del lecho en un tramo determinado. A partir de ahora esta Tesis se limita a analizar exclusivamente la expresión (2.27), que constituye una generalización de (2.4), y proporciona la base del método SMD para estimar  $q_B$ .

## 2.2. Método SMD para la estimación de $q_B$

El Método de Seguimiento de Migración de Dunas, llamado de aquí en más SMD, ha sido aplicado en ríos de llanura por varios autores desde mediados del siglo pasado. En el río Paraná, Stukrath (1969) fue el primero en implementarlo. En el año 1977 el método fue utilizado por la Dirección Nacional de Construcciones Portuarias y Vías Navegables, y por la Comisión Nacional

de Energía Atómica (1977). Años mas tarde, HYTSA (1987) realizó estudios para el gasoducto Mesopotámico, debiendo para ello estimar magnitudes del gasto sólido de fondo, cálculo para el cual eligieron el método SMD. Simultáneamente HYTSA (1987) realizó importantes mediciones del sedimento transportado en suspensión en el área de ubicación del gasoducto. Casi al mismo tiempo, Amsler (1988) presentó un trabajo de investigación sobre migración de dunas con datos del río Paraná, adoptando al efecto el método SMD. Poco después, Lima *et al* (1990) presentaron un trabajo en el cual verificaron la aplicabilidad del método a un tramo del Paraná, cuyos resultados fueron luego mejorados por Amsler y Gaudin (1994) al analizar la influencia de formas de fondo menores superimpuestas a formas mayores, característica de las dunas típicas del río Paraná. Marti (1998) presentó un estudio más detallado de la aplicabilidad de la fórmula, en el cual se destaca la incertidumbre inherente al método de seguimiento de dunas, exponiendo los resultados de Gómez y Phillips (1998) quienes sugieren que el 82 % de la variabilidad temporal observada en el transporte de carga de fondo puede asociarse al proceso de traslación de formas de fondo, siendo el 18 % restante consecuencia del caos inherente al proceso físico, "denominado incertidumbre determinística por los autores". Entre las contribuciones del trabajo de Marti (1998), se destaca la demostración de la escasa - o nula - influencia del número de Froude en el proceso de traslación de dunas.

### 2.2.1. Formas de Fondo Periódicas Simples, o Formas de $\mathcal{O}(1)$ -orden uno-

Ni bien la tensión de corte del flujo sobre el material del fondo supera el valor crítico, los granos del lecho se ponen en movimiento (Vanoni 1975). Mientras que por lo general las partículas de arcillas y limos entran en suspensión, las arenas y gravas comienzan a deslizarse, a saltar y a rodar dentro de una fina capa cerca del lecho, denominada *capa activa del lecho* (Van Rijn 1986, Julien 1995, ver Figuras 2.1 y 2.2). Es así que el conjunto de partículas en movimiento que en forma frecuente mantiene contacto con el lecho, se denomina transporte de fondo (Figuras 2.3 y 2.4). En consecuencia, el caudal sólido de fondo está definido por el sedimento que, por unidad de ancho y por unidad de tiempo, se encuentra en movimiento dentro de la *capa activa del lecho* y puede medirse en unidades de peso ( $MT^{-3}$ ), de masa ( $ML^{-1}T^{-1}$ ) o de volumen ( $L^2T^{-1}$ ). La conversión de unidades de peso a masa, o a volumen, esta relacionada con la inclusión o no del peso específico del sedimento  $\gamma_s$  (o en su defecto, con su densidad específica  $\rho_s$ ). Cuando el caudal sólido o carga de fondo se integra en todo el ancho del canal se obtiene el flujo volumétrico de fondo de material sólido del lecho, el cual puede expresarse en unidades de peso  $MLT^{-3}$ , de masa  $MT^{-1}$ , o de volumen  $L^3T^{-1}$ .

Si el fondo del lecho está cubierto por dunas, hay una cierta cantidad de partículas depositadas

en la cara de aguas arriba que entran en suspensión, fenómeno que incrementa su intensidad hasta hacerse máximo a la altura de la cresta de la duna, mientras que por encima del valle las partículas son difundidas por mezcla turbulenta en la capa de corte generada en la zona de flujo separado, y eventualmente depositadas aguas abajo del punto de reenganche del flujo a la espera de un nuevo ciclo de transporte (Fredsoe 1981; Van Rijn 1986). Al mismo tiempo que existe esta carga de fondo en suspensión, hay otro grupo de partículas que no llega a despegarse significativamente del lecho, transportándose por rodamiento o saltación. Estas formas de transporte que comprenden a las partículas que de una forma u otra siempre vuelven a estar en contacto con el lecho, generando la migración de las formas del fondo, permiten establecer relaciones indirectas entre el seguimiento de la migración de dunas y el transporte de fondo (Fredsoe 1981; Van Rijn 1986; 1993).

En esencia, el método SMD consiste en asumir que la migración de dunas puede asimilarse a la traslación "sin cambio de forma" de una onda o función  $\zeta = \zeta(x, t)$ . Luego, por comparación entre la ecuación de traslación que por hipótesis debe satisfacer la función de onda, y la ecuación de conservación del sedimento, se obtiene una relación que vincula  $q_B$  con la celeridad de migración de la duna y su altura.

En consencuencia, es útil describir la posición del lecho como compuesta de una componente media  $\eta_o$  que solamente varía con respecto a un escala temporal larga (entre crecida y crecida), y otra fluctuante  $\zeta$  que proporciona la amplitud local de la forma de fondo (Figura 2.4), y por ende, la variabilidad del lecho en la escala temporal corta -o rápida-.

$$\eta = \eta_o(x) + \zeta(x, t) \quad , \quad (2.29)$$

en cuyo caso la ley de conservación del sedimento de fondo (2.27), deviene

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{q_B}{n} \right) = - \left( \frac{q_B}{n} \right) \frac{d \ln B}{dx} \quad (2.30)$$

Con referencia a la Figura 2.4, y considerando que el transporte de fondo en el interior de la capa activa esta definido como el producto de una velocidad media de traslación de las partículas,  $c_B$ , una concentración media de fondo  $\theta_B$ , y una altura local de las formas de fondo  $\zeta$  (es decir, el transporte es máximo en la cresta de la duna, y nulo en el valle (Fredsoe 1981; Van Rijn 1986)), se tiene

$$q_B \simeq c_B \theta_B \zeta \quad , \quad (2.31)$$

en cuyo caso es útil expresar el resultado en la forma

$$\begin{aligned} \frac{q_B}{n} &\simeq c_B \frac{\theta_B}{n} \zeta \\ q &\simeq c \zeta \quad , \end{aligned} \quad (2.32)$$

donde  $q$  y  $c$  están dados por

$$q = \frac{q_B}{n} \quad , \quad c = c_B \frac{\theta_B}{n} \quad (2.33)$$

Por consistencia, es de esperar que exista cierta compatibilidad entre las concentraciones de las distintas capas, es decir,  $\theta \leq \theta_B \ll n$ , a menos que se trate de una mezcla de agua-sedimento hiperconcentrada (Morris y Williams 1996). Debe mencionarse que Van Rijn (1986; 1993) utiliza  $\delta_B$  -espesor de la capa activa- en lugar de  $\zeta$  en la ecuación (2.31). Por tanto, en virtud de las relaciones previas, la ley de conservación del sedimento de fondo se expresa

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = -q \frac{d \ln B}{dx} \quad (2.34)$$

**i) Caso**  $c = c_o = const$ ,  $B = B_o = const$

Este caso, una vez que (2.33) se introduce en (2.34), produce la conocida ecuación escalar de onda (*one-way equation* en la literatura anglosajona), definida aquí a través del problema de valores iniciales

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + c_o \frac{\partial \zeta}{\partial x} = 0 \quad (2.35)$$

$$\zeta(x, 0) = f(x), \quad (2.36)$$

en cuyo caso la función de amplitud  $\zeta(x, t)$  de la forma de fondo satisface

$$\zeta = f(x - c_o t) \quad (2.37)$$

Integrando ahora (2.32) a lo largo de una longitud de onda  $\lambda$  de la forma de fondo, y puesto que  $c = c_o = const$ , se obtiene la tasa de transporte de carga sólida de fondo promediada en el espacio  $\bar{q}$

$$\frac{1}{\lambda} \int_x^{x+\lambda} q dx = \frac{c_o}{\lambda} \int_x^{x+\lambda} \zeta dx \quad (2.38)$$

$$= \frac{c_o}{\lambda} \int_x^{x+\lambda} f(x - c_o t)|_t dx$$

$$\bar{q} = \sigma c_o \Lambda_o \quad , \quad (2.39)$$

donde  $\Lambda_o$  es la amplitud máxima de la forma del lecho en una longitud de onda, y  $\sigma$  representa el coeficiente de forma

$$\sigma = \frac{\int_x^{x+\lambda} \zeta dx}{\Lambda_o \lambda} \quad , \quad (2.40)$$

que expresa la razón entre el área comprendida por la forma del lecho, y el área del rectángulo circunscripto (Figura 2.5). Para formas de fondo triangulares,  $\sigma = 0,5$ , mientras que para las dunas del río Paraná,  $\sigma$  oscila alrededor de 0.66 (Stuckrath 1969, Amsler 1992, 1998). En síntesis, la tasa media de transporte de carga sólida de fondo, acorde al método SMD, esta dada por

$$\overline{q_B} = n \sigma c_o \Lambda_o \quad (2.41)$$

Esta ecuación sintetiza la esencia del método SMD (Van Rijn 1993), puesto que es suficiente conocer la amplitud media y la celeridad media de migración de un tren de dunas para estimar la carga media de fondo (promediada en el espacio).

**ii) Caso**  $c = c_o = const$ ,  $B = B(x)$

De (2.34) se obtiene

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + c_o \frac{\partial \zeta}{\partial x} = -c_o \zeta \frac{d \ln B}{dx} , \quad (2.42)$$

sujeta a la condición inicial (2.36). Este problema se puede resolver recurriendo al cambio de variables

$$\xi = x - c_o t \quad , \quad \tau = t \quad , \quad (2.43)$$

y cuya transformación inversa es

$$x = \xi + c_o \tau \quad , \quad t = \tau \quad (2.44)$$

Aplicando ahora la regla de la cadena para la derivación de una función compuesta

$$\frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial}{\partial \xi} + \frac{\partial \tau}{\partial x} \frac{\partial}{\partial \tau} = 1 \frac{\partial}{\partial \xi} + 0 \frac{\partial}{\partial \tau} \quad (2.45)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial \xi}{\partial t} \frac{\partial}{\partial \xi} + \frac{\partial \tau}{\partial t} \frac{\partial}{\partial \tau} = -c_o \frac{\partial}{\partial \xi} + 1 \frac{\partial}{\partial \tau}$$

Con lo que (2.42) deviene una ecuación diferencial ordinaria de variables separables

$$\frac{\partial \zeta}{\partial \tau} = -c_o \zeta g(\xi + c_o \tau) \quad , \quad g(x) = \frac{d \ln B(x)}{dx} \quad , \quad (2.46)$$

cuya integral es

$$\zeta(\xi, \tau) = f(\xi) e^{-c_o \int_0^\tau g(\xi + c_o t') dt'} \quad , \quad (2.47)$$

o, en términos de las variables originales

$$\zeta(x, t) = f(x - c_o t) e^{-c_o \int_0^t g[x - c_o(t-t')] dt'} \quad (2.48)$$



Si ahora se elige una curva característica  $x - c_o t = x' - c_o t'$  de manera tal que se verifique  $0 \leq t' \leq t$ , es posible evaluar la expresión anterior integrando con respecto a  $x'$  en lugar de  $t'$ , puesto que a lo largo de la curva característica se cumple  $dt' = dx'/c_o$ . En consecuencia

$$\begin{aligned}\zeta(x, t) &= f(x - c_o t) e^{-\int_0^x \frac{d \ln B(x')}{dx'} dx'} \\ &= f(x - c_o t) \frac{B_o}{B(x)}\end{aligned}\quad (2.49)$$

Este resultado predice, en principio, una supuesta atenuación -o amplificación- de la altura de las formas de fondo a medida que se propagan a lo largo de un tubo de corriente divergente -o convergente. En caso que el tubo de corriente sea de ancho constante, la expresión anterior se reduce correctamente a la solución (2.37), la cual representa el modelo clásico que sustenta el SMD (Van Rijn 1993). Es sencillo comprobar que (2.49) satisface (2.42).

Desde otro ángulo, la solución  $B_o f = B\zeta$  no es otra cosa que la ley de conservación de la fase sólida como carga de fondo. Por otra parte, si  $x_M$  representa el punto donde se ubica la máxima amplitud  $\Lambda_o$  de la forma de fondo al instante arbitrario  $t = 0$  (Figura 2.6), la ec.(2.49) predice entonces que la amplitud en la posición  $x$  al tiempo  $t = (x - x_M)/c_o$  esta dado por

$$\begin{aligned}\zeta\left(x, \frac{x - x_M}{c_o}\right) &= f(x_M) \frac{B_o}{B} \\ \Lambda(x) &= \Lambda_o \frac{B_o}{B(x)}\end{aligned}\quad , \quad (2.50)$$

Este modelo es interesante por dos motivos: *i*) es consistente con el clásico método de SMD (Van Rijn 1993), *ii*) es inédito y por tanto esta Tesis sería la primera vez que se lo somete a un proceso de validación. No obstante, es conveniente primero estimar la tasa media de transporte como carga de fondo,  $\bar{q}_B$ . Consecuentemente, este modelo predice

$$\begin{aligned}\bar{q} &= \frac{c_o}{\lambda} \int_x^{x+\lambda} f(x - c_o t)|_t \frac{B_o}{B(x)} dx \\ &= \frac{c_o B_o}{\lambda} \int_x^{x+\lambda} f(x - c_o t)|_t g(x) dx\end{aligned}\quad ,$$

donde puesto que la función  $g(x) = 1/B(x)$  satisface, para un tubo monotónicamente divergente (o por el contrario, convergente), la condición  $m = 1/B(\lambda) \leq g(x) \leq M = 1/B(0)$ , es posible aplicar el primer teorema generalizado del valor medio del cálculo integral

$$\int_0^\lambda f(x)g(x) dx = \mu \int_0^\lambda f(x)dx \quad , \quad \mu = \frac{1}{B(\vartheta)} \quad , \quad 0 < \vartheta < \lambda \quad (2.51)$$

En virtud de lo cual, la expresión anterior se escribe

$$\begin{aligned}\bar{q} &= \frac{c_o B_o}{\lambda B(\vartheta)} \int_0^\lambda f(x - c_o t)|_t dx \\ &= \frac{c_o B_o}{\lambda B(\vartheta)} \sigma \Lambda_o \lambda\end{aligned}$$

En definitiva,

$$\bar{q}_B = n \sigma c_o \Lambda_o \frac{B_o}{B_\vartheta} \quad , \quad B_\vartheta = B(\vartheta) \quad , \quad 0 < \vartheta < \lambda \quad (2.52)$$

Para un tubo monotónicamente divergente se verifica la condición  $B_o/B(\vartheta) < 1$ , y en consecuencia, el transporte medio estimado con este modelo es ligeramente inferior al predicho por el método estándar de SMD (ec.(2.41)).

**iii) Caso  $c = c(\zeta)$ ,  $B = B(x)$**

En este caso, (2.34) deviene

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + c(\zeta) \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \zeta \left( \frac{\partial c}{\partial x} + c \frac{d \ln B}{dx} \right) = 0 \quad (2.53)$$

Si ahora se factoriza el término entre paréntesis en forma apropiada, es decir

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + c(\zeta) \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \zeta a c = 0 \quad , \quad (2.54)$$

donde la función  $a = a(x, c(\zeta))$  esta dada por

$$\begin{aligned}a &= \frac{1}{c} \frac{\partial c}{\partial x} + \frac{d \ln B}{dx} \\ &= \frac{\partial \ln(cB)}{\partial x}\end{aligned} \quad (2.55)$$

Luego, se tiene que la solución a (2.53) puede obtenerse mediante el método de las características

$$\begin{aligned}\frac{d\zeta}{dt} + \zeta a c &= 0 \quad , \quad \frac{dx}{dt} = c(\zeta) \\ \frac{d\zeta}{\zeta} &= -a c dt \quad ,\end{aligned}$$

con lo cual se llega finalmente a

$$\int \frac{d\zeta}{\zeta} = - \int \frac{\partial \ln(cB)}{\partial x} dx + C$$

En este modelo, debe quedar claro que el problema está subdeterminado, es decir, hay una ecuación para dos incógnitas ( $\zeta, c(\zeta)$ ). La única alternativa es, entonces, explicitar una de las variables en función de la otra. Finalmente, el resultado es

$$\frac{c(\xi)}{c_o} = \frac{\Lambda_o}{\zeta(\xi)} \frac{B_o}{B(\xi)} \quad , \quad \xi = x - \int c(\zeta) dt : const \quad (2.56)$$

Aquí, por definición de las condiciones o valores iniciales, y con referencia a la Figura 2.6, se verifica  $c_o = c|_{t=0}$ ,  $\Lambda_o = \zeta|_{t=0}$ . Calculando ahora la tasa media de transporte, teniendo en cuenta que para  $t = const$  se cumple  $dx = d\xi$

$$\bar{q} = c_o B_o \frac{\Lambda_o}{\lambda} \int_0^\lambda \frac{d\xi}{B(\xi)} \quad , \quad (2.57)$$

con lo cual, luego de aplicar el teorema del valor medio del cálculo integral se obtiene finalmente

$$\bar{q}_B = n c_o \Lambda_o \frac{B_o}{B_m} \quad , \quad \frac{1}{B_m} = \frac{1}{\lambda} \int_0^\lambda \frac{d\xi}{B(\xi)} \quad (2.58)$$

#### **iv) Síntesis de los modelos propuestos**

Es posible compendiar ahora los modelos de SMD propuestos, los que fueron derivados **con independencia de la hidrodinámica del flujo** tal como se mencionó previamente. No obstante, a continuación se incluye la solución a la hidrodinámica de la lámina líquida -siempre bajo la hipótesis de Exner y de la aproximación de ondas largas- para enfatizar que la solución a la evolución de un lecho erosionable es, en esencia, un problema fuertemente acoplado entre la descarga líquida y la descarga sólida. El cuadro (2.1) se puede completar entonces con los resultados obtenidos hasta aquí, teniendo en cuenta que para cada tubo de corriente, la descarga volumétrica satisface  $Q = const$ .

Debe quedar claro que la primera columna constituye el estado de referencia básico -donde no hay variación lateral alguna en las variables que definen el problema-, mientras que las otras dos columnas incluyen los resultados que se obtuvieron al relajar la condición de variación lateral nula exclusivamente a la geometría del tubo,  $B = B(x)$ . El modelo (iii) proporciona una estimación para  $q_B$  que no necesariamente decrece -o aumenta- para una condición de tubos de corriente divergentes -o convergentes. Esto se debe en parte a la dependencia de  $c$  con  $\zeta$  (ondas más pequeñas viajan más rápido, ec.(2.56)), con lo cual posiblemente este efecto cinemático compense la deficiencia producida por la geometría. No obstante, únicamente una validación con datos de campo -o de laboratorio- podrá decidir finalmente sobre la validez -y consistencia- de los modelos propuestos. Este trabajo de validación puede hacerse solamente si se dispone de datos en cantidad y calidad suficientes, aspecto cuya concreción fue uno de los objetivos de la presente Tesis.

Por último, es conveniente expresar en forma adimensional la estimación de  $\overline{q_B}$  proporcionada por el método de SMD. Para ello, adoptando escalas apropiadas de velocidad y profundidad del flujo (usualmente valores medios) se llega a

$$\epsilon = \sigma \frac{c_o}{u_o} \frac{\Lambda_o B_o}{h_o B_\mu} \quad , \quad \epsilon = \frac{1}{n} \left( \frac{q_B}{u_o h_o} \right) \quad (2.59)$$

$$(2.60)$$

$$B_\mu = \begin{cases} B_\vartheta = B(\vartheta), & 0 < \vartheta < \lambda \quad \text{mod.}(ii) \\ \sigma B_m, & B_m = \lambda / \int_0^\lambda d\xi / B(\xi) \quad \text{mod.}(iii) \end{cases} \quad (2.61)$$

En este caso, el parámetro de transporte  $\epsilon$  representa una concentración efectiva de sedimentos, o relación entre descarga sólida y descarga líquida por unidad de ancho. El Cuadro 2.2 sintetiza valores típicos de  $\epsilon$  para varios ríos de llanura a lo largo del mundo (datos extraídos de Parker (1976)), en comparación con el valor calculado para el río Paraná por Marti (1998).

### 2.2.2. Formas de Fondo Periódicas Compuestas (= $\mathcal{O}(1) + \mathcal{O}(2)$ )

La primera complicación que presenta el análisis de la migración de las formas de fondo fue tratada en la subsección precedente, y se refiere a la influencia de la variación de las secciones transversales en el proceso de transporte. La segunda complicación que presenta el análisis de la cinemática de las ondas del lecho se asocia a la existencia de formas múltiples, o formas menores superpuestas a otras mayores, y que modifican la relación de transporte tradicional (ec.(2.41)).

Por tanto, en esta subsección se presenta la metodología SMD orientada a estimar el gasto sólido de fondo considerando el fenómeno de superposición de formas. Este fenómeno consiste en la existencia y movimiento simultáneo en el lecho del río de pequeñas dunas que se desplazan sobre las grandes dunas, y que contribuyen tanto a incrementar la resistencia hidráulica como las relaciones de transporte (Amsler y Schreider 1992, Mattar 2002). Amsler y Gaudin (1994) demostraron que el hecho de no tener en cuenta el transporte debido a las pequeñas dunas superpuestas sobre las más grandes conduce a una subestimación de la carga de fondo del 20-30 % para aguas medias, y del 40-60 % para estados de creciente.

En consecuencia, y debido a lo dificultoso y engorroso que es identificar a las pequeñas dunas en cada intervalo de tiempo, se presenta a continuación una herramienta para la identificación y separación de ondas de distintas frecuencias basado en el análisis tradicional de Fourier. Esta técnica se utiliza en conjunción con el método SMD, conjunción nunca implementada en el río Paraná hasta el presente, y que contempla el cálculo de la carga de fondo por superposición de formas de distintas amplitudes.

Si se observan los perfiles longitudinales del lecho relevados siguiendo las líneas de flujo durante las crecidas extraordinarias, tal como se analiza en detalle mas adelante, se aprecian dos geometrías o configuraciones del lecho bien diferenciadas (Figura 2.7); una primera, tipo *a*, donde la duna de mayor tamaño cobra una altura significativa y presenta un talud de aguas abajo pronunciado, y una segunda, tipo *b*, donde la duna de mayor tamaño presenta un talud de aguas abajo tan suave que permite el desplazamiento de formas mas pequeñas sobre él.

En la forma tipo *a*, la geometría y dinámica de la duna es semejante al desplazamiento de las barras de arena, en la cual se asume que todas las partículas de sedimento que se trasladan sobre el paramento de aguas arriba son depositadas por gravedad en el talud de aguas abajo. De esta forma, todas las partículas que se encuentran en movimiento conformando el caudal sólido de fondo son tenidas en cuenta con sólo medir el avance de la forma de fondo mayor, y por tanto, se asume que la clásica ec. (2.41) del método de SMD aplicada al seguimiento de sólo esta forma mayor para estimar el caudal sólido de fondo es válida.

Para la forma tipo *b* se presenta un talud de aguas abajo muy suave, lo que no permite que todas las partículas que se encuentran en movimiento sobre la forma de fondo se depositen por gravedad, encontrándose que parte del material de arrastre atraviesa o transita el frente de avance de las dunas mayores. En consecuencia, existe un caudal sólido de fondo adicional al estimado por el método clásico de seguimiento de dunas mayores, dado por las dunas pequeñas que escapan a la acumulación frontal de sedimento en el talud de aguas arriba de las dunas grandes.

En síntesis, hay situaciones documentadas donde se ha observado que parte del material de arrastre atraviesa a menudo el frente de avance de las formas de fondo menores, como ser rizos, y su vez los rizos se desplazan por sobre el talud de aguas abajo de las dunas, y éstas por el frente de avance de las barras o bancos de arena. De esta manera, los cálculos obtenidos al emplear la ec. (2.41) sólo a la forma mayor subestiman el acarreo del material del lecho por el fondo en el caso de formas mayores con pendiente de aguas abajo suave o moderado (Figura 2.7.b). A los fines de entender este comportamiento, Sidorchuck (1990) presentó un desarrollo teórico por medio del cual pudo llegar a una expresión para la estimación del caudal sólido de fondo partiendo del análisis de una partícula que es arrastrada desde el talud de aguas arriba de una duna, traspasando su cresta y finalmente llegando al talud de aguas abajo. Para realizar éste análisis, parte de considerar la ecuación de deformación del lecho:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -\frac{\partial q}{\partial x} \quad , \quad q_b = \frac{q_B}{n} \quad (2.62)$$

donde  $\zeta$  representa la cota de un punto determinado sobre la forma de fondo, la dirección  $x$  coincide

con la dirección del escurrimiento de las formas de fondo. Ahora bien, puesto que si se sigue el movimiento se tiene

$$\frac{d\zeta}{dt} = \frac{\partial\zeta}{\partial t} + \frac{dx}{dt} \frac{\partial q_b}{\partial x} = 0 \quad (2.63)$$

con lo cual la celeridad a la que se traslada esa porción del lecho (o forma de fondo) tiene que satisfacer

$$c_z = \frac{dx}{dt} = \frac{\partial q_b}{\partial \zeta} \quad (2.64)$$

En consecuencia,

$$\frac{\partial q_b}{\partial x} = c_z \frac{\partial \zeta}{\partial x} \quad (2.65)$$

Entonces, tomando la derivada del producto  $c_z \zeta$ , se llega a

$$\frac{\partial q_b}{\partial x} = \frac{\partial (c_z \zeta)}{\partial x} - \zeta \frac{\partial c_z}{\partial x} , \quad (2.66)$$

luego, integrando según  $x$ , se obtiene la integral general:

$$q_b = c_z \zeta - \int \zeta c'_z dx + F(t) , \quad (2.67)$$

donde  $c'_z = \partial c_z / \partial x$ . A la función derivada  $F(t)$  se la determina en base a las condiciones imperantes en la depresión de la forma de fondo de menor tamaño, o forma de  $\mathcal{O}(2)$ , en donde el flujo del material de fondo será, en general, distinto de cero e igual a  $q_{B\pi_2}$ , para  $\zeta = 0$ :

$$q_2 = q_{B\pi_2} + c_{z_2} \zeta - \int \zeta c'_z dx \quad (2.68)$$

De esta manera, en el caso de existir deformaciones durante el movimiento de la forma de fondo, el caudal sólido de fondo varía a lo largo de su longitud proporcionalmente a las cotas de su perfil, con la corrección apropiada por el grado de no uniformidad del movimiento en algunos puntos del perfil. Promediando ec. ( 2.68) a lo largo de la longitud de la forma de fondo  $\lambda_2$ , se obtiene una fórmula para el caudal sólido de fondo medio que contemple las deformaciones en el tiempo de las formas de fondo y que tiene en consideración el tránsito de los acarreos en sus depresiones

$$\bar{q}_2 = q_{B\pi_2} + \frac{1}{\lambda_2} \int_0^{\lambda_2} \left( c_z \zeta - \int \zeta c'_z d\zeta \right) dx , \quad (2.69)$$

la que puede expresarse en la forma simplificada y más conocida

$$\bar{q}_2 = q_{\pi_2} + \sigma_2^* c_2 \Lambda_2 , \quad (2.70)$$

donde  $\sigma_2^*$  es el coeficiente de forma dinámico de la onda

$$\sigma_2^* = \frac{\int_0^{\lambda_2} (c_z \zeta - \int \zeta c'_z dx) dx}{c_2 \Lambda_2 \lambda_2} \quad (2.71)$$

En caso que la velocidad de desplazamiento de los puntos de la superficie de la forma de fondo se mantenga invariable, es decir, que no se modifica la forma con el desplazamiento,  $\sigma_2^*$  coincide con el coeficiente estático de la forma de fondo:

$$\begin{aligned} \sigma_2^* &= \frac{1}{\Lambda_2 \lambda_2} \int_0^{\lambda_2} \zeta(x, t) dx \\ &= \frac{1}{\Lambda_2 \lambda_2} \sigma_2 \Lambda_2 \lambda_2 \end{aligned} \quad (2.72)$$

donde la integral representa la sección longitudinal de la forma de fondo.

La velocidad de desplazamiento media  $c_2$  (en general variable según  $x$ ) de la onda más pequeña u onda de  $\mathcal{O}(2)$ , debe satisfacer, acorde a (2.64)

$$c_2 = \left( \frac{\partial q_b}{\partial \zeta} \right)_{med} , \quad (2.73)$$

en un punto con cota  $\zeta$ , y donde  $q_b$  representa el transporte local de material de arrastre. También puede calcularse directamente de la fórmula general

$$c_2 = \frac{\bar{q}_2 - q_{\pi_2}}{\sigma_2^* \Lambda_2} \quad (2.74)$$

En definitiva, la relación de transporte medio asociado al desplazamiento de formas menores, u  $\mathcal{O}(2)$  verifica la relación

$$\bar{q}_2 = q_{b_2} + \sigma_2^* \Lambda_2 \left( \frac{\partial q_b}{\partial \zeta} \right) , \quad (2.75)$$

donde  $q_{b_2}$  representa, como se dijo anteriormente, el flujo de material de arrastre que transita la depresión entre dos formas contiguas de  $\mathcal{O}(2)$  sin producir acumulación.

Las ec. (2.64), (2.70), y (2.74) son utilizadas para determinar la velocidad del movimiento y caudal sólido de fondo para las formas de fondo más simples, cuyas superficies no se encuentran perturbadas por la presencia de otras formas. Sin embargo, por lo general, en el lecho del cauce se genera un conjunto jerárquico de formas de fondo donde las pequeñas se desplazan por sobre la superficie de las mayores. Por tanto, siguiendo a Sidorchuck (1999), es posible ahora abstraerse de los procesos de transporte de sedimentos de  $\mathcal{O}(2)$  y considerarlos solamente como estructuras

elementales discretas (cuasi-partículas). Si se emplea la ec. (2.64), y teniendo en cuenta (2.75), la velocidad de traslación de la forma de fondo de  $\mathcal{O}(1)$ , o de mayor tamaño, se puede determinar con ayuda de la siguiente

$$c_1 = \left( \frac{\partial \bar{q}_2}{\partial \zeta} \right) \quad (2.76)$$

$$= \sigma_2^* \Lambda_2 \frac{\partial^2 q_b}{\partial \zeta^2} + \frac{\partial q_{\pi_2}}{\partial \zeta} \quad (2.77)$$

Una vez conocida la velocidad de desplazamiento de las formas de  $\mathcal{O}(1)$ , es posible calcular el caudal de arrastre de las formas de fondo de  $\mathcal{O}(1)$ , complejizada por formas de  $\mathcal{O}(2)$

$$\begin{aligned} \bar{q}_1 &= q_{\pi_{1/2}} + \sigma_1^* \Lambda_1 c_{\Gamma 1} \\ &= q_{\pi_{1/2}} + \sigma_1^* \Lambda_1 \left( \sigma_2^* \Lambda_2 \frac{\partial^2 q_o}{\partial \zeta^2} + \frac{\partial q_{\pi_2}}{\partial \zeta} \right) \end{aligned} \quad (2.78)$$

Desde un punto de vista práctico, las fórmulas de Sidorchuk (1990; 1999) pueden interpretarse en función del concepto de velocidad relativa de desplazamiento entre formas de fondo de distintos órdenes (Vionnet 2004), corregido por porosidad

$$\bar{q}_{B1} = q_{\pi_{1/2}} + n c_1 \sigma_1 \Lambda_1 + n(c_2 - c_1) \sigma_2 \Lambda_2 \quad (2.79)$$

donde  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  son los coeficientes de forma estáticos de ambas jerarquías. En el caso que existieran formas de órdenes jerárquicos mayores, como por ejemplo, barras de arena ( $\mathcal{O}(0)$ ) que se desplazan más lentamente que las dunas de  $\mathcal{O}(1)$ , la deducción teórica se realiza de la misma forma que para que este último caso. En definitiva, y como síntesis de la metodología propuesta por Sidorchuk (1990; 1999), al momento de estimar el caudal sólido transportado en la proximidad del lecho (carga de fondo) deben diferenciarse dos situaciones:

1. Si las formas de fondo presentan taludes de aguas abajo con ángulos próximos al ángulo que adopta el material granular en reposo embebido en agua, se puede considerar que todo el material que es removido del talud de aguas arriba, sobre el cual pueden o no desplazarse formas menores, es depositado en el talud de aguas abajo de una forma de mayor orden, situación en la cual no tiene sentido considerar la complejidad del conjunto de formas de menor orden, dado que el método SMD aplicado a la forma jerárquica mayor dará el resultado correcto.
2. No obstante, es posible que en determinadas condiciones hidráulicas, no todas las formas de fondo que conforman un conjunto morfológico jerárquicamente complejo del relieve fluvial se



caractericen por poseer una pendiente abrupta en el frente de avance, de modo que atrape a las partículas de arrastre que superen la cresta. Por tanto, si el talud de aguas abajo de las formas de fondo son sensiblemente inferiores al ángulo de reposo del material en agua, parte del material de arrastre a menudo atraviesa el frente de avance de las formas de fondo. En consecuencia, los cálculos que se realicen empleando la ec. (2.70) arrojarían resultados significativamente inferiores al caudal sólido de fondo realmente transportado. Si se cuenta con información acerca de las velocidades de traslación de las amplitudes de las formas más simples (dunas sin rizos, etc), entonces, como se deduce de la ec. (2.67), debe considerarse un transporte adicional de material de arrastre en tránsito por los taludes de aguas abajo de éstas formas de fondo. En breve, si se presentan formas de fondo complejas, con formas que se desplazan sobre las mayores, las cuales presentan taludes tendidos, es necesario calcular el transporte de material de arrastre como la suma de los caudales sólidos de todos los tipos de formas de fondo.

La magnitud del caudal sólido  $q_{\pi_1}$ , o  $q_{\pi_{1/2}}$  (corregido ahora por porosidad) que transita por el talud de aguas abajo de las formas de fondo sin producir acumulación, y que por tanto no participa de su evolución  $\zeta = \zeta(x - c_z t)$ , no se puede determinar mediante mediciones de trenes de dunas. En laboratorio,  $q_{\pi}$  puede ser determinado por diferencia entre volúmenes acumulados en el tanque de sedimentación,  $\bar{q}_S$ , y el correspondiente al transportado en calidad de formas de fondo. Es decir,

$$\begin{aligned}\bar{q}_S &= q_{\pi} + n \sigma \Lambda c_z \\ \bar{q}_{\pi} &= \bar{q}_S - n \sigma \Lambda c_z\end{aligned}\tag{2.80}$$

Ensayos de laboratorio permitirían estimar, en principio, el orden de magnitud de  $q_{\pi}$ . Lo mismo se puede aplicar en campo cuando se ensaya una trinchera de prueba, si se realiza el seguimiento de un tren de dunas a vez, la diferencia entre el  $q_B$  obtenido con el SMD y el obtenido por la evolución de la trinchera de prueba o trampa de sedimentos será el material de arrastre que no aporta a la evolución de la forma, siempre y cuando el diseño de la trinchera sea tal que asegure la no depositación dentro de ella de material en suspensión. Por último, cabe mencionar que las presentes fórmulas fueron extraídas de tres trabajos del catedrático Alcksei Sidorchuck, de la Universidad Estatal de Moscú, traducidos al castellano por el Ingeniero P. Kurgansky. Estas traducciones se encuentran compiladas, junto a una rederivación de las ecuaciones, en el informe interno CENEHA 02-04, "Transporte de Sedimentos por Formas de Diversos Tamaños", (Vionnet, 2004).

## Separación de Formas de Fondo Compuestas mediante el Análisis de Componentes de Fourier

En esta sección se incluye una breve descripción del Método de la Transformada de Fourier (TF), método también conocido como perteneciente a la familia de los Métodos Espectrales, aunque esta última terminología se utiliza en el contexto del análisis de métodos numéricos para la resolución de Ecuaciones Diferenciales en Derivadas Parciales con la Transformada Rápida de Fourier.

En la presente Tesis, la TF se utiliza para descomponer o desagregar las dos amplitudes dominantes, denominadas ondas de  $\mathcal{O}(1)$  y  $\mathcal{O}(2)$  tal como se observa en los registros, a los fines de facilitar el tratamiento estadístico de las formas de fondo. En otras palabras, la TF provee una forma automática, y desprovista de las subjetividades propias del observador de turno, para la caracterización espectral de la estructura jerárquica de las formas de fondo que normalmente se observan en los registros del lecho del río Paraná (que para la presente Tesis, se limitan a los registros obtenidos durante la ocurrencia de las crecidas extremas de 1983, 1992, y 1998).

Este tratamiento estadístico está orientado exclusivamente a determinar amplitudes de onda dominantes, valores que a su vez podrán luego vincularse a otros parámetros hidrodinámicos, lo que puede redundar en un mejor entendimiento de la mecánica de las formas de fondo de un gran río de llanura. El presente análisis se limita a la utilización de dos filtros digitales, conocidos como *pasa-bajo* y *pasa-alto*, lo que desagrega la estructura de ambas componentes dominantes. El tratamiento de la información así desagregada permite una identificación más rápida de las formas de  $\mathcal{O}(2)$ , facilitando su seguimiento durante todo el período registrado, y por ende, del cálculo del transporte asociado del material de fondo.

Para la TF, las amplitudes de las dunas son interpretadas como señales periódicas sin importar su paridad, aunque estrictamente hablando, la TF parte de concebir que la función es no periódica, aunque susceptible de ser interpretada como una combinación infinita de armónicos (senos y cosenos) de frecuencias que varían *continuamente*. Por tanto, si a la elevación de la superficie del lecho  $z(x, t)$ , registrada en la progresiva  $x$  al tiempo  $t$  con respecto a un cierto plano de referencia, se le sustrae previamente la tendencia topográfica del tramo relevado, es posible escribir el par de Fourier como

$$\begin{aligned}\widehat{z}(f, t) &= \int_{-\infty}^{\infty} z(x, t) e^{i2\pi f x} dx \\ z(x, t) &= \int_{-\infty}^{\infty} \widehat{z}(f, t) e^{-i2\pi f x} df ,\end{aligned}$$

donde  $f$  representa la frecuencia en ciclos por metro (o en unidades recíproca de longitud de onda).

Desde un punto de vista práctico, el análisis se ejecuta con la FFT, que constituye la forma rápida de evaluar la Transformada Discreta de Fourier (TDF). Para ello, la utilidad del análisis se hace evidente si se asume que la función  $z = z(x; t)|_{t: fijo}$  es periódica con período  $L$ . Luego, si  $u$  es evaluada en un conjunto de  $N$  puntos igualmente espaciados una distancia  $\Delta$ , es relativamente sencillo obtener su representación en términos de una expansión *discreta* de Fourier (Ferziger and Peric 1999)

$$u_j = \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} \hat{u}_n e^{ik_n x_j} \quad , \quad (2.81)$$

la cual puede invertirse fácilmente recurriendo a la bien conocida fórmula de la suma de una progresión geométrica

$$\hat{u}_n = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} u_j e^{-ik_n x_j} \quad , \quad (2.82)$$

donde  $x_j = j\Delta$ ,  $j = 0, 2, \dots, N-1$  y  $k_n = 2\pi n/(N\Delta)$ ,  $n = -N/2, \dots, N/2-1$ , puesto que la función se repite en  $x_0$ , es decir,  $u_0 = u_N$ . No obstante, dada las propiedades de periodicidad de estas dos relaciones,  $u_{-j} = u_{N-j}$ ,  $j = 0, 1, \dots, N-1$ , y  $\hat{u}_{-n} = \hat{u}_{N-n}$ ,  $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$ , es conveniente reescribir las dos sumatorias anteriores de manera tal que ambos subíndices,  $j$  y  $n$ , varíen sobre el mismo rango  $0, 1, \dots, N-1$ .

Por otra parte, y antes de continuar, la interpretación posterior de los resultados se facilita si se establece primero una relación auxiliar, que parte de reconocer que la longitud de onda  $\lambda_n$  de cada armónico de frecuencia, o número de onda,  $k_n$  es, por definición

$$\begin{aligned} \frac{2\pi}{\lambda_n} &= \frac{2\pi n}{N\Delta} \\ &= 2\pi n f_o \quad , \quad f_o = \frac{1}{N\Delta} = \frac{1}{L} \quad , \end{aligned}$$

con lo cual se obtiene

$$\begin{aligned} \lambda_n &= \frac{1}{n f_o} \\ &= \frac{L}{n} \end{aligned} \quad (2.83)$$

Es posible demostrar que la ec.(2.81) representa el polinomio interpolante de la función  $u = u(x)$  si se reemplaza la variable discreta  $x_j$  por la variable continua  $x$ . Los números  $\hat{u}_n$  pueden interpretarse como la función de distribución de la amplitud de  $u$  para cada onda de frecuencia  $k_n$ . El proceso de descomponer la señal original  $u(x)$  en sus ondas constitutivas se denomina **análisis de Fourier** (2.82). Inversamente, es posible reconstruir  $u$  a partir de sus ondas constituyentes de amplitud  $\hat{u}_n$  con la transformada discreta inversa de Fourier (2.81), proceso conocido como **síntesis de Fourier**.

El espectro de energía  $P_z(f)$  del registro completo de datos, que en el contexto de la TF puede representarse simbólicamente por la relación

$$P_z(f) = 2 |\widehat{z}(f)|^2 \quad , \quad 0 < f < \infty$$

exhibe, por lo general, una serie de picos alternados con amplias oscilaciones, lo que hace confusa su interpretación. La aplicación de filtros permite separar amplitudes de onda de distintas frecuencias reteniendo las que interesan y eliminando aquellas que perturban la interpretación de los resultados, pudiéndose así volver al espacio físico con una serie limpia de las frecuencias asociadas al ruido presente en la señal. El producto entre el espectro de energía y la función filtro  $\mathcal{H}(f)$ , seleccionada como óptima, da como resultado una serie filtrada en el dominio de las frecuencias. La selección de la función filtro se realiza en función a las características de la serie a analizar. En el presente análisis se implementó el filtro Butterworth, que tiene la forma de un rectángulo con sus puntas suavizadas (ver Figura 2.8) a los fines de evitar la generación o adición de ciertos “rizos” en el espectro.

El filtro rectangular funciona como una ventana que permite ver sólo las ondas de baja o alta frecuencia eliminando las no deseadas, producto esperado en esta aplicación por medio de la cual se pretende separar ambas frecuencias utilizando el filtro en su forma directa y en su forma inversa (*filtro inverso* =  $1 - \text{filtro}$ ). Una vez realizado el filtrado, se vuelve al dominio físico con dos series de datos, una correspondiente a las dunas de baja frecuencia, u ondas largas o de  $\mathcal{O}(1)$ , y la segunda correspondiente a las dunas de alta frecuencia, u ondas cortas o de  $\mathcal{O}(2)$ . Es decir, las ondas largas u  $\mathcal{O}(1)$  se obtienen con un filtro *pasa-bajo*  $\mathcal{H}(f)$ , mientras que las ondas cortas u  $\mathcal{O}(2)$  se obtienen con un filtro *pasa-alto*  $1 - \mathcal{H}(f)$ ,

$$z_1(f; t) = \int_{-\infty}^{\infty} \left( \mathcal{H}(f) \int_{-\infty}^{\infty} z(x, t) e^{i2\pi f x} dx \right) e^{-i2\pi f x} df$$

$$z_2(f; t) = \int_{-\infty}^{\infty} \left( (1 - \mathcal{H}(f)) \int_{-\infty}^{\infty} z(x, t) e^{i2\pi f x} dx \right) e^{-i2\pi f x} df$$

La forma general para dejar pasar las bajas frecuencias de una serie de datos está dada por el filtro de Butterworth

$$\mathcal{H}(f) = 1/[1 + C(f/f_o)^{2p}] \quad , \quad (2.84)$$

donde la constante  $C$  va de 1 a 0,414 y define la magnitud del punto donde  $f = f_o$ , que representa la frecuencia de corte (cut-off frequency),  $f$  es la frecuencia de los datos, y  $p$  es el orden del filtro. Las frecuencias altas se filtran usando la siguiente ecuación:

$$\mathcal{H}(f) = 1 - 1/[1 + C(f/f_o)^{2p}] \quad (2.85)$$

Como resumen, el proceso de filtrado se reduce a tres pasos básicos:

- Transformación de los datos del dominio físico al dominio de las frecuencias usando la Transformada Discreta de Fourier, TDF.
- Multiplicación de los datos transformados por el filtro de frecuencias adoptado  $\mathcal{H}(f)$  en el dominio de las frecuencias.
- Transformación inversa de los datos filtrados al dominio físico, usando la TDF inversa.

### 2.3. Geometría de dunas: Análisis estadístico.

Al momento de aplicar la metodología hasta aquí descrita, es necesario definir los valores promediados de las características geométricas de las formas de fondo que serán luego utilizadas en las fórmulas de transporte seleccionadas. Debido a la naturaleza estocástica de las formas de fondo (Parker 2000), se propone realizar un análisis estadístico que permita obtener los valores de amplitud de dunas promediados y que se encuentren respaldados por la bibliografía especializada.

Si bien las series de valores periódicos pueden ser representadas por su media aritmética, en diversas circunstancias, el valor medio de la serie no es suficiente (van der Mark *et al* 2005), necesitando incorporar la variabilidad de las series al análisis. Por tanto, como primera aproximación, se filtrará la tendencia ascendente del lecho en el sentido del escurrimiento, con lo que se espera obtener no sólo los valores medios de las alturas de dunas para cada crecida y para cada progresiva sino también una idea del peso de ese valor medio en el completo de la serie.

### 2.4. Método de Evolución de Trincheras de Prueba

La estimación de la tasa de transporte de fondo por medio del dragado de trincheras de ensayo en el lecho es una técnica normalmente usada en estudios previos a la construcción de obras civiles emplazadas en un cauce fluvial. El aporte de material sólido influye fuertemente en el tiempo de ejecución de una obra civil con fundación en el cauce, y la información aportada por una trinchera de ensayo permite estimar el sobreancho que se le debe dragar a la fosa dentro de la cual se fundará la obra de modo de permitir un trabajo eficiente en el tiempo estipulado para su construcción. En el tramo Aguas Corrientes del río Paraná, y específicamente en la sección de estudio, se encuentran

los dos únicos registros de trincheras de ensayo disponibles en el tramo medio del río Paraná . La información de dichas trincheras fue aprovechada por investigadores de la FICH para realizar estimaciones de cargas de material de fondo a los fines de calibrar un modelo sedimentológico (Amsler *et al.* 1992; Prendes *et al.* 1994). En la presente Tesis se propuso repetir los mismos cálculos para la estimación del caudal sólido de fondo, aunque bajo el supuesto que la digitalización de información permitirá obtener valores optimizados.

El cálculo de la tasa de transporte de material de fondo se realiza en forma directa, computando el material que ingresa a la trinchera en cada intervalo de medición, reduciendo paulatinamente el volumen vaciado inicialmente. A continuación se presenta el fundamento teórico de la metodología y su forma de cálculo, cuyos resultados se incluyen luego en el Capítulo 5.

### 2.4.1. Fundamento teórico e hipótesis de cálculo

En un sistema aluvial conformado por un cauce principal y una extensa planicie aluvial surcada por numerosos cauces menores y por numerosos cuerpos lagunares de baja profundidad, la descripción analítica del escurrimiento puede aproximarse con suficiente precisión por las conocidas EAPP (Shallow Water Equations en la literatura anglosajona), como se describió anteriormente. Ahora, en una primera aproximación, si se considera que el cauce en el tramo analizado es lo suficientemente recto como para despreciar las variaciones transversales del movimiento del agua, puede aceptarse que el escurrimiento está bien representado por la forma 1D de la conocida formulación 2D de las EAPP (Vrendelhill 1998).

Las ecuaciones (2.3) y (2.4) de conservación del sedimento representan un balance entre el sedimento transportado como material de fondo y como material en suspensión al considerar la variación de la cota del lecho y la concentración media de sedimento en la vertical. Si el intercambio neto de material entre la capa activa del lecho y la capa de sedimento en suspensión se denomina  $S = D - E$ , se tiene entonces:

$$n \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial q_B}{\partial x} = S \quad (2.86)$$

Integrando a lo largo de la trinchera de longitud  $L$ :

$$n \int_0^L \frac{\partial \eta}{\partial t} dx + \int_0^L \frac{\partial q_B}{\partial x} dx = \int_0^L S dx, \quad (2.87)$$

y aplicando el Teorema de Leibnitz a la derivada temporal

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_0^L \eta dx = \int_0^L \frac{\partial \eta}{\partial t} dx + \eta(L, t) \frac{dL}{dt} - \eta(0, t) \frac{d0}{dt}, \quad (2.88)$$

y puesto que por hipótesis, los límites de la trinchera son fijos, se llega luego de reemplazar este resultado en la expresión anterior, a

$$n \frac{d}{dt} \int_0^L \eta dx + q_B|_L - q_B|_0 = \int_0^L S dx \quad (2.89)$$

Si ahora se asume que el gasto sólido que abandona la trampa de sedimentos, o trinchera,  $q_B|_L$  es nula, y teniendo en cuenta que la integral  $\int \eta dx$  representa el área  $A$  comprendida bajo el perfil del lecho, se tiene

$$n \frac{dA}{dt} - q_B|_0 = \bar{S} L, \quad (2.90)$$

$$\bar{S} = \frac{1}{L} \int_0^L S dx, \quad (2.91)$$

se llega así a una expresión muy simple de aplicar que permite evaluar la tasa de transporte de material de fondo por medio de mediciones directas en una trinchera de ensayo

$$q_B|_0 = n \frac{dA}{dt} - \bar{S} L$$

Si  $L$  no supera la distancia que necesita una partícula transportada en suspensión para caer al lecho a causa de la disminución de velocidad provocada por la presencia de la trinchera misma (Figura 2.9) y el cómputo se realiza por medio de la medición de las variaciones del volumen vacío en la trinchera en cada paso de tiempo, el término  $\bar{S}L$  de la fórmula propuesta se anula, resultando el caudal sólido de fondo solamente función de la variación areal de la sección longitudinal considerada,

$$q_B|_0 = n \frac{dA}{dt} \quad (2.92)$$

$$\simeq \frac{n}{\Delta t} \int_0^L [\eta(x, t + \Delta t) - \eta(x, t)] dx \quad (2.93)$$

Esta expresión permite computar el volumen del material de transporte de fondo total que ingresa a la trinchera, que tiene en cuenta al transporte por migración de dunas y a la tasa de sedimento que se transporta en forma suspendida por encima de la cresta que la duna que no contribuye a la migración de las formas de fondo.

## 2.5. Cuadros y Figuras

	(i)	(ii)	(iii)
$\frac{B}{B_o} =$	1	$\neq 1, fcn(x)$	$\neq 1, fcn(x)$
$\frac{dz}{dx} =$	$\frac{F_R^2 S_o - S_F}{1 - F_R^2}$	$\frac{F_R^2 \left( \frac{h}{B} \frac{dB}{dx} + S_o \right) - S_F}{1 - F_R^2}$	$\frac{F_R^2 \left( \frac{h}{B} \frac{dB}{dx} + S_o \right) - S_F}{1 - F_R^2}$
$F_R^2 =$	$\frac{u^2}{gh}$	$\left( \frac{Q^2 B}{g \Omega^3} \right)$	$\left( \frac{Q^2 B}{g \Omega^3} \right)$
$\frac{c}{c_o} =$	1	1	$\frac{\Lambda_o}{\Lambda} \frac{B_o}{B}$
$\frac{\Lambda}{\Lambda_o} =$	1	$\frac{B_o}{B}$	$\frac{c_o}{c} \frac{B_o}{B}$
$\frac{\overline{qB}}{n \sigma c_o \Lambda_o} =$	1	$\frac{B_o}{B_\vartheta}$	$\frac{1}{\sigma} \frac{B_o}{B_m}$

Cuadro 2.1: Distintos modelos del método DMS para estimar la descarga sólida del fondo.



Investigador	Río	Estado	$\epsilon = \left(\frac{q_B}{n}\right) \frac{1}{q}$
Hubbell y Matejka (1959)	Middle Loup	Entrelazado	2.5E-4
Jones, Hawley y Crippen (1972)	Clear Creek	Meandroso	1.0E-6
Mapes (1969)	Walla Walla	Meandroso	2.5E-4
Nordin y Beberage(1965)	Río Grande	Entrelazado	2.5E-4
Colby y Hembree (1955)	Niobrara	Meandroso	5.0E-4
Fahnestock (1963)	White	Entrelazado	1.0E-3
Sharma (1974)	Laboratorio	Meandroso	1.0E-3
Quraishy (1973)	Laboratorio	Meandroso	1.0E-3
Schumm y Kahn (1972)	Laboratorio	Entrelazado	2.5E-3
Schumm y Kahn (1972)	Laboratorio	Meandroso	1.0E-3
Marti (1998)	Paraná	Entrelazado	1.0E-6

Cuadro 2.2: Estimaciones del parámetro de transporte  $\epsilon$  realizadas por varios autores en distintos ríos y en laboratorios (extraídos de Parker 1976) y por Marti (1998).

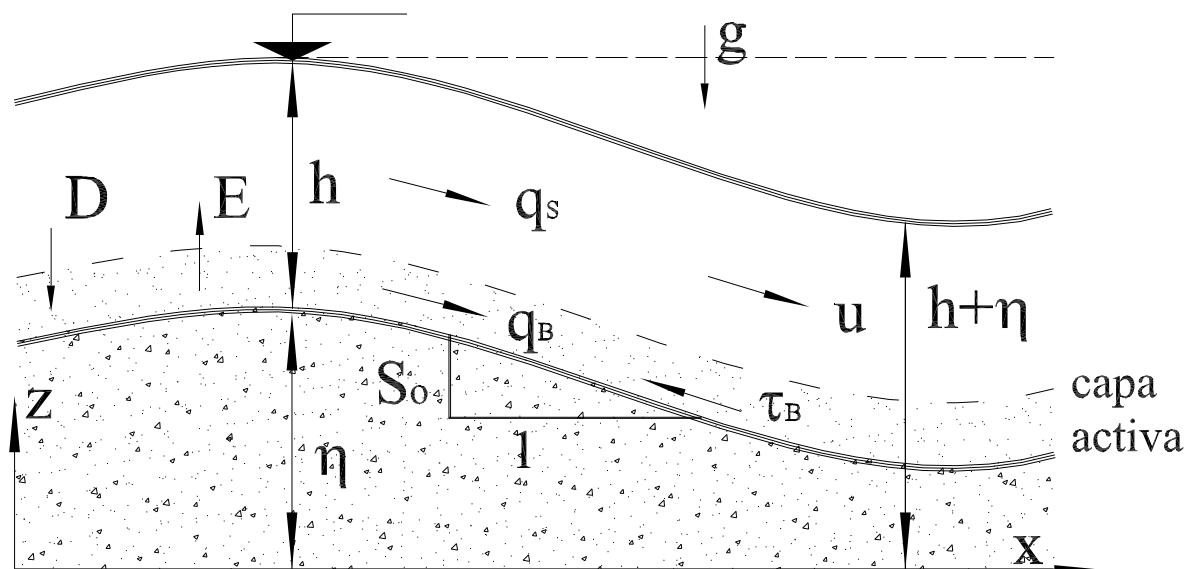


Figura 2.1: Variables intervencientes en el balance hidro-sedimentológico de las cantidades transportadas por un flujo de un fluido incompresible escurriendo sobre un cauce aluvial.

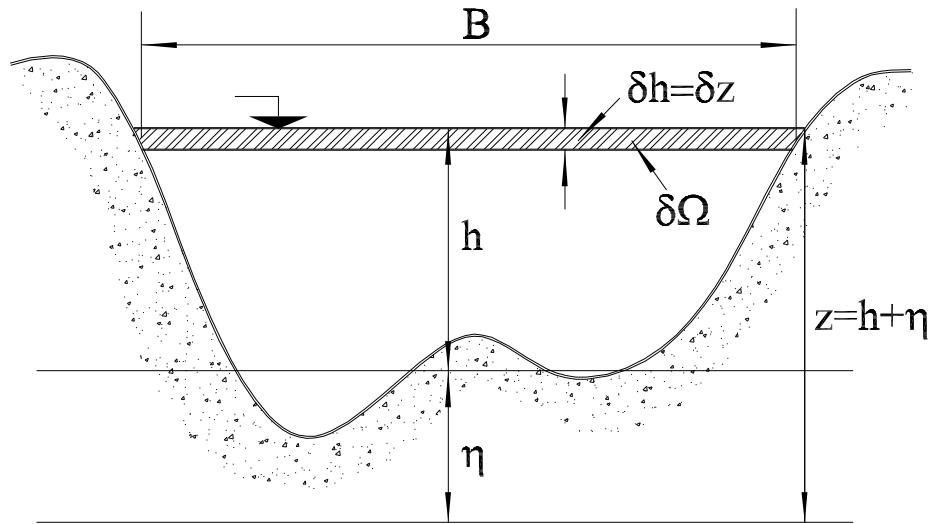


Figura 2.2: Sección transversal arbitraria de un cauce natural.

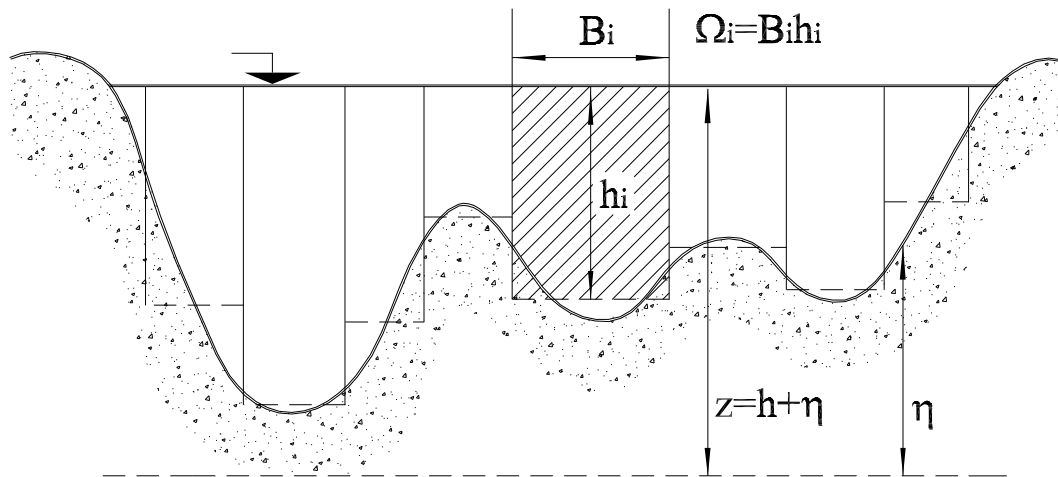


Figura 2.3: Sección de escurrimiento  $\Omega_i$  para cada tubo de corriente.

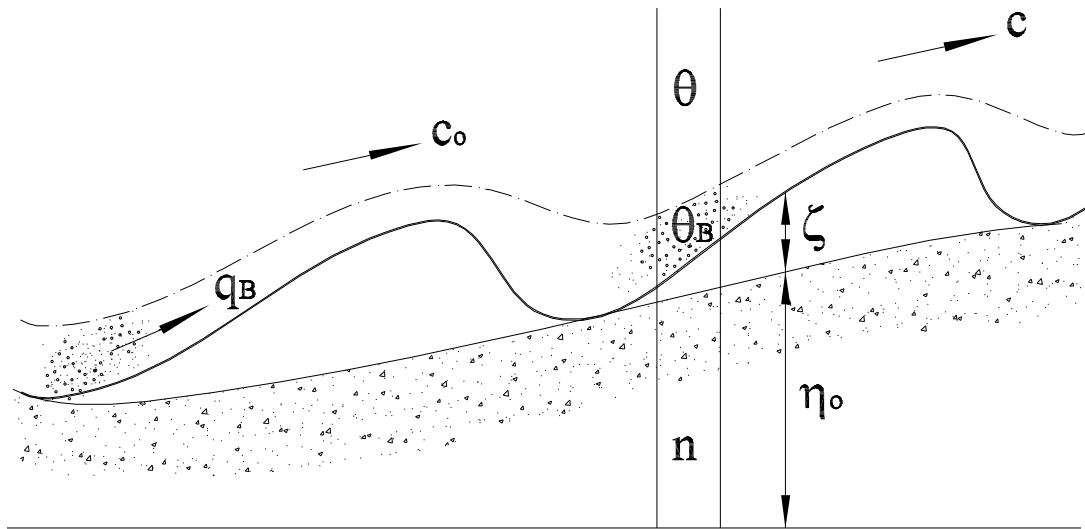


Figura 2.4: Detalle de la capa activa.  $\theta$  concentración del sedimento en suspensión,  $\theta_B$  concentración del sedimento dentro de la capa activa,  $n$  fracción sólida del volumen del sedimento depositado.

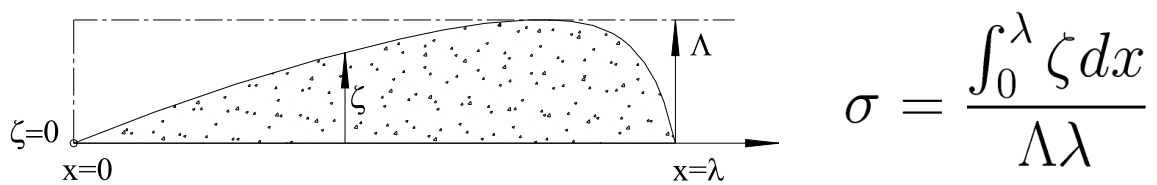


Figura 2.5: Definición del coeficiente de forma.

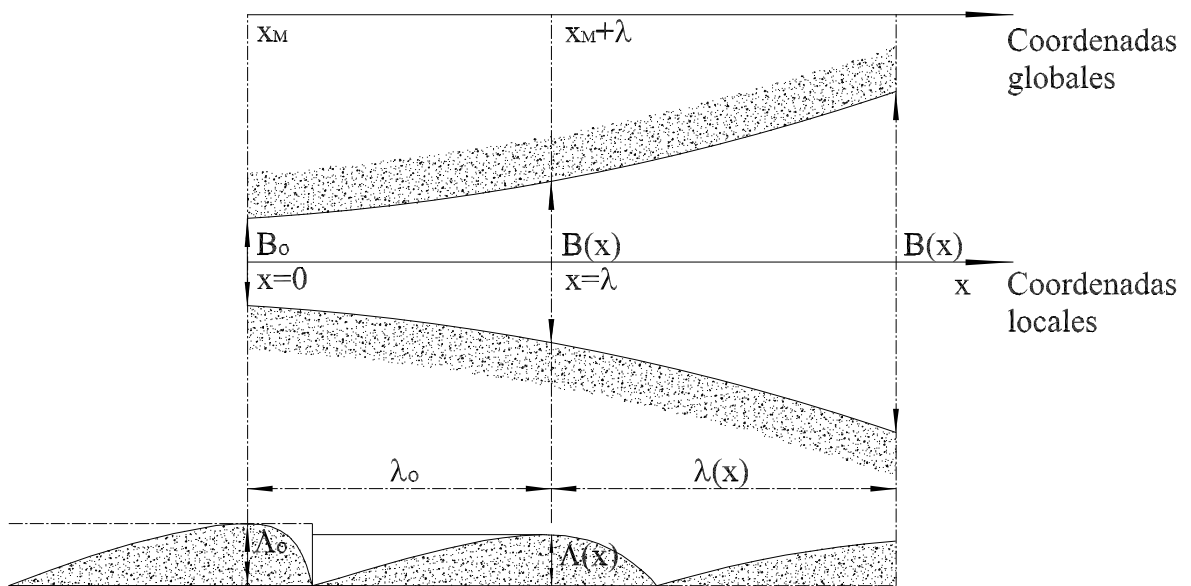


Figura 2.6: Evolución de la topografía del fondo a lo largo de un tubo de corriente divergente en planta.

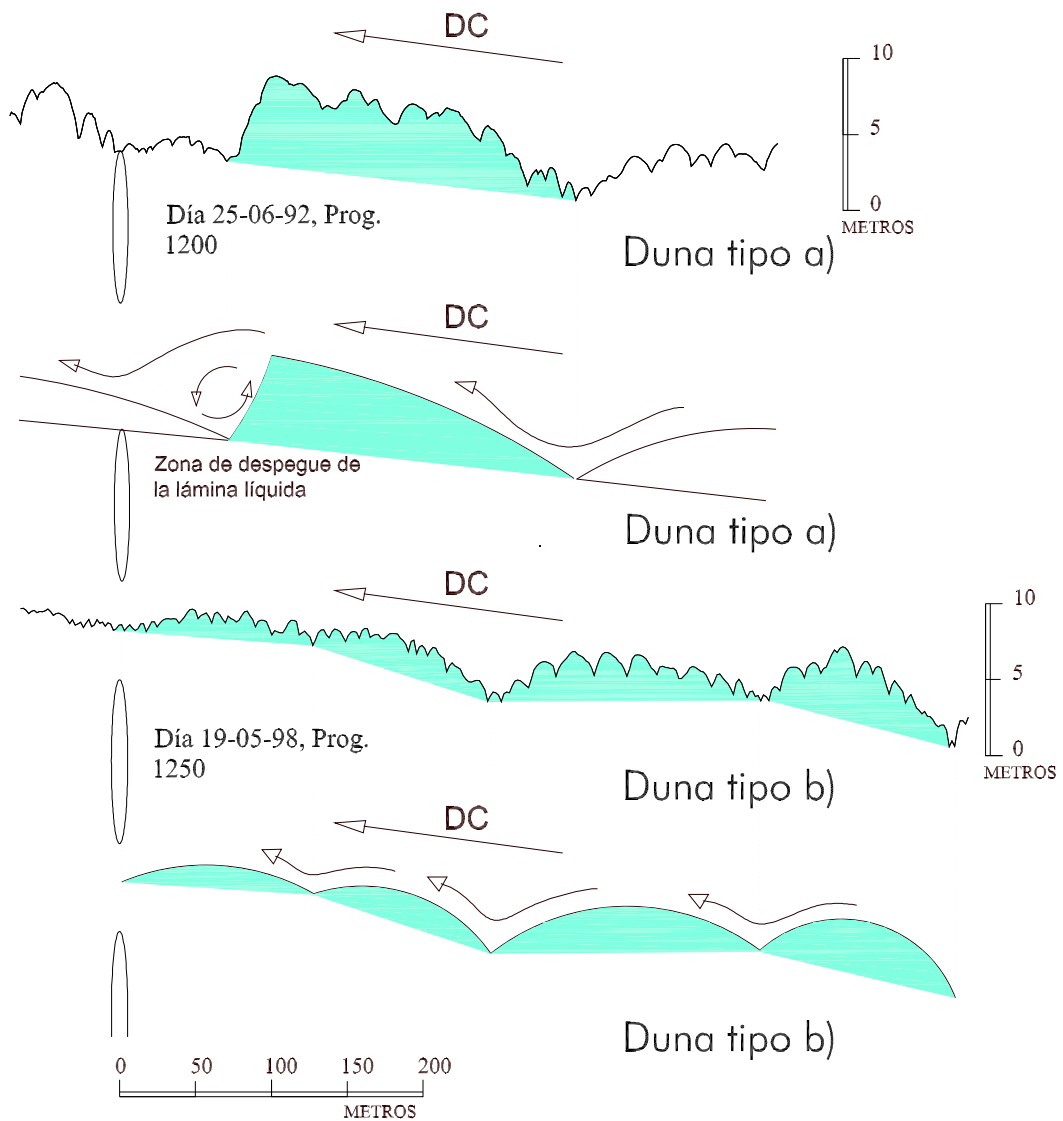


Figura 2.7: Características de las grandes dunas presentes en el área de estudio durante crecidas extraordinarias.

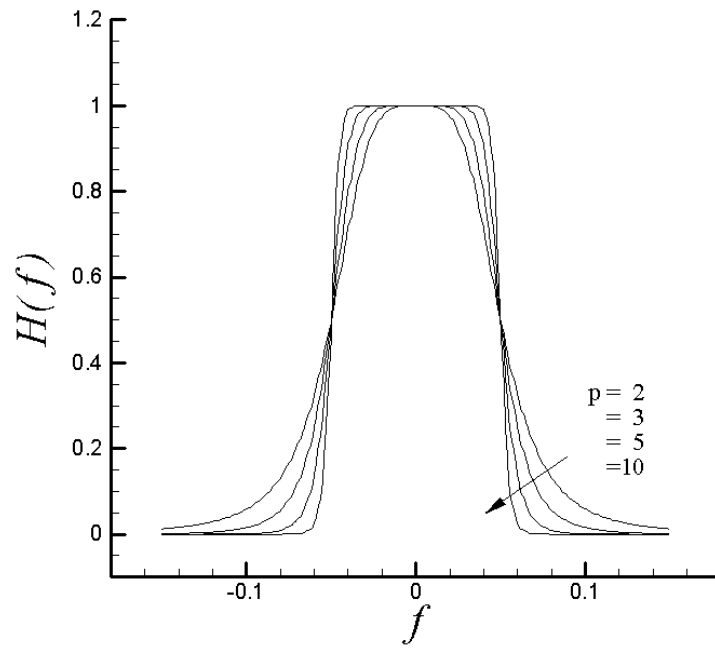


Figura 2.8: Filtro Butterworth, detalle del suavizado en los vértices.

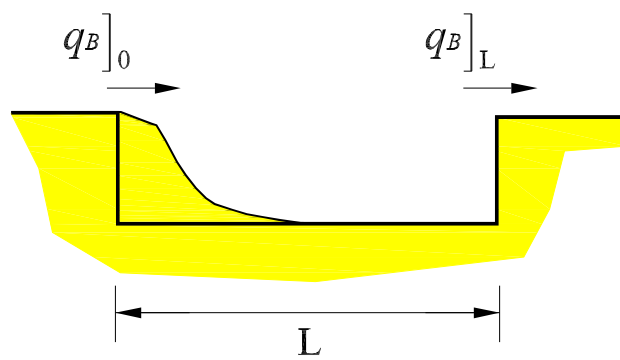


Figura 2.9: Descripción esquemática del proceso de deposición en la trinchera.

## Capítulo 3

# Información de Campo

### 3.1. Introducción

Medir la descarga sólida de fondo en forma directa en algún punto del thalweg del río Paraná, y más aún, en una sección con las características que presenta el tramo de Aguas Corrientes (Figura 1.2), es prácticamente imposible. Esto es debido a las grandes profundidades y las altas velocidades de la corriente en el tramo, lo que muy posiblemente inutilizaría los muestreadores del tipo trampa de sedimento (Lelièvre and Navntoft 1980; Julien 1995), y de no ser así, seguramente los desplazaría de la ubicación deseada sin poder determinarse las coordenadas del punto en el cual efectivamente se está midiendo. Por dicha razón, en los registros de caudales sólidos del río Paraná existe un único antecedente de mediciones detalladas, las que fueron realizadas a la altura de la ciudad de Corrientes por Lelièvre y Navntoft (1980). En consecuencia, en reemplazo a las mediciones directas es necesario recurrir a métodos indirectos para la estimación de esta variable hidro-sedimentológica de singular importancia para comprender parte de los procesos morfológicos observados en un gran río de llanura como el Paraná.

Desde comienzos del siglo XX diversas entidades de las Provincias de Santa Fe y Entre Ríos, así como por la Dirección Nacional de Construcciones Portuarias y Vías Navegables (DNCPyVN), han realizado distintos tipos de relevamientos en el área de Aguas Corrientes. Dicha sección posee la virtud de concentrar los caudales en un tramo angosto y profundo del cauce principal, contando con márgenes relativamente estables en su parte más estrecha. Durante el año 1967, estas virtudes fueron aprovechadas para la construcción del Túnel Subfluvial Hernandarias, obra interprovincial que de ahí en más cobraría vital importancia para el desarrollo económico de la región mesopotámica (Amsler 2003). Desde una perspectiva histórica, cabe mencionar que en el año 1960 comenzaron los primeros estudios sedimentológicos con vistas de verificar la viabilidad de la obra,

con la contribución de ingenieros alemanes y argentinos.

En la década del 80 se retomaron los estudios sedimentológicos, luego de que toda la cuenca del río Paraná fuera afectada por una de las crecidas más excepcionales del siglo XX (Cuadro 3.1), la crecida de los años 1982/83, durante la cual fue comprometida la estabilidad del Túnel por la formación de dunas de tamaños superiores a los observados hasta entonces y dónde se produjo una profundización general del lecho. De allí en más, y hasta la fecha, comenzaron a realizarse relevamientos periódicos e ininterrumpidos del lecho en el tramo de Aguas Corrientes. A esto se suma que a partir de ese evento extremo, el por entonces Departamento de Hidrología General y Aplicada de la Universidad Nacional del Litoral, hoy Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, mantuvo un vínculo más estrecho con el Ente Administrador del Túnel, actuando como asesor técnico en varias oportunidades (Amsler *et al.* 1994; Prendes *et al.* 1994). La información de campo acumulada desde entonces es la suficientemente variada como para sustentar parte de los objetivos de la presente Tesis.

En éste Capítulo se discuten brevemente los datos recopilados -tanto históricos como propios- en función de la metodología adoptada para su ulterior análisis (Capítulo 2). Al efecto, vale recordar que la metodología seguida para estimar el caudal sólido de fondo ( $q_B$ ) se basa en dos formas alternativas:

- Por el Seguimiento de la Migración de Dunas (SMD), con y sin corrección por la presencia de formas superpuestas.
- Por el Seguimiento de la Evolución de Trincheras (SET) excavadas en el lecho.

En síntesis, se presenta a continuación un detallado procesamiento de la información de campo consistente en el escaneado de setenta y cinco registros de sonda ecográfica de perfiles longitudinales del lecho, su recortado en función de la velocidad de la lancha que realizó el relevamiento, la reducción a escalas apropiadas y la reconstrucción del perfil del lecho mediante el georeferenciamiento y posterior digitalización de los perfiles resultantes respecto a una grilla cartesiana. Todo éste procesamiento dio por producto setenta y cinco archivos con formato ASCII, fácilmente accesibles por cualquier usuario y leibles con cualquier editor de textos. Además, la información fue levantada acorde a los requerimientos del análisis armónico -o lo que es lo mismo, para su tratamiento con series de Fourier- metodología implementada por primera vez con datos del río Paraná. Se incluyen, asimismo, datos experimentales producidos en un canal de laboratorio (Urciolo *et al.* 1965), los cuales complementan la información de campo obtenida durante el relevamiento de la primera trinchera de prueba excavada en el cauce principal del río Paraná, y un breve racconto de



los numerosos antecedentes acumulados en la FICH en los últimos 15 años.

### **3.2. Recopilación de Observaciones Históricas y obtención de Mediciones Propias.**

La evolución de la topografía de un cauce aluvial es un indicador de cuanta energía conlleva el flujo para erosionar y transportar material del lecho. Puesto que la medición de la topografía del cauce es simple y bastante precisa a partir de la disponibilidad de sondas ecógrafas acopladas a Sistemas de Posicionamiento Satelital con corrección diferencial (DGPS), los relevamientos sucesivos en el tiempo de perfiles topográficos del lecho permiten la estimación indirecta de los caudales sólidos de fondo, bajo el supuesto que se verifican una serie de condiciones hidro-sedimentológicas, tal como se detalla en la Sección 2.3. Una cuota considerable del trabajo realizado consistió en recopilar parte de la información de campo relevada en los últimos cuarenta años, diferenciando a los grupos de datos por el seguimiento en el tiempo de:

1. *Migración de dunas:* Se cuenta con relevamientos para el seguimiento de la evolución de dunas, con y sin corrección por la presencia de formas superimpuestas en los siguientes períodos:
  - Julio de 1983, durante la crecida extraordinaria de 1982/83. Datos recolectados por el personal del Departamento de Hidrometría del Túnel Subfluvial Hernandarias.
  - Junio de 1992, mes de ocurrencia del pico de la crecida del año 1992. Datos recogidos por el mismo Ente.
  - Mayo de 1998, durante la crecida del mismo año. Datos también recolectados por el Ente del Túnel.
  - Noviembre y diciembre del 2000. Datos propios relevados específicamente para la presente Tesis, disponiendo para ello del equipamiento hidrográfico existente en la FICH.
  
2. *Evolución de trincheras excavadas en el lecho:* Se cuenta con información proveniente de dos trincheras excavadas sobre el eje del Túnel Subfluvial durante los períodos:
  - Diciembre y enero de 1960-61: con datos provenientes de dos fuentes: *a)* Datos de campo levantados con escandallo a lo largo y ancho de la trinchera excavada (posiblemente recolectados por la DNCPyVN, y provistos por el Ente Administrador del Túnel Subfluvial), *b)* datos obtenidos por el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ciencias

Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba, en el cual se desarrollaron ensayos en un canal de riego y un canal vidriado simulando la trinchera excavada en el lecho, respetando las escalas de similitud hidrodinámica.

- Octubre a diciembre de 1992: con datos provenientes del Ente Administrador del Túnel Subfluvial, consistentes en relevamientos del lecho con sonda ecógrafa en una trinchera de prueba excavada en la zona, con anterioridad a la colocación de una manta protectora (Prendes *et al* 1994).

### 3.2.1. Migración de Dunas

El método del SMD es de fácil implementación para la estimación del caudal sólido de fondo en la medida que se dispongan registros de un mismo tren de dunas a distintos tiempos. A los fines de su implementación se contó con información proveniente de distintas fuentes. Desde los estudios preliminares del proyecto de obra del Túnel Subfluvial Hernandarias hasta el presente, el personal del Departamento de Hidrometría del Túnel Subfluvial ha compilado y/o realizado relevamientos periódicos del lecho con el objetivo general de mejorar el conocimiento de la mecánica del sistema aluvial del río Paraná en la zona, particularmente aguas arriba de la traza del Túnel (Figura 1.2). Los datos obtenidos consisten fundamentalmente en levantamientos topográficos del lecho con sonda ecógrafa, y ocasionalmente, tomas de muestras de sedimentos. A partir de la crecida extraordinaria del año 1982/83, se comenzaron a realizar mediciones con mayor periodicidad con el objetivo de prevenir la llegada de grandes dunas que pudieran comprometer la estabilidad de la estructura. Es por ello que los relevamientos de perfiles longitudinales y transversales sobre progresivas preestablecidas, realizados con sonda ecógrafa, conforman la mayor parte de la base de datos del mencionado Departamento. En consecuencia, y entre el amplio espectro de información puesto a disposición para la elaboración de la presente Tesis, y debido a que durante épocas de aguas altas el transporte de sedimentos se incrementa como consecuencia de la gran energía asociada a la onda de crecida, se seleccionaron los datos de tres de las cuatro crecidas más importantes registradas en el río Paraná durante el siglo XX, las de los años 1982/1983, 1992 y 1998<sup>1</sup> (Cuadro 3.1).

#### Migración de Dunas durante crecidas extraordinarias

En general, las crecidas extraordinarias que se registran en el tramo medio del río Paraná se deben preponderantemente a los aportes del Alto Paraná, aguas arriba de Guaira (Brasil). Sin em-

---

<sup>1</sup>Hay indicios que señalan que la crecida de 1905 fue tan importante como la registrada en 1982/83, aunque no se cuenta con registros fehacientes para su análisis.

bargo, los aportes de la cuenca baja del Alto Paraná entre Guaira y Confluencia son las principales causas de inundaciones a lo largo del Paraná Medio e Inferior (Paoli y Cacik 2000). Los altos valores de la desviación de los caudales de la cuenca entre Guaira y Confluencia reflejan el potencial de crecidas menos frecuente aunque extremadamente riesgosos para las poblaciones y asentamientos ribereños (Motor Columbus y Asociados 1979). Las crecidas más importantes y catastróficas del siglo pasado se debieron a varias tormentas máximas ocurridas en distintas áreas de aporte al mismo tiempo, como fueron las crecidas de los años 1905 y 1966. Según el estudio de Motor Columbus y Asociados (1978), en dos de cada tres años ocurren crecidas de proporciones mínimas tales que producen ciertos daños, mientras que la ocurrencia de crecidas que causan daños apreciables es en promedio de una cada diez años. Por lo tanto, de las diez mayores crecidas del siglo XX mostradas en el Cuadro 3.1, las más perjudiciales y con baja probabilidad de ocurrencia se produjeron en la segunda mitad del siglo XX. Entre las crecidas extremas del Cuadro 3.1, se seleccionaron las tres más importantes del siglo para su análisis, en coincidencia con la disponibilidad de registros ecográficos en la zona del Túnel Subfluvial. En la (Figura 3.1) se muestran los hidrogramas de las crecidas de 1982/83, 1992 y 1998, cuyos perfiles batimétricos en la zona del Túnel fueron adoptados para el presente trabajo de Tesis.

El personal del Departamento de Hidrometría del Túnel Subfluvial, preocupado por la estabilidad de la obra ante el paso de estas grandes dunas, realizó relevamientos periódicos de perfiles longitudinales y transversales a la corriente con sonda ecógrafa, ubicando a estos según un sistema de referencia propio de coordenadas  $XY$  (Figura 3.2), donde el sentido de  $X$  es perpendicular al eje del Túnel y su origen se encuentra sobre el mismo eje, con valores positivos aguas arriba y valores negativos aguas abajo del mismo. El sentido  $Y$  es paralelo al eje del Túnel, y tiene su origen en el primer tubo del lado santafesino, creciendo hacia la margen entrerriana. Las mediciones se encuentran registradas sobre fajas de papel, y contienen las profundidades del lecho medidas desde el pelo de agua, en el sentido de la corriente aunque no precisamente siguiendo a una línea de corriente, y en el mismo sentido, desde la progresiva longitudinal  $X$  1000 hasta la -100 y partiendo desde la progresiva transversal  $Y$  1256. El recorrido relevado corresponde a la línea de ubicación histórica del thalweg, elegida por ser el ámbito donde el transporte del material del fondo adquiere mayor magnitud (Toniolo 1999). Los Cuadros 3.2 y 3.3 detallan las campañas realizadas y el estado hidrométrico del río correspondiente a esos días.

Las fajas ecográficas fueron escaneadas, y luego de sucesivos recortes y transformaciones adecuadas sus registros fueron llevados a escala real, sirviendo de guía para su correcta referenciación las distancias a puntos o hitos marcados en el papel. La georeferenciación de los perfiles se real-

izó con respecto a las coordenadas Gauss-Krüger del sistema nacional y con respecto al cero de las cotas del Instituto Geográfico Militar.

### **Crecida 1982-1983**

Durante el año 1983 se registró la mayor crecida del siglo XX (Aisiks 1984), que se caracterizó tanto por la magnitud de sus caudales como por la permanencia en el tiempo<sup>2</sup>. Según Aisiks (1984), el volúmen escurrido desde diciembre de 1982 hasta septiembre de 1983 fue 2,52 veces mayor al volumen medio escurrido en igual período, mientras que las precipitaciones superaron sólo 1,43 veces la media del período [1905,1982]. Este dato indica un estado de total saturación de la Cuenca del Río de La Plata por las abundantes precipitaciones ocurridas durante el año 1982/83, en coincidencia con una de las mayores oscilaciones de El Niño registradas hasta la fecha (TECHINT 1984). Desde el punto de vista hidrosedimentológico, la avenida acarrió un aumento considerable de la capacidad de transporte del flujo, lo que se tradujo en la formación de grandes dunas, cuyas dimensiones superaron largamente las registradas hasta la fecha (Figura 3.3).

### **Crecida de 1992**

La crecida del año hidrológico 1991-1992, según registros tomados aguas abajo de la estación Posadas, fue la segunda más importante del siglo pasado, ya que en esta estación la mayor crecida registrada en el Siglo XX fue la de 1905 (Paoli y Schreider 2000). Durante el mes de junio se registró el pico máximo, con duración menor a un mes (Figura 3.1), por lo que sus efectos no fueron tan graves como los de la crecida anteriormente descripta. Aún así, la magnitud del pico se acercó bastante a la registrada el año 1982/83, llegando a un caudal de  $54000 \text{ m}^3/\text{s}$  para el sistema total cauce principal-planicie aluvial (con una estimación de unos  $31400 \text{ m}^3/\text{s}$  escurriendo en el cauce principal). La crecida de 1992 fue muy importante desde el punto de vista hidrosedimentológico, ya que su energía provocó la formación de grandes dunas que volvieron a comprometer la estabilidad del Túnel Subfluvial.

Los perfiles longitudinales que muestran la magnitud de estas dunas fueron relevados con sonda ecógrafa por el personal del Departamento de Hidrometría del Túnel sobre las progresivas trasversales 1050 a 1600 partiendo desde la progresiva longitudinal 500. En este trabajo se seleccionaron los registros correspondientes a las progresivas 1200, 1250, 1300, 1350 que contienen el mayor tamaño de dunas. Los perfiles analizados fueron relevados siguiendo nuevamente la línea del thalweg, donde se registraron las dunas de mayor amplitud (Figura 3.3). La información relevada por el personal del Túnel fue recuperada y procesada en el Laboratorio de Hidráulica General y Aplicada de la FICH.

---

<sup>2</sup>Mientras las crecidas típicas del Paraná duran de uno a tres meses, la de los años 1982/83 se prolongó durante 10 meses.

Con la misma se generaron trabajos de investigación que lograron un gran aporte al conocimiento de un gran río de llanura como es el Paraná (Amsler y Schreider 1998; Amsler *et al* 2000; Amsler 2003). Los datos y los trabajos publicados forman parte de la información antecedente usada en esta Tesis.

### **Crecida de 1998**

Este evento cobró una magnitud similar al del año 1992, llegando su pico a una descarga aproximada de  $30200\text{ m}^3/\text{s}$  en el cauce principal, con unos  $20500\text{ m}^3/\text{s}$  adicionales escurriendo sobre la planicie de inundación (Paoli y Schreider 2000). Aún así, el comportamiento sedimentológico del lecho durante esta crecida no fue similar al de las anteriores. Además, el Túnel ya disponía por entonces de un manto protector, construido en la zona de thalweg para evitar la erosión ante el paso de grandes dunas. El tamaño de las dunas conformadas no alcanzó el desarrollo de las grandes crecidas anteriores (Figura 3.3). Durante la crecida del año 1998 se relevaron perfiles longitudinales partiendo de varias progresivas, de las que se eligieron para su análisis aquellas que presentaron mayores tamaños de dunas, esto es, progresivas 1200, 1250 y 1300. La Figura 3.3 muestra la ubicación de los datos analizados.

Las fechas de los relevamientos correspondientes a las tres crecidas así como el estado hidrométrico del río se presentan en el Cuadro 3.3.

### **Mediciones realizadas en una zona divergente en planta - convergente en profundidad**

A pesar de la existencia de gran cantidad de información disponible en el Túnel, los relevamientos pre-existentes no muestran los efectos del ensanchamiento que se produce en el cauce inmediatamente aguas abajo del eje del Túnel. Con el objetivo de cuantificar los efectos de esta falta de uniformidad geométrica sobre la estructura del flujo y del transporte de sedimentos, se eligió para su análisis el tramo que parte del eje del Túnel hasta cubrir unos  $1000\text{m}$  aguas abajo. Aunque el área seleccionada no es de considerable extensión, se considera que provee información sobre distintos aspectos de la hidrodinámica del escurrimiento y la dinámica de las formas de fondo. Este tramo posee una importante divergencia del escurrimiento en planta, acompañada por una considerable disminución de tirante hidráulico, o profundidad (Figura 3.4). Debido a ello, el flujo escurre con pendiente adversa de fondo, desde profundidades mayores a menores.

En esta zona se llevaron a cabo tres visitas de campo durante los meses de noviembre y diciembre del año 2000. La primera tuvo como objetivo identificar trayectorias del flujo cerca de la superficie libre de agua. Para ello se realizaron corridas de flotadores ya que éstos, una vez convenientemente lastrados y depositados en posición vertical en el río, se dejan llevar por el flujo evidenciando el

sentido del escurrimiento. Su seguimiento se realizó con la lancha hidrométrica de la FICH, imitando su desplazamiento a la par que se registraban las coordenadas  $x, y$  (Gauss-Krüger) con un Sistema de Posicionamiento Geográfico Satelital, con corrección diferencial a tiempo real (DGPS) utilizando una estación instalada en una de las márgenes. Se registraron y almacenaron en forma digital los datos de coordenadas  $x, y$ , la hora exacta a la que se registró cada punto medido y los valores provistos por la sonda ecógrafa instalada en la embarcación, lo que permitió capturar la profundidad del fondo medida desde el pelo de agua. De esta forma se obtuvieron archivos en formato ASCII con los siguientes datos: posicionamiento  $x, y$  del flotador, hora de medición y profundidad local en cada punto. Estos registros, llevados al plano, mostraron la efectividad de las mediciones al poder captar de la forma esperada la divergencia de las líneas de corriente relevadas (Figura 3.4.a). Se realizaron dos campañas más por medio de las cuales se registraron las profundidades del lecho repitiendo las trayectorias de la primera visita. La información recogida durante las mediciones *in situ* fue depurada, y a las trayectorias relevadas se le filtraron los errores cometidos por derivas de la embarcación (Figura 3.4.b). Al momento del relevamiento, el río Paraná se encontraba en una época de aguas bajas (Figura 3.5.a) por lo que las formas de fondo relevadas no presentaron tamaños significativos, aunque eran claramente identificables. Los datos de altura y caudal correspondientes a los días de las mediciones se muestran en el Cuadro 3.4. La topografía general de la zona relevada, dentro de la que se pueden apreciar las características geométricas del tramo, pudo construirse planteando las cotas del fondo en el plano  $xy$  (Figura 3.5.b)). Luego, con las coordenadas de cada punto y la hora de medición, se calcularon las velocidades del escurrimiento cerca de la superficie libre (Figura 3.6.a) y .b)) a partir del desplazamiento registrado de la corrida de flotadores. Los caudales unitarios pudieron determinarse a lo largo de cada línea de corriente, resultantes del producto entre la velocidad del escurrimiento y la profundidad media local del flujo, entendiéndose por ésta a la profundidad del lecho luego de filtrar las dunas, u ondulaciones de pequeña escala. Las magnitudes de los caudales unitarios distribuidos en planta pueden apreciarse en las Figura 3.6 c) y d). Con los perfiles longitudinales del lecho se pudieron calcular las pendientes medias del tramo, las que resultaron de sentido adverso a la corriente y, en general, dos órdenes de magnitud mayor a la pendiente normal del Paraná. Estas pendientes, por efecto de la divergencia del flujo, varían para cada línea de corriente relevada, disminuyendo desde la margen entrerriana hacia el thalweg (Cuadro 3.5). Sin embargo, puede apreciarse que la pendiente adversa media del lecho,  $S_o$ , mantiene un valor aproximadamente constante igual a  $-10^{-2}$ , entre las líneas 1 y 9.

### 3.2.2. Evolución de trincheras

Si bien las trincheras excavadas en el lecho sobre la traza del Túnel Subfluvial sirvieron para determinar el sobreancho de las excavaciones a realizar para distintas obras, también permitieron estimar descargas de fondo, ya que funcionan como una perfecta trampa de sedimentos (Prendes *et al.* 1994). Para realizar una estimación directa de los caudales sólidos se recogió la información de las trincheras excavadas en los años 1960 y 1992, y se realizaron comparaciones con los datos en canales de laboratorio obtenidos por el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales de la U.N.C. (Urciuolo *et al.* 1965).

A fines del año 1960 fue dragada una trinchera de ensayo en el lecho del río a la altura del emplazamiento del actual eje del Túnel, y a unos pocos metros de la margen santafesina. El llenado progresivo de la trinchera permitiría conocer el sobreancho a diseñar de la zanja que contendría los tubos del Túnel a su cota de diseño, y evitar así inconvenientes durante su colocación por una acumulación no deseada de sedimentos, así como para tomar conocimiento sobre las condiciones de estabilidad del lecho. Luego de los ensayos, en el año 1965, investigadores del Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba (Urciuolo *et al.* 1965), realizaron un estudio más profundo con el mismo objetivo, aunque ensayando en canales de laboratorio. La información aportada por la UNC se suma a la disponible en el Departamento de Hidrometría del Túnel Subfluvial.

Casi dos décadas después de la inauguración del Túnel y ante la necesidad de construir una obra de protección contra la erosión en la zona del thalweg, en el año 1992 se realizaron nuevos estudios sedimentológicos repitiéndose el clásico ensayo de la trinchera de prueba. En esta ocasión, la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas de la UNL participó de los estudios (Amsler *et al.* 1992), realizando los relevamientos con sonda ecógrafa de la evolución de la trinchera. El propósito del estudio era determinar el sobreancho del espacio a excavar con miras a la colocación de un manto protector para evitar la erosión de la tapada de sedimentos requerida para garantizar la estabilidad del Túnel ante el pasaje de grandes dunas (Prendes *et al.* 1994).

El seguimiento de la evolución de esta fosa aportó datos valiosos, ya que se realizó por medio de mediciones periódicas de varios perfiles longitudinales levantados con sonda ecógrafa. Toda la información descripta se encuentra archivada en la base de datos del departamento de Hidrometría del Túnel Subfluvial, puesta a disposición del presente estudio.

### **Trinchera de ensayo del año 1960: Datos de Campo**

En el archivo del Departamento de Hidrometría del Túnel Subfluvial se encuentran planos de los relevamientos realizados luego de la excavación de la trinchera de ensayo, previa a la construcción del Túnel. La información disponible consiste en perfiles del lecho de la zona dragada, longitudinales y transversales a la corriente, relevados durante dos meses en forma cronológica luego del dragado. Los datos se sustentan en planos de papel, habiéndose realizado las mediciones con escandallo y sextante.

La ubicación de la fosa se referenció respecto de un punto fijo localizado sobre la costa santafesina, el que pudo ubicarse en el plano actual gracias al aporte de información de cartografía de la época, ya que esta margen ha experimentado una considerable erosión desde entonces (Figura 3.7.a). El punto fijo, origen de las coordenadas locales utilizadas, se ubicó sobre la proyección del futuro eje del Túnel, y a 30 metros de la línea de margen existente por entonces. En la misma figura también se muestra la delimitación actual del tramo de río, la ubicación de la margen santafesina en el año 1960<sup>3</sup> y el punto fijo de referencia. Con el objetivo de realizar un seguimiento de la evolución morfológica de la trinchera, se llevaron a cabo 4 campañas, consistentes en relevamientos batimétricos de los perfiles longitudinales y transversales, tal como se muestran en la Figura 3.7.a), identificándose con letras del abecedario a los perfiles longitudinales a la corriente y con números romanos a los transversales. Las fechas en las que se realizaron las mediciones y las alturas hidrométricas correspondientes medidas en el Hidrómetro de Puerto Paraná se muestran en el Cuadro 3.6

### **Trinchera de ensayo del año 1960: Datos de Laboratorio**

Los ensayos realizados en el Laboratorio de Hidráulica de la UNC consistieron en simulaciones físicas del comportamiento del escurrimiento al momento de la colocación de los tubos en un canal vidriado de 0,30m de ancho (Urciuolo 1965). La simulación se realizó para un estado hidrológico del Paraná representativo de las condiciones imperantes en el prototipo al momento de los ensayos, habiéndose utilizado para esto ciertos datos medidos en el campo. Estos datos de obtuvieron en tres verticales pertenecientes a una sección transversal al escurrimiento ubicada a 138m aguas arriba del eje del Túnel, de los que resultó un tirante hidráulico de 11,4m, una velocidad máxima de 1,04m/s, una velocidad media promedio de 0,85m/s y una velocidad promedio en el lecho de 0,46m/s, datos característicos de un estado de aguas medias a bajas. Unas pocas muestras de sedimentos

---

<sup>3</sup>La cartografía utilizada fue provista por el Laboratorio de Sedimentología del Departamento de Hidráulica General y Aplicada de la FICH.



permitieron caracterizarlo como *fino sin cohesión* con un diámetro medio de  $0,025\text{cm}$ . Los datos aportados por el informe elevado por la UNC complementaron la información sobre la evolución de la fosa con valores sobre las variables del escurrimiento (tirante y velocidad media, no disponibles a nivel de prototipo). El experimento sobre evolución de la trinchera se repitió en laboratorio siguiendo las características del prototipo, obteniéndose luego de 250 horas de ensayo, las cargas de sedimento aportadas a la zanja excavada. La Figura 3.8 muestra, luego de haber corrido un flujo con las características hidráulicas del prototipo, el terminado de la trinchera excavada en seco (foto superior) y una vez comenzado el ensayo con agua (foto inferior). El avance del frente de sedimento fue presentado en planos para distintos intervalos de tiempo, desde el comienzo del ensayo y hasta su finalización.

### **Trinchera excavada en el año 1992**

La excavación se ubicó sobre el eje del Túnel como se muestra en la Figura 3.7.b. El seguimiento de la evolución de esta segunda fosa se realizó por medio del relevamiento de tres perfiles longitudinales a la corriente con sonda ecógrafa. Al disponer de este práctico instrumento de medición, se pudieron levantar muchos más perfiles que en el caso anterior, y mucho más precisos, capturándose no sólo la evolución de la trinchera sino también la de las formas de fondo presentes al momento de los relevamientos, al igual que la regeneración de nuevas formas en su interior. Las mediciones procesadas corresponden a relevamientos realizados los días indicados en el Cuadro 3.6. Los datos fueron tratados de la misma forma que la información sobre grandes crecidas: las fajas fueron escaneadas, recortadas en tramos de igual escala vertical y longitudinal (el tamaño del recorte en el sentido longitudinal es función de la velocidad de la lancha hidrométrica y en el sentido vertical de la profundidad usada como referencia). De esta manera, los registros fueron adecuadamente normalizados<sup>4</sup>, pegados, digitalizados y georeferenciados con coordenadas Gauss-Krüger y cotas IGM, para finalmente ser transformados a archivos ASCII.

La ubicación de cada progresiva relevada tanto para la trinchera del año 1960 como la del año 1992 se presenta en coordenadas Gauss Krüger en el Cuadro 3.7.

### **3.3. Procesamiento de los Registros Ecográficos**

Los registros de las tres crecidas adoptadas, y disponibles en papel de faja ecógrafa, fueron escaneados a los fines de su digitalización. El proceso de transformación de los datos originales en

---

<sup>4</sup>Por normalización se entiende aquí la referenciación de la información bajo una única escala gráfica =  $d/D$  ( $d$ : distancia en el papel,  $D$ : distancia análoga en campo).

archivos con formato ASCII se basó en la normalización de los registros batimétricos, cuya escala horizontal varía en función a la velocidad de desplazamiento de la embarcación y de la corriente, siendo de esta forma variable a lo largo del perfil relevado. La escala vertical es fija y depende del rango de profundidades del lecho en el día de medición. Para la transformación de los registros con escala variable en la progresiva a escala constante se realizaron los siguientes pasos (Figura 3.9):

- *Recorte de la faja*: Se recortó la faja en tantas partes como los puntos fijos marcados en la faja lo permitieran. En general cada faja fue dividida entre 7 a 12 partes con una longitud aproximada de 50 m cada una.
- *Escalado de los recortes*: Cada uno de los trozos de faja fue convertido de la escala de medición original a una escala 1:1 en horizontal y 1:10 en vertical.
- *Pegado de los recortes*: Una vez normalizados todos los recortes fueron pegados mediante la utilización de un software adecuado, uno a continuación del otro hasta armar el mosaico completo. De ésta forma se reconstruyó cada perfil longitudinal con una escala constante en todas sus progresivas, permitiendo una lectura directa de los datos.
- *Georeferenciación*: Se le asignó a los distintos puntos de la faja valores coordenados, en el sentido horizontal o de la corriente con respecto al sistema de referencias del Túnel, y en el sentido vertical ( $z$ ) con respecto al datum de referencias del Instituto Geográfico Militar (IGM). De este manera, la superficie del lecho, originalmente medida como su distancia desde la superficie libre, pasó a ser una cota georeferenciada con respecto al cero del IGM.
- *Digitalización*: Se realizó la digitalización de las cotas del lecho dándoles coordenadas ( $X, Y$ ) a los puntos ubicados sobre el perfil relevado, y equi-espaciados un incremento  $\Delta X$  que osciló entre 0,80 y 1.0m, según la faja analizada.
- *Exportación de los puntos digitalizados a un archivo con formato ASCII*: Los datos fueron exportados a un archivo con formato ASCII de dos columnas, la primera conteniendo la progresiva de cada punto considerando como origen al eje del Túnel Subfluvial, y la segunda con las cotas del lecho referenciados al sistema IGM, ambos datos en metros.

### 3.4. Sobre la granulometría del cauce del río Paraná

Gaudin (2003) realizó una completa recopilación de la información disponible sobre granulometría del río Paraná en su tramo medio. En dicho informe se citan y describen los análisis de

24 muestras de sedimento de fondo tomadas inmediatamente aguas arriba del emplazamiento del Túnel Subfluvial por investigadores del Laboratorio de Hidráulica de la FICH en el año 1996. Las mediciones revelaron que el material del cauce se encuentra compuesto por arenas finas con un  $d_{50}$  (diámetro correspondiente a la mediana de la curva granulométrica) comprendido entre  $200\mu m$  y  $350\mu m$ . La ubicación de los puntos medidos y las curvas granulométricas correspondientes a éstos puntos se muestran en la Figura 3.10. El Cuadro 3.8 contiene los valores de  $d_{50}$  y los desvíos estándar  $d\sigma$ .

De estas mismas muestras se han obtenido valores de diámetros de partículas del lecho para diversos estudios. Fedele (2000), entre otros, pudo ajustar una fórmula para el pronóstico de celeridad de dunas adoptando valores de  $d_{50}$  comprendidos entre  $200\mu m$  y  $400\mu m$ . Amsler (2003), para ajustar una fórmula de predicción de alturas de dunas, usó valores  $d_{50} = 325\mu m$  medidos en las zonas más profundas. Nótese que el valor promedio obtenido con los  $d_{50}$  presentados en el Cuadro 3.8 es de  $355\mu m$ , si el valor correspondiente al muestreo M17 no se tiene en cuenta.

### 3.5. Conformado de la Base de Datos

Con toda la información descripta se conformó una base de datos compuesta de:

1. Archivos con información sobre seguimiento de dunas en estados de crecida: Se cuenta con 8 archivos correspondientes a la crecida de 1983, 15 correspondientes a la crecida de 1992 y 12 a la de 1998. Los mismos se encuentran estructurados de la siguiente forma:
  - Nombre del archivo: Progresiva-día-mes-año.
  - Extensión: archivo con formato de texto.
  - Cabecera:  $\Delta s$ : incremento espacial de la digitalización.
  - Columna 1: Progresiva respecto del sistema del Túnel (el cero se encuentra sobre el eje del mismo) en metros.
  - Columna 2: Cota del lecho en metros X 10.
2. Archivos con información sobre seguimiento de dunas - Datos propios: Se cuenta con 33 archivos que contienen los datos relevados durante las tres campañas propias. El formato responde al usado para las grandes crecidas.
3. Archivos con información sobre evolución de trincheras de ensayo: Se cuenta con 8 archivos correspondientes a la trinchera de 1960 y 24 correspondientes a la de 1992. Estos archivos

también respetan el formato descrito en el primer ítem.

### 3.6. Cuadros y Figuras

Año	$Q_{MT}$ [ $m^3/s$ ]	$Q_{MC}$ [ $m^3/s$ ]	$H_{PP}$ [ $m$ ]	Fecha	Duración [ $días$ ]	P. ocurrencia %
1904-1905	50100	30100	6.70	15/11 al 11/09	300	0.5
1911-1912	39100	23500	5.65	21/11 al 06/05	167	3.1
1922	38100	22900	5.53	29/01 al 18/07	171	3.5
1928	39200	23500	5.65	07/01 al 05/05	119	3.1
1966-1967	43900	26400	6.16	17/12 al 02/05	137	1.6
<b>1982-1983</b>	<b>60300</b>	<b>31035</b>	<b>6.83</b>	<b>14/12 al 03/09</b>	<b>263</b>	<b>0.3</b>
1990	43900	25000	5.92	12/01 al 18/02	38	2.2
<b>1992</b>	<b>54000</b>	<b>31500</b>	<b>6.89</b>	<b>18/03 al 31/08</b>	<b>166</b>	<b>0.2</b>
1997-1998	41600	25200	5.95	21/12 al 17/03	86	2.1
<b>1998</b>	<b>50600</b>	<b>30200</b>	<b>6.72</b>	<b>04/02 al 19/06</b>	<b>135</b>	<b>0.5</b>

Cuadro 3.1: Las diez crecidas más importantes del río Paraná registradas durante el siglo XX.  $Q_{MT}$  es el caudal máximo estimado escurriendo en la planicie de inundación más el cauce principal,  $Q_{MC}$  es el caudal máximo en el cauce principal,  $H_{PP}$  es la altura hidrométrica en Puerto Paraná y P es la probabilidad de que dicha crecida sea superada. Las crecidas en negritas son las analizadas en la presente Tesis.

Crecida	Progresiva (m)	$X_{GK}$	$Y_{GK}$	Long. tramo relevado [m]
1983	1256	5452314.3	6493218.7	1000
1992	1200	5452304.5	6493269.9	500
y	1250	5452317.6	6493208.9	500
1998	1300	5452324.0	6493158.9	500
	1350	5452335.0	6493084.9	500

Cuadro 3.2: Ubicación geográfica de cada progresiva relevada. Las coordenadas son Gauss Kruger y las progresivas se encuentran referenciadas al sistema coordenado del Túnel.

Crecida	Campaña	Día	$H_{PP}[m]$	Cota del lecho [m]	$\bar{h}[m]$	Caudal [ $m^3/s$ ]
<b>82-83</b>	1	02/7/83	6,78	-8.56	24.94	30700
	2	08/7/83	6,79	-8.35	24.74	30700
	3	16/07/1983	6,40	-8.42	24.42	28000
	4	21/07/1983	6,36	-8.47	24.43	27700
	5	26/07/1983	6,63	-8.28	24.51	29600
	6	28/07/1983	6,71	-8.07	24.38	30100
	7	30/07/1983	6,64	-8.23	24.47	29600
	8	31/07/1983	6,60	-8.47	24.67	29300
<b>1992</b>	1	23/6/92	6,87	-6.26	22.73	31300
	2	25/6/92	6,83	-6.17	22.60	31000
	3	27/6/92	6,67	-6.76	23.03	29800
	4	28/6/92	6,60	-6.84	23.04	29300
<b>1998</b>	1	14/5/98	6,71	-5.55	21.86	30100
	2	19/5/98	6,59	-5.80	21.99	29300
	3	20/5/98	6,50	-5.75	21.85	28600
	4	27/5/98	6,12	-5.70	21.42	26200

Cuadro 3.3: Relevamientos seleccionados para el seguimiento de formas de fondo; información recopilada de las crecidas de los años 1982-1983, 1992 y 1998, registradas por el Dpto. de Hidrometría del Túnel Subfluvial Hernandarias. Las cotas del lecho se encuentran referenciadas al sistema I.G.M.,  $H_{PP}$  es la altura hidrométrica en Puerto Paraná

Campaña	Día	$H_{pp}[m]$	Caudal( $m^3/s$ )
1	17/11/00	3.63	15740
2	16/12/00	3.07	14250
3	28/12/00	2.75	13470

Cuadro 3.4: Campañas realizadas durante el año 2000 para el seguimiento de formas de fondo en un tramo de río con flujo divergente en planta.

Trayectoria Nro.	$\Delta h$	Longitud	$S_o$	$X_{GK}$	$Y_{GK}$
1	-10	1000	$-1e^{-2}$	5452379.7	6492804.5
2	-9	950	$-1e^{-2}$	5452375.8	6492828.6
3	-10	1000	$-1e^{-2}$	5452372.3	6492850.1
4	-9	1000	$-1e^{-2}$	5452367.9	6492878.0
5	-10	1000	$-1e^{-2}$	5452364.5	6492899.1
6	-10	1000	$-1e^{-2}$	5452379.7	6492925.9
7	-9	1000	$-1e^{-2}$	5452355.3	6492950.8
8	-10	1000	$-1e^{-2}$	5452350.8	6492989.9
9	-9	1000	$-1e^{-2}$	5452379.7	6493022.4
10	-6	1000	$-6e^{-3}$	5452379.7	643102.2
11	-7	1000	$-7e^{-3}$	5452379.7	6493270.5

Cuadro 3.5: Pendientes del fondo en la zona que presenta divergencia del flujo en planta. Ubicación del cero respecto del sistema coordenado del Túnel en coordenadas Gauss Kruger.

Año	Campaña	Día	$H_{PP}[m]$	Caudal( $m^3/s$ )
<b>1960</b>	1	13/12/60	3.30	14800
	2	27/12/60	2.65	13200
	3	10/01/61	2.28	12400
	4	23/01/61	2.38	12600
<b>1992</b>	1	09/10/92	3.90	16500
	2	13/10/92	3.93	16600
	3	23/10/92	3.98	16800
	4	27/10/92	4.02	16900
	5	30/10/92	4.06	17000
	6	11/11/92	4.42	18200
	7	16/11/92	4.56	18700
	8	19/11/92	4.64	19000
	9	24/11/92	4.68	19200
	10	01/12/92	4.66	19100
	11	07/12/92	4.64	19000

Cuadro 3.6: Relevamientos para el seguimiento de la evolución de trincheras recopilados de ensayos realizados durante los años 1960 y 1992.

Año	Progresiva	$X_{GK}$	$Y_{GK}$
1960	B	5452282.6	6493909.6
	C	5452291.2	6493359.3
1992	1576	5452382.4	6492797.1
	1553	5452378.5	6492821.9
	1538	5452375.1	6492838.6

Cuadro 3.7: Ubicación de los perfiles relevados sobre las trincheras de ensayo. La ubicación geográfica está dada en coordenadas Gauss Kruger.



Muestra	$d_{50}[\mu m]$	$d\sigma$
M15	250	1.2
M16	280	1.1
M17	640	1.6
M18	240	1.2
M19	380	1.7
M20	440	1.3
M21	430	1.2
M22	420	1.6
M23	400	1.2

Cuadro 3.8: Valores sedimentológicos correspondientes a las muestras de material del fondo tomadas en la zona del Túnel Subfluvial en el año 1996 por la FICH.

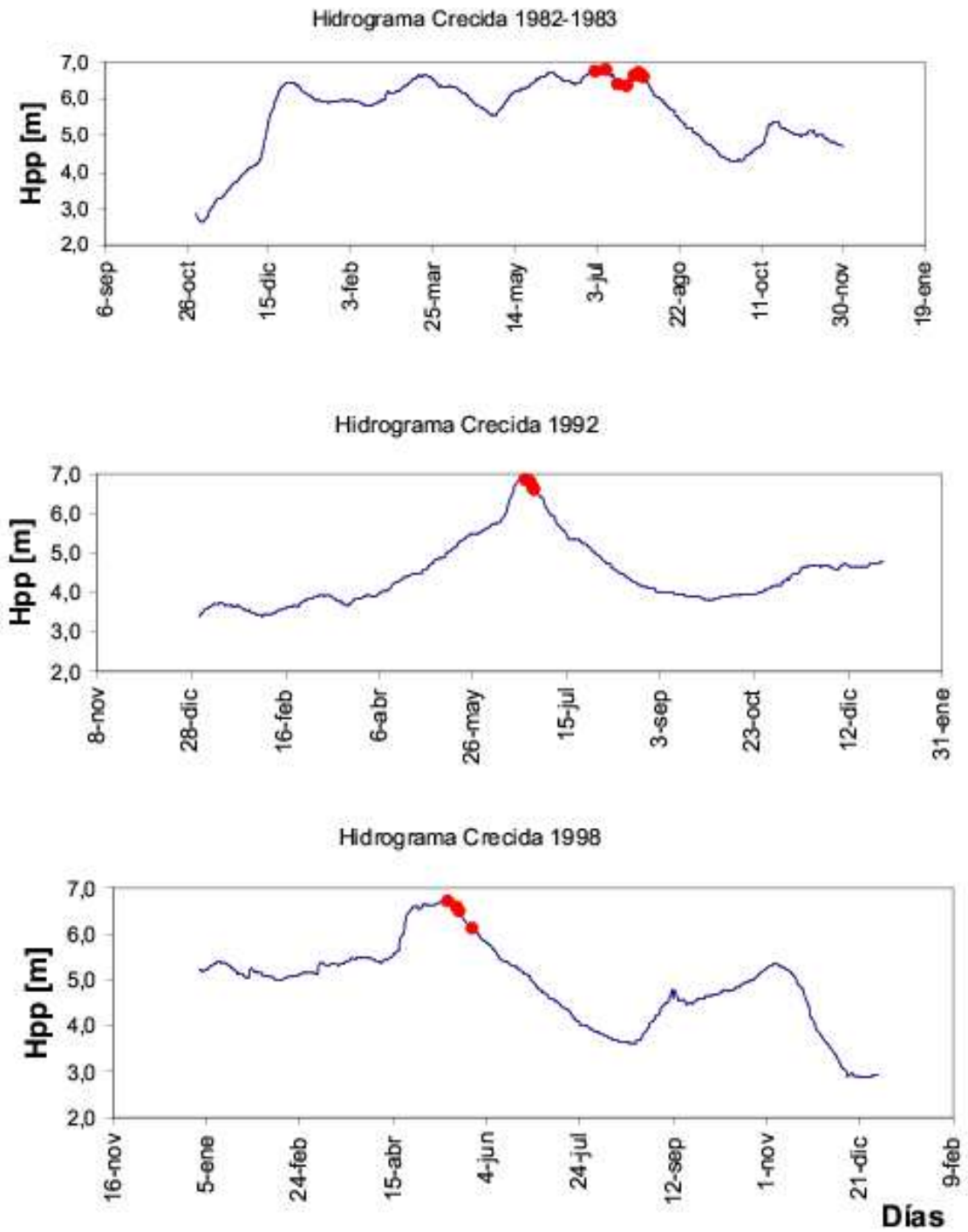


Figura 3.1: Niveles hidrométricos diarios en [m] registrados durante las tres crecidas analizadas. Los puntos rojos corresponden a los días relevados.

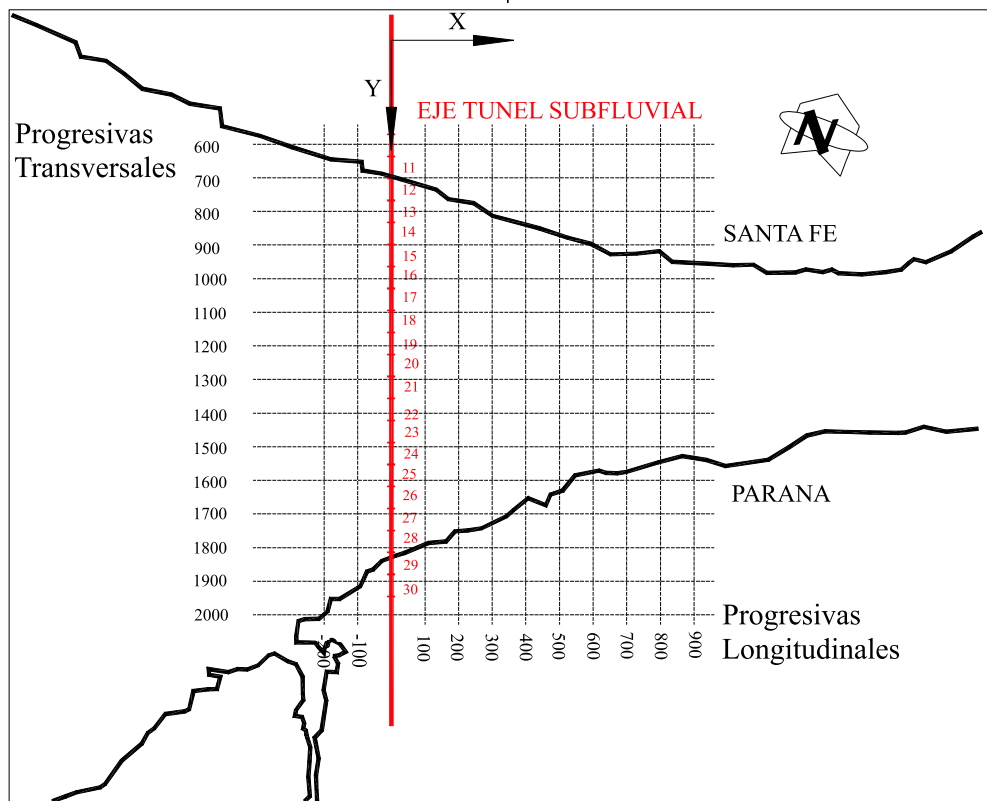
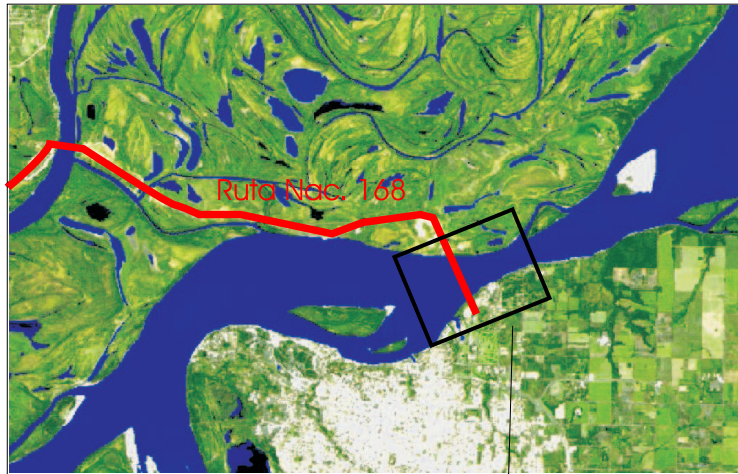
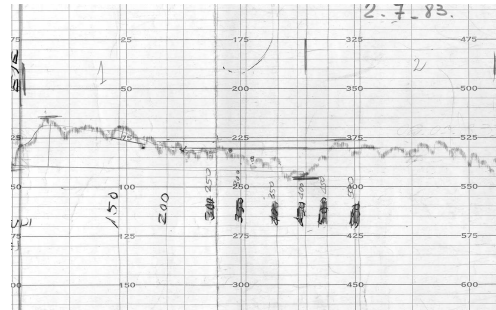
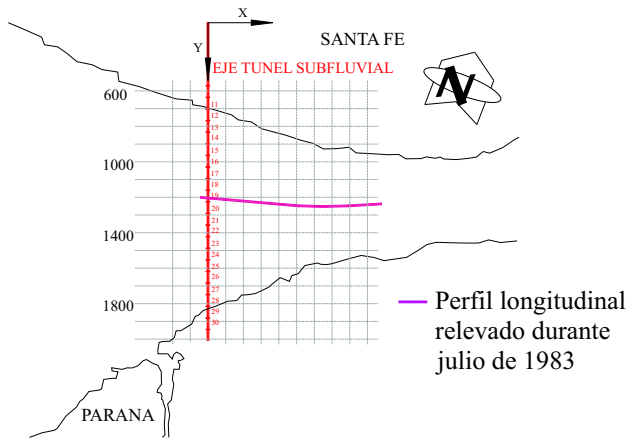
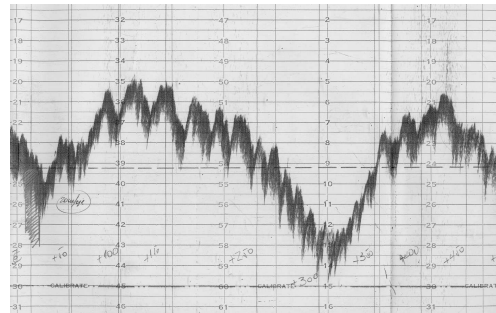
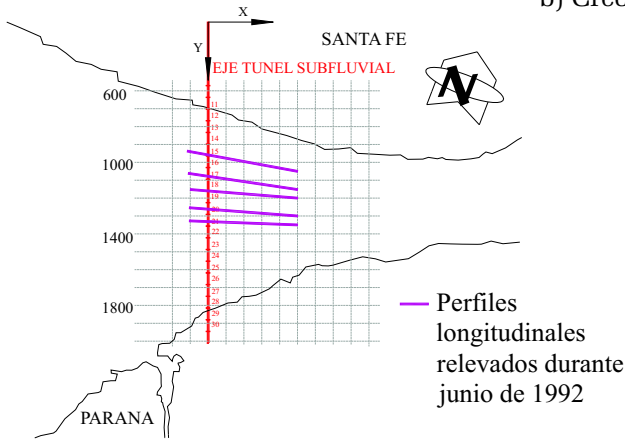


Figura 3.2: Sistema de referencia implementado por el personal del Túnel Subfluvial.

a) Crecida del '82-'83



b) Crecida de 1992



c) Crecida de 1998

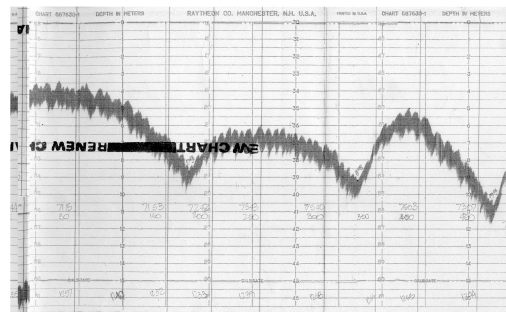
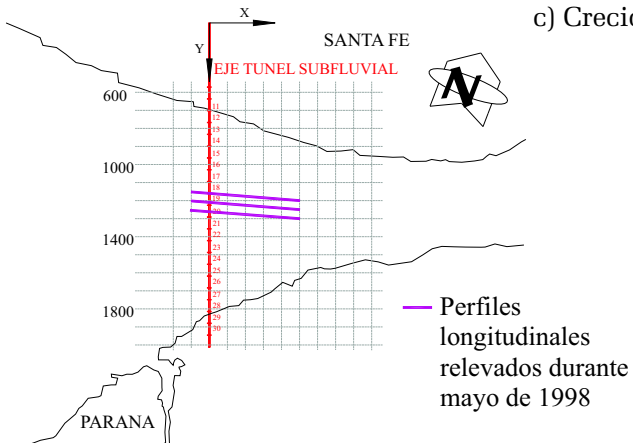


Figura 3.3: Ubicación de los distintos perfiles longitudinales relevados y muestra de un registro de dunas tipo para cada crecida levantado con sonda ecógrafa durante los tres eventos analizados.

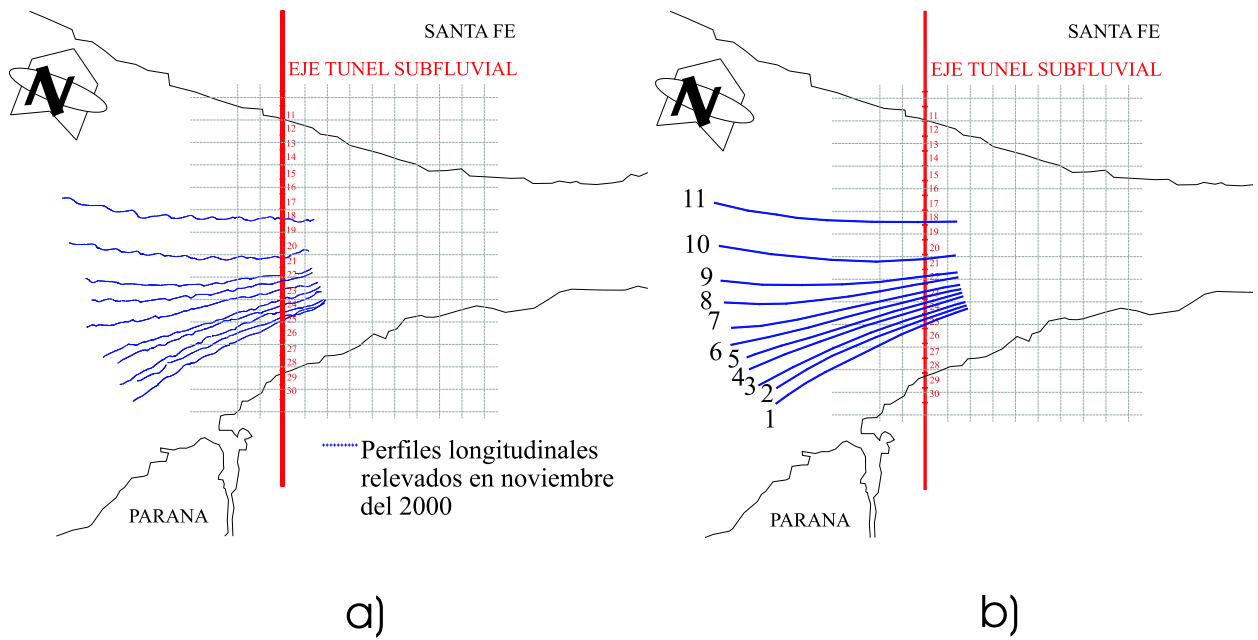


Figura 3.4: a) Trayectorias de las líneas de corriente relevadas; b) Trayectorias depuradas

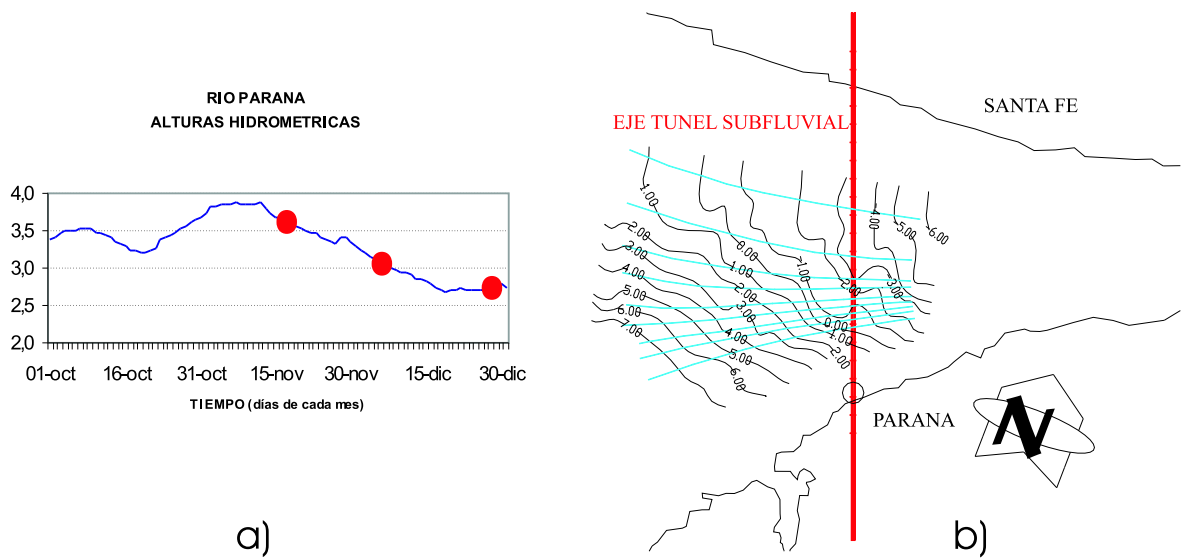


Figura 3.5: a) Niveles hidrométricos medidos en Puerto Paraná durante los meses de octubre a diciembre del 2000. Con puntos rojos se indica la altura hidrométrica correspondiente a las fechas de los relevamientos; b) Topografía del fondo (relevada).

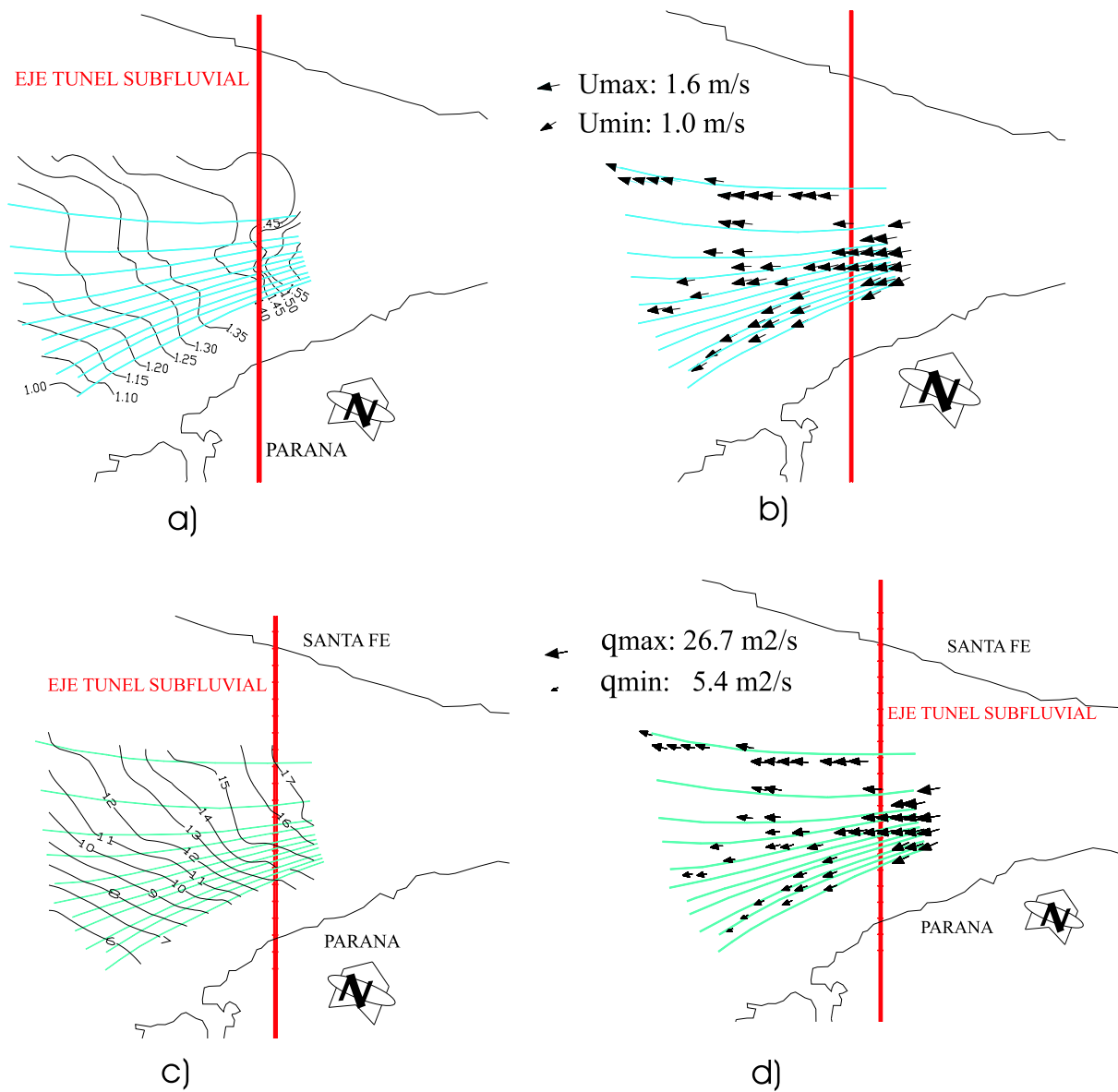
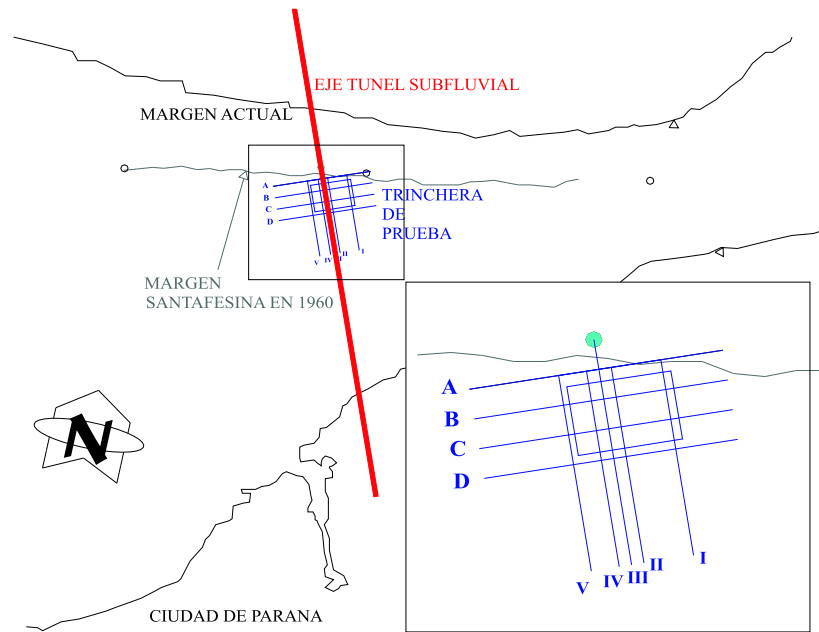
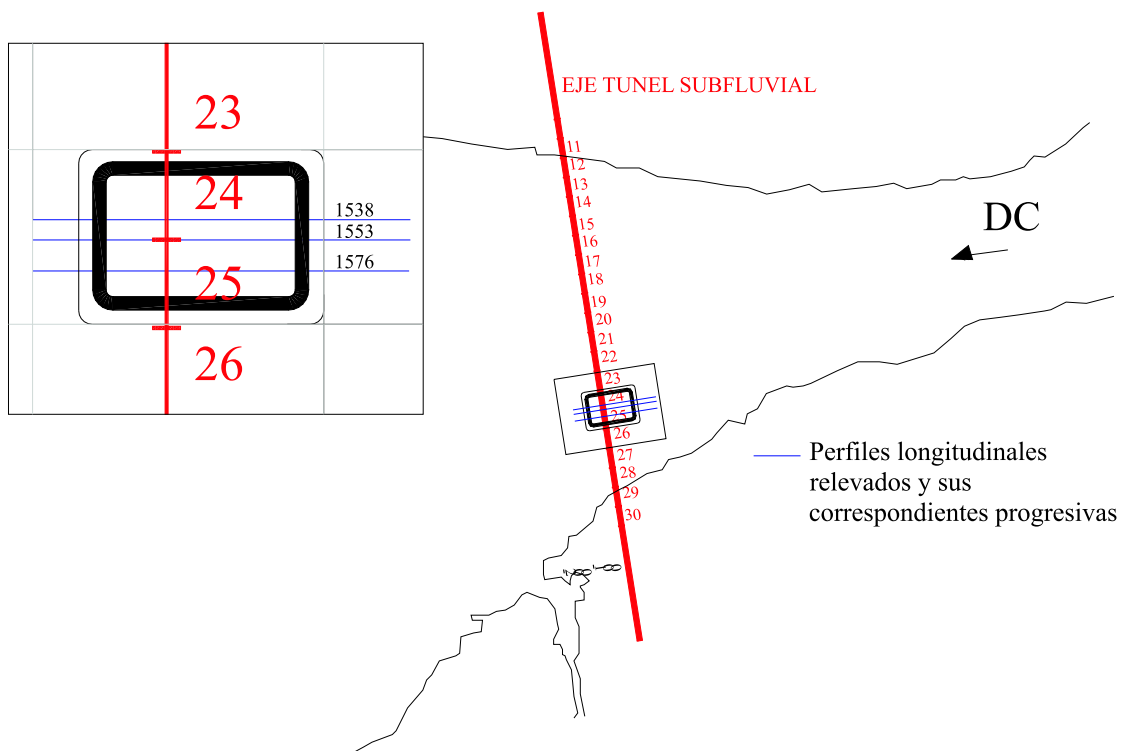


Figura 3.6: Isocurvas y campo vectorial de las velocidades del flujo (a y b). Isocurvas y campo vectorial de los caudales unitarios (c y d)



a)



b)

Figura 3.7: Ubicación de las trincheras dragadas en los años 1960(a) y 1992(b) y disposición de los perfiles relevados.



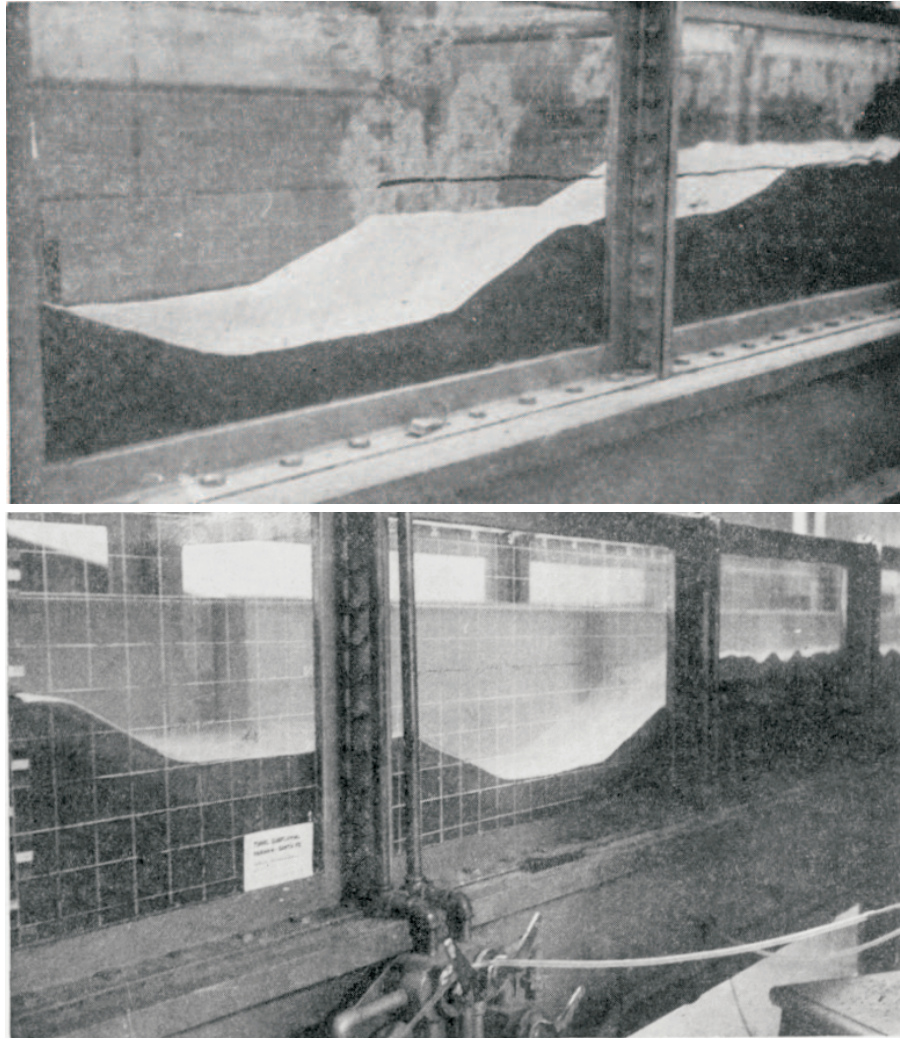
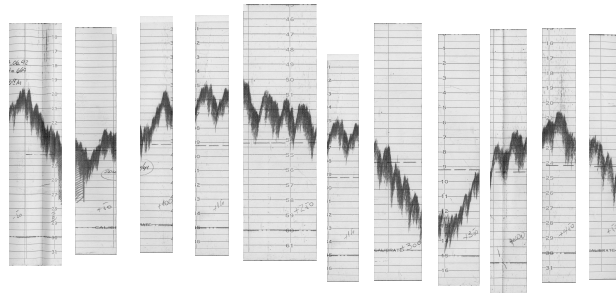
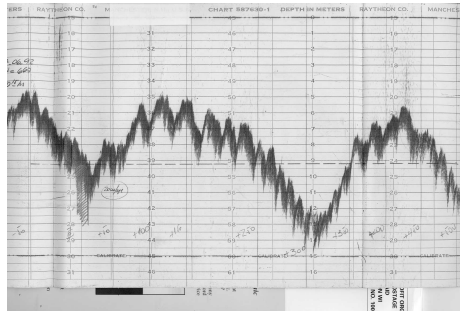


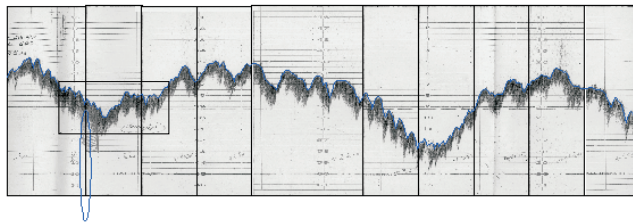
Figura 3.8: Trinchera excavada en el canal del Laboratorio de hidráulica de la UNC (arriba). Flujo sobre la misma trinchera (abajo) (Urciuolo 1965)



Faja original  
escaneada

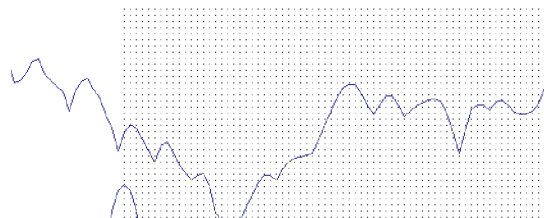


Faja recortada  
aproximada-  
mente cada  
50m de  
recorrido de la  
lancha.



Mosaicos  
escalados 1:1  
en horizontal y 1: 10  
en vertical,  
pegados y  
digitalizados.

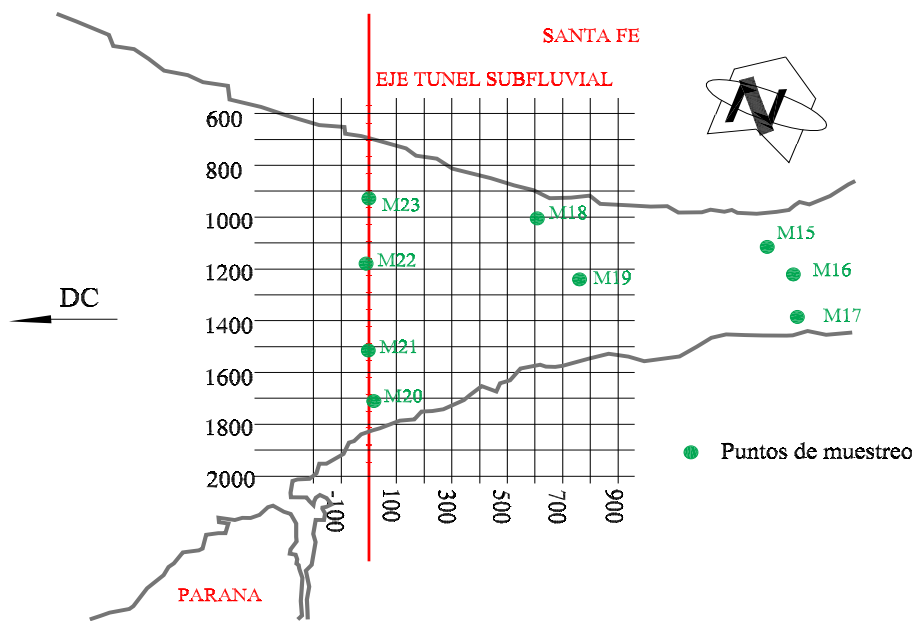
Detalle de la grilla  
utilizada para la  
digitalización



-4.0000	-6.6600
-3.0000	-6.9500
-2.0000	-7.1600
-1.0000	-7.5200
0	-7.2300
1.0000	-7.1000
2.0000	-7.1600
3.0000	-7.3400
4.0000	-7.5200
5.0000	-7.7100
6.0000	-7.4400
7.0000	-7.3800
8.0000	-7.5400
9.0000	-7.7600
10.0000	-7.8700

Detalle del archivo en formato de texto  
compuesto por dos columnas: progresiva en  
metros y cota del lecho en metros  
referenciadas al sistema del Instituto  
Geográfico Militar.

Figura 3.9: Pasos seguidos para el escalado y digitalizado de los perfiles longitudinales.



CURVAS GRANULOMETRICAS DEL RIO PARANA  
MUESTRAS 15-16-17-18-19-20-21-22-23

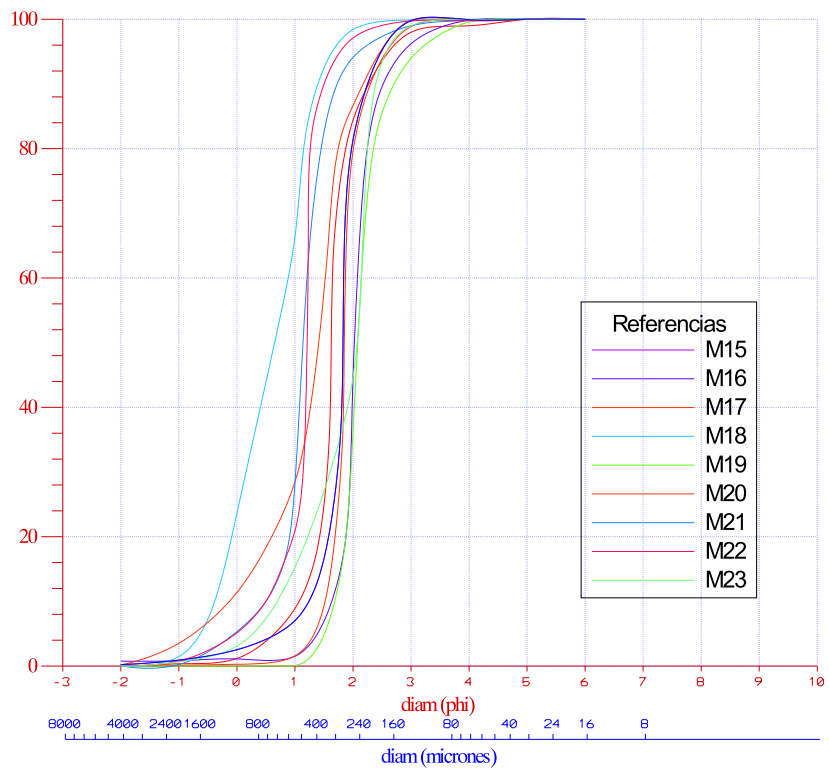


Figura 3.10: Arriba: Ubicación de los puntos donde se tomaron las muestras de sedimento de fondo tenidas en cuenta en el presente trabajo. Abajo: Curvas granulométricas de las muestras.

## Capítulo 4

# Estimación de $q_B$ por SMD para eventos de crecida

En el Capítulo 2 se presentó sucintamente el marco teórico asumido en la presente Tesis para el análisis de los datos recolectados. Asimismo, en el Capítulo 3 se sintetizó la información disponible del río Paraná sobre el transporte de sedimentos por desplazamiento de las formas de fondo en situación de aguas altas (crecidas excepcionales), y de aguas medias y bajas (trincheras experimentales y campañas realizadas por la tesista en el 2000) . Por tanto, este Capítulo presenta los resultados de la implementación de la metodología adoptada para el análisis de los datos en situación de aguas altas, analizando ciertos aspectos que sin ser relevantes para la implementación del método, influyen en el cómputo final del transporte de fondo. Los resultados se presentan finalmente en tablas de sencilla lectura.

### 4.1. Resumen teórico y su aplicación a los datos de campo

Como se vio en el Capítulo 2, el Método SMD clásico asume que el perfil típico de una duna es esencialmente asimétrico, con una pendiente de su cara de avance que puede formar un ángulo con el lecho cercano al ángulo de reposo del material sumergido que conforma la duna, mientras que la cara de aguas arriba se caracteriza por presentar una pendiente muy suave atrapando una fracción del material que se encuentra suspendido. Por lo tanto, el método asume implícitamente que existe una zona de separación aguas abajo de la cresta, y luego, el material es puesto nuevamente en suspensión en la zona de reenganche del flujo para luego ser transportado aguas abajo dando inicio a un nuevo ciclo.

Como el modelo SMD lo describe, para su aplicación es necesario contar con suficientes registros

del lecho de los que se puedan obtener las celeridades y amplitudes medias de las dunas, las que a su vez, tienen una naturaleza estocástica (Parker 2000). Teniendo estos registros y asumiendo que pertenecen a un tramo de río de geometría y flujo uniforme, la aplicación del método arroja una magnitud media del transporte de fondo imperante en el tramo. Por lo tanto, los valores significativos de las variables estimadas son sus promedios estadísticos. Es así que se propone una aproximación estadística para procesar los datos, a los fines de obtener promedios robustos y representativos del proceso observado en el tramo del río. El uso de las Transformadas de Fourier, conceptualmente descrito en el Capítulo 2, se aplica para obtener un valor medio de la longitud y amplitud de las dunas mientras que un análisis estadístico de frecuencias permite estimar las amplitudes medias de las dunas. Por último, como ya se mencionó, y con independencia de la influencia de la geometría que exhiben en planta los tubos de corriente, existen dos aspectos que se encuentran presentes en los datos del Río Paraná:

1. Una característica dominante en las grandes dunas o dunas de  $O(1)$  es la persistente presencia de pequeñas dunas, o dunas de  $O(2)$ , migrando por encima de las grandes dunas.
2. Las dunas de  $O(1)$  pueden exhibir una pendiente de su cara de avance tan suave que hace imposible suponer la existencia de una zona de separación del flujo.

## 4.2. Estimación de $q_B$ mediante el SMD de Formas de Fondo Periódicas Simples.

Como se ha visto en los Capítulos previos, debido al principio de conservación del sedimento y luego de asumir que las dunas migran preservando entonces su forma ( $z = z(x - c_B t)$ ), la tasa media de transporte de fondo [ $L^2 T^{-1}$ ] puede estimarse con la ec. (2.41). Para aplicar esta ecuación es necesario contar con varios perfiles longitudinales del lecho que contengan trenes de dunas identificables en sucesivos intervalos de tiempo y, preferentemente, bajo similares condiciones del flujo. Los parámetros  $n = (1 - p)$ ,  $\sigma$ , y las variables  $c_B$  y  $\Lambda$  del modelo matemático adoptado, pueden obtenerse como se detalla a continuación.

### 4.2.1. Porosidad del material $p$ y factor de forma $\sigma$ :

El valor adoptado para la porosidad es  $p = 0.4$ , valor habitualmente usado para las arenas del río Paraná en el tramo seleccionado (Lima *et. al.* 1990). El coeficiente de forma  $\sigma$  se toma como  $\cong 0.66$ , el cual ha sido estimado por Stuckrath (1969) luego de realizar un análisis geométrico de

las dunas del Paraná en la zona de Villa Urquiza. Stuckrath (1969) encontró que la forma general de las dunas es de una parábola y no de un triángulo, ajustando el coeficiente 0.66, valor utilizado en trabajos posteriores por Drago y Amsler (1988) y Lima *et. al.* (1990). En el presente trabajo se verificó la pertinencia de dicho valor mediante el cómputo de las áreas.

#### 4.2.2. Estimación directa de $c_B$ y $\Lambda$

Las variables  $c_B$  y  $\Lambda$  pueden estimarse directamente de los registros digitalizados, siendo  $\Lambda$  la amplitud de la duna considerada como la distancia entre el punto mas alto de la cresta y la línea que une los valles de dunas sucesivas. La celeridad resulta de medir el desplazamiento sufrido por cada una de las dunas identificadas en los registros y el tiempo transcurrido entre cada relevamiento. Si  $\Delta s$  es el desplazamiento medido, entonces  $c_B = \Delta s / \Delta t$ , donde  $\Delta t = t_2 - t_1$ , siendo  $t_1$  el tiempo de medición del registro 1 y  $t_2$  el tiempo de medición del registro 2 (Figura 4.1). Cabe mencionar que además de los datos requeridos por el modelo matemático adoptado, se midieron pendiente de la cara de avance y longitud de las dunas.

#### 4.2.3. Estimación de $q_B$

Los resultados obtenidos luego de analizar las series visualizadas en las Figuras 4.1, 4.2 y 4.3 se presentan tabulados para las distintas progresivas (ver Cuadros 4.1 y 4.2). La organización de la información es la siguiente: las cinco primeras columnas presentan las variables hidrodinámicas que definen el estado hidrológico del río: la cota de la superficie libre,  $C_{SL}$ , calculada como la suma de la lectura hidrométrica en Puerto Paraná más la cota IGM del cero de la escala [m], el caudal volumétrico  $Q$  [ $m^3/s$ ], estimado en la sección transversal del cauce principal ubicada sobre la progresiva en la que se encuentra la escala hidrométrica del Puerto Paraná, la profundidad local  $h$  [m] del cauce medida de los registros ecográficos del lecho, la velocidad media local  $u$  en [ $m/s$ ] estimada por medio de simulación numérica con el código RMA2 (Tassi 2001) y el caudal unitario  $q$  [ $m^2/s$ ] obtenido como el producto entre la profundidad  $h$  y la velocidad  $u$  en [ $m/s$ ]. Cabe aclarar que para la estimación de los datos hidrométricos se usaron valores provistos por el Puerto de Paraná, considerándose que los mismos no presentan desviaciones apreciables puesto que la escala se encuentra ubicada a sólo 1120 m aguas abajo del eje del Túnel. Por otra parte, y debido a que no se contó con registros de mediciones de velocidad, se realizó una simulación numérica que cubrió los estados hidrológicos de las tres crecidas analizadas. adoptando el modelo matemático de aguas poco profundas implementado por Tassi (2001) en el tramo. La simulación se realizó con el código RMA2 que resuelve en forma numérica las ecuaciones del flujo 2.1 y 2.2 por

el método de los elementos finitos.

Las cinco columnas que siguen incluyen los datos sedimentológicos de interés: la amplitud media de dunas del registro  $\Lambda$  en [m], la celeridad media de dunas del registro  $c_B$  en [m/día], el caudal sólido de fondo medio del registro  $q_B$  estimado por el SMD en [ $m^2/dia$ ], la celeridad adimensional  $c = c_B/u$  y el parámetro adimensional de transporte (Marti 1998),

$$\epsilon = \frac{1}{(1-p)} \frac{q_B}{q}$$

En el Anexo *Datos para la estimación de  $q_B$  por el método SMD* se encuentran las determinaciones realizadas para cada uno de los registros. En estos Cuadros, las dunas analizadas para cada crecida y para cada progresiva se identifican con números romanos, y la información se encuentra tabulada de la siguiente forma: longitud  $\lambda$  y amplitud  $\Lambda$  de cada una de las dunas registradas [m], desplazamientos sufridos entre cada intervalo de tiempo  $\Delta s$  en [m], celeridades de cada una de las dunas  $c_B$  en [m/día] y profundidad media del lecho a la altura de cada duna en [m], estimada como la profundidad del lecho sin dunas. Toda esta información se encuentra en los Cuadros 9.1 a 9.7.

En el perfil correspondiente a la progresiva 1300 para la crecida del año 1998, a pesar del significativo caudal líquido escurriendo por el cauce, se registraron pequeñas dunas solamente sin la presencia de formas mayores (Figura 4.3). En este caso cabría estimar  $q_B$  por el seguimiento de éstas pequeñas formas, aunque por su tamaño y debido a la escasa periodicidad de las mediciones, no fue posible estimar las celeridades. Por estas razones el perfil fue descartado para su procesamiento.

### 4.3. Estimación de $q_B$ mediante el SMD de Formas de Fondo Compuestas ( $= O(1) + O(2)$ ).

Como se vio en el Capítulo 2, el método SMD clásico es aplicable en caso que exista separación del flujo en la zona del frente de avance de la duna, por lo que el material depositado en la zona de recirculación es el que posteriormente genera el avance de la duna.

No obstante, cuando el perfil longitudinal del lecho se caracteriza por presentar una amplia jerarquía de formas, es necesario evaluar cuál de ellas realiza un aporte significativo al gasto sólido del tramo. En el caso particular del río Paraná, donde se encuentran las formas jerarquizadas en grandes dunas con dunas más pequeñas que se desplazan sobre ellas, es necesario evaluar de que manera estas dos jerarquías de formas aportan al gasto sólido. A estos fines se cita nuevamente la clasificación de formas presentada en el Capítulo 2 (Fig. 2.7). La forma tipo  $a$  representa una duna de gran tamaño sobre la cual se desplazan dunas pequeñas que, cuando llegan a la zona de

la cresta y debido al empinamiento presente en la cara de avance de la duna grande, vuelcan todo el material que transportan contribuyendo así al avance de la duna grande. Por esta razón es que ante la presencia de dunas del tipo  $a$  la aplicación del SMD a sólo las dunas de  $\mathcal{O}(1)$  es suficiente.

En cambio, cuando la pendiente del frente de avance de la duna grande es tan suave que permite que las pequeñas dunas que avanzan por el talud de aguas arriba de la duna grande se desplacen por su talud de aguas abajo, entonces ésta duna se clasifica como tipo  $b$ . Aquí se encuentra que las pequeñas dunas no siempre contribuyen con el avance de las dunas grandes, por lo tanto el transporte de material que ellas realizan debe sumarse al de ésta, aplicando aquí el SMD propuesto por Amsler y Gaudn (1994) y por Sidorchuck (1990).

A continuación se analizan en forma separada las distintas jerarquías de dunas presentes en los registros, se clasifican las dunas en función de su forma y se aplica el método de Sidorchuck modificado sólo en aquellos casos en que las formas son del tipo  $b$ , lo que es equivalente a decir que se aplica cuando las dunas grandes presentan dunas pequeñas en su frente de avance.

#### **4.3.1. Orden de Jerarquía de las dunas registradas.**

Como se mencionó en la introducción de este Capítulo, el lecho del río Paraná presenta por lo general una superposición de formas de fondo de variada geometría, la que puede observarse en los registros seleccionados para las grandes crecidas. Por tanto, se dice que los registros poseen dunas grandes, o de  $\mathcal{O}(1)$ , y dunas pequeñas o de  $\mathcal{O}(2)$ .

Para el presente análisis es necesario distinguir entonces las variables del modelo adoptado para cada orden de dunas con el subíndice 1 o 2. Las variables a estimar son  $\Lambda_1$  y  $\Lambda_2$ , las amplitudes de las dunas de orden 1 y 2, respectivamente,  $c_{B1}$  la celeridad de las dunas de orden 1 y  $c_{B2/1}$  la celeridad de las dunas de orden 2 relativa a las dunas de  $\mathcal{O}(1)$ . Con respecto al análisis anterior se tiene  $c_B = c_{B1}$  y  $\Lambda = \Lambda_1$ , mientras que los parámetros  $p$  y  $\sigma$  se consideran iguales a los ya adoptados.

#### **4.3.2. Separación por componentes de Fourier.**

Los datos digitalizados de los registros de dunas fueron preparados a los fines de realizar un análisis espectral que presente la menor cantidad de ruido posible. Debido a que en las mediciones se observa que la pendiente del fondo crece progresivamente, el método incluye la tendencia en forma automática distorsionando el espectro. Para evitar este problema se procedió a remover la pendiente del fondo llevando a los trenes de dunas a apoyarse sobre la recta horizontal con cota cero, o en otras palabras, la pendiente general fue filtrada y desplazada de tal manera de hacer nula

a la media aritmética de las cotas del fondo.

Los datos digitalizados para el análisis presentan un incremento espacial constante. Siendo el objetivo la separación de los distintos órdenes de dunas registrados ( $\mathcal{O}(1)$  y  $\mathcal{O}(2)$ ) se implementó el método de Transformadas Rápidas de Fourier, que considera a la serie de datos como a la muestra de una población de extensión infinita. Se realizó el filtrado en el espacio de las frecuencias y la separación de las dos amplitudes predominantes de dunas con la información proveniente de las progresivas relevadas durante las tres crecidas extraordinarias, aplicando la metodología descrita en el punto 2.2.2.

Del filtrado se obtuvieron dos series de datos para cada crecida, una conteniendo las dunas de  $\mathcal{O}(1)$ , y otra conteniendo las dunas de  $\mathcal{O}(2)$ . La visualización de los resultados obtenidos contrastadas con el archivo original se ilustra en la Figura 4.4 para la crecida de 1983, en la Figura 4.5 para la crecida de 1992 y en la Figura 4.6 para la crecida de 1998.

### 4.3.3. Análisis visual de la superposición de formas en la cara de avance de las grandes dunas.

Paralelamente, se realizó una inspección visual de los registros para determinar la ocurrencia -o no- de dunas de  $\mathcal{O}(2)$  superpuestas a las de  $\mathcal{O}(1)$  en su frente de avance. La medición del ángulo del frente de avance de las dunas sirve para clasificar a las dunas en tipos  $a$  y  $b$ , según lo expuesto en el punto 2.2.2. y la Figura 2.7.

En los Cuadros 4.3 y 4.4 se contabilizan aquellas dunas que, acorde a la detección visual, poseen superposición, y aquellas que no registran tal condición. Se presenta el ángulo del frente de avance para cada una de estas dunas medido directamente sobre la serie original y sobre la serie filtrada. A los mismos se le adicionó el peralte de las grandes duna  $\Lambda/\lambda$ . En los Cuadros, el \* indica que las dunas se encuentran influenciadas por la presencia del Túnel semidestapado.

Las observaciones realizadas sobre los registros originales indica que existe un rango del ángulo de la cara del frente de avance que permite clasificar a las dunas en tipos  $a$  y  $b$ , a saber:

- Para ángulos menores a  $4^\circ$  existe superposición en el frente de avance, o sea que las dunas son del tipo  $b$ .
- Para ángulos mayores a  $5^\circ$  no existe superposición, clasificándose entonces a las dunas como del tipo  $a$ .
- Para ángulos entre  $4^\circ$  y  $5^\circ$  puede o no haber superposición.



Relacionando los ángulos del frente de avance con la forma de la duna, representada ésta por su peralte  $\Lambda/\lambda$ , se observa que dentro del rango de indefinición, las dunas con ángulos cercanos a  $4^\circ$  que no poseen superposición presentan un bajo peralte, tomando como referencia el valor del peralte medio medido entre las tres crecidas 0.021, mientras que las dunas que poseen superposición con un ángulo cercano a  $5^\circ$  presentan, en general, un valor del peralte mayor o igual al medio.

En los registros se presenta un caso en el que ésta clasificación no es válida, y es el de la Duna IV de la crecida del año 1998 en la progresiva 1250 para los días 19 y 20. Esta duna presenta una forma distinta a la generalidad y tiene un valor del peralte mucho mayor al medio de las series, de 0.034 y 0.037.

Si se comparan los ángulos medidos con la serie original y con la filtrada, se observa que no existe demasiada coherencia entre ellos. Con esta comparación se puede concluir que es más apropiado medir el ángulo de las series originales. La Figura 4.7 permite entender la diferencia existente entre los ángulos de ambas series, aquí la pendiente de la cara del frente de las dunas filtradas indica que se encuentran demasiado suavizadas.

#### 4.3.4. Estimación de $\Lambda$ por métodos estadísticos

A los fines de agilizar el cálculo de  $q_B$ , se implementó un método estadístico que permitió estimar la amplitud de onda de las dunas en forma automática, evitando así el tedioso proceso de una estimación directa duna por duna. Las metodologías seleccionadas fueron:

- Análisis del histograma de frecuencias (van der Mark *et al* 2005)
- Análisis del espectro de frecuencias de Fourier.

A diferencia del trabajo realizado por van der Mark *et al* (2005), quienes realizan el análisis de frecuencia a *la serie de amplitudes* estimadas en forma manual (duna por duna), aquí se implementó un análisis de frecuencias de *la serie original* (la ordenada de cada punto digitalizado) detectando el rango de amplitudes extremas. A estos fines se postula que la frecuencia correspondiente a las ordenadas representativas de los picos y valles de dunas serán menores o iguales a la mitad de la frecuencia mayor, correspondiente a las ordenadas intermedias a los puntos de interés. Bajo esta hipótesis se postuló tomar como valor medio de la amplitud de dunas al doble del promedio del valor absoluto de las amplitudes contenidas en los intervalos de valores extremos, tanto en los valles (valores negativos) como en las crestas (valores positivos). De ésta forma se obtuvo un valor estimado de amplitud media de duna para cada serie analizada.

Por otra parte, los espectros de frecuencias de Fourier, proveen una estimación directa de las amplitudes de las dunas dominantes para las series de  $\mathcal{O}(1)$  y  $\mathcal{O}(2)$ . El doble de dicho valor sería el valor estimado de la altura de la duna.

Se realizaron los histogramas de frecuencias de las series de dunas originales, de  $\mathcal{O}(1)$  y de  $\mathcal{O}(2)$ , los que se grafican en las Figuras 4.8, 4.9 y 4.10. El doble del valor resultante de este análisis corresponde a la altura media estimada. Los espectros obtenidos con la transformada Rápida de Fourier permiten extraer en forma directa las mayores amplitudes de dunas de  $\mathcal{O}(1)$  y  $\mathcal{O}(2)$ , los que también deben duplicarse debido a que las series se encuentran normalizadas. La Figura 4.11 muestra los espectros medios, de las dunas de  $\mathcal{O}(1)$  y las de  $\mathcal{O}(2)$ , para cada progresiva relevada . Las estimaciones realizadas con ambos métodos fueron contrastadas con los valores de amplitudes medidos en la serie original y en las series filtradas. La Figura 4.12 muestra los valores estimados con cada método, mostrando una mejor respuesta del análisis por histogramas de frecuencias.

#### 4.3.5. Estimación de $q_B$

A los fines de aplicar esta metodología, es necesario tener en cuenta la diferenciación realizada sobre el ángulo del frente de avance de las grandes dunas. De este modo, se puede distinguir a las formas de fondo complejas que responden a la aplicación de las fórmulas de Sidorchuck (Figura 2.7.b) de aquellas para las cuales es válida la ec. (2.41)(Figura 2.7.a). Los perfiles analizados presentan dunas que al comienzo de las mediciones responden a una geometría tipo  $a$  y luego cambian a una forma tipo  $b$ , así como hay dunas del tipo  $b$  que se transforman al tipo  $a$  aguas abajo, lo que indica que debe considerarse lo siguiente:

- Las grandes dunas del Paraná no siempre cumplen con la hipótesis de preservación de la forma, hipótesis que sustenta la ec. (2.41). Por lo contrario, la hipótesis se verifica sólo en pequeños tramos del cauce.
- La presencia de geometrías complejas con cambios de forma del tipo  $a$  al  $b$  y viceversa (Figuras 2.7.a y .b), no permite recomendar una expresión óptima para la estimación de los caudales sólidos de fondo por seguimiento de dunas, ya que sólo en el tipo  $b$  debe agregarse el transporte debido a las dunas superpuestas a aquellas de orden mayor. Por lo tanto, este método siempre depende de la disponibilidad de observaciones en cantidad y calidad suficientes.

En el presente trabajo se planteó la aplicación del SMD con diferenciación de jerarquías de formas a todos los registros en los que, gracias a la separación de componentes de Fourier, se pudieron identificar y seguir las dunas de  $\mathcal{O}(2)$ , para la estimación del gasto sólido que ellas producen

y se adiciona al de las grandes dunas para así conformar el gasto sólido total en el caso de dunas de tipo  $b$ .

En el caso de aquellas progresivas que presentaron dunas de tipo  $a$  y de tipo  $b$  a la vez, se calculó el  $q_{Bt}$  de la duna tipo  $a$  con el SMD y el  $q_{Bt}$  de la duna tipo  $b$  con el método de Sidorchuck modificado, para lo cual se introdujeron las siguientes simplificaciones:

1. Si bien la información disponible es detallada en cuanto a su distribución espacial, no ocurre lo mismo con su distribución temporal, resultando engorrosa la determinación del coeficiente de forma variable, por lo que se adopta el coeficiente de forma constante = 0,66, implementado en el punto 4.2.1, reemplazando en la expresión  $\sigma_1^*$  y  $\sigma_2^*$  por  $\sigma$ .
2. Los subíndices que indican el orden jerárquico de las formas de fondo serían 1 y 2
3. La estimación de la celeridad de las formas de fondo  $c_T$  se realiza por el método de seguimiento de dunas, adoptándose para las celeridades de las formas de fondo de  $\mathcal{O}(1)$  la notación  $c_{B_1}$ , y para las formas de  $\mathcal{O}(2)$ ,  $c_{B_{2/1}}$ .
4. El valor del caudal sólido del material de arrastre que fluye por el talud de aguas abajo de las formas de fondo y que no participa la evolución de las formas de  $\mathcal{O}(1)$  y  $\mathcal{O}(2)$ ,  $q_\pi$ , no puede determinarse por mediciones directas en condiciones de campo<sup>1</sup>, por lo que no puede cuantificarse en base los a datos disponibles.

Las celeridades  $c_{B_1}$  y  $c_{B_{2/1}}$  así como las dimensiones de las formas de fondo que se encontraron migrando en los registros se presentan en los Cuadros 9.8 a 9.14, en los que los valores se detallan por crecida, progresiva y día de medición.

Las series de altas frecuencias fueron superpuestas para cada progresiva y cada intervalo de medición, intentando así identificar a las pequeñas dunas en cada perfil. No todos los perfiles procesados permitieron lograr la identificación de las pequeñas dunas en los distintos intervalos de medición, es por ello que los cálculos de sus celeridades, denominadas celeridades relativas de las dunas de  $\mathcal{O}(2)$  respecto de las de  $\mathcal{O}(1)$ , ( $c_{B_{2/1}}$ ), se encuentran limitados a algunas progresivas e intervalos de tiempo. Las celeridades relativas de las pequeñas dunas se determinaron como su desplazamiento menos los desplazamientos de las grandes dunas sobre las que ellas se encuentran, respecto del tiempo transcurrido entre ambas mediciones. El Cuadro 9.8 (Anexo) contiene los valores de  $c_{B_{2/1}}$  estimados a partir de ésta metodología para la crecida de 1983, y los Cuadros 9.12 a 9.14

---

<sup>1</sup>En laboratorio puede ser determinado por diferencia entre volumen acumulado en el tanque de sedimentación y el correspondiente al transportado en calidad de forma de fondo (Sidorchuck, 1990).

para las crecidas de 1992 y 1998, y su contraste con los valores de  $c_{B_1}$  obtenidos por seguimiento de las grandes dunas. Las diferencias entre el cálculo del SMD con el conjunto jerárquico de formas y con sólo las dunas mayores, se muestran como porcentajes de aumento del caudal sólido de fondo estimado por considerar la superposición de formas en los Cuadros 4.5 y 4.6.

A continuación se sintetizan los resultados obtenidos hasta aquí en Cuadros que presentan la siguiente estructura: las cuatro primeras columnas incluyen las variables hidráulicas correspondientes al cálculo  $C_{SL}$ ,  $Q$ ,  $h$  y  $q$ . Las tres columnas que le siguen presentan los datos del presente cálculo:  $\Lambda_2$  estimada por cómputo directo,  $c_{B_{2/1}}$  estimada también por cómputo directo,  $q_{B_{2,1}}$  calculado por SMD y  $q_{Bt}$  es el caudal sólido total resultante de la suma del aporte de las dunas de  $\mathcal{O}(1)$  y  $\mathcal{O}(2)$ . La columna que le sigue presenta la diferencia en porcentaje entre el caudal sólido aportado por la forma de  $\mathcal{O}(1)$  y el  $q_{Bt}$ , resultando en la expresión:  $((q_{Bt} - q_{B_1})/q_{Bt}) \times 100$ . La siguiente columna presenta la misma relación, aunque obtenida con los cálculos hechos con otra metodología de contraste de los resultados, denominada *por diferencia de formas* y que se explica a continuación. La última columna presenta el parámetro de transporte ya definido en el punto 4.2.3.

#### 4.3.6. Estimación del $q_{B_{2,1}}$ por el Método de Diferencia de Formas

Dado que se cuenta con registros de fajas ecográficas en las que se presentan dunas del tipo  $a$  y del tipo  $b$  en una misma longitudinal y asumiendo que a lo largo de ese perfil el caudal líquido unitario es constante (algo que no es necesariamente cierto), puede considerarse que el caudal sólido de fondo también es constante. Entonces, en un mismo perfil que presente una duna del tipo  $a$  y una del tipo  $b$ , puede postularse que el caudal sólido de fondo total  $q_{Bt}$  está dado por el SMD clásico aplicado a la duna tipo  $a$ , siendo el aporte de las dunas de  $\mathcal{O}(2)$  la diferencia entre el caudal total y aquel dado por el seguimiento de las dunas de  $\mathcal{O}(1)$  de tipo  $b$ .

Entonces, si para una duna de tipo  $b$  se tiene  $q_{Bt} = q_{B_1} + q_{B_{2/1}}$ , siendo  $q_{Bt}$  un dato aportado por la duna tipo  $a$ , sigue que el transporte debido a las dunas pequeñas solamente puede obtenerse por diferencias,  $q_{B_{2,1}} = q_{Bt} - q_{B_1}$ . Éste cálculo es utilizado para contrastar las estimaciones realizadas, teniendo en cuenta que el seguimiento de las dunas pequeñas trae una incertidumbre implícita basada en que las dunas de  $\mathcal{O}(2)$  tienen formas muy variables y pueden ser confundidas en su seguimiento. Los registros que presentan ambos tipos de dunas, y con los que se realizaron éstos cálculos son:

- Crecida 1983: en las fechas 08/07, 26/07, 28/07 y 31/07. Si bien los registros de esta crecida presentan en su mayoría dunas del tipo  $a$ , para este análisis se incorporó una gran duna (Duna

III) que no fue analizada en los cálculos anteriores por aparecer sólo en los últimos días de mediciones.

- Crecida 1992: para la Progresiva 1250 el día 28/06, para la Progresiva 1300 el día 28/06 y para la Progresiva 1350 el día 28/06.
- Crecida 1998: para la Progresiva 1200 el día 20/05, para la 1250 el día 27/05.

#### 4.3.7. Consideraciones sobre los resultados

Los Cuadros 4.5 y 4.6 resúmen los resultados encontrados. En ellos se aprecia el aumento del caudal sólido total dado por el aporte de las dunas pequeñas, el que puede ser considerable o no. Por otra parte y debido a la gran dispersión de los datos medidos y a la escasa disponibilidad de registros, es posible inferir valores medios estimativos, que deberían tomarse mas como una medida de la incertidumbre inherente al proceso que como una estimación de cierta precisión.

En cuanto a los valores de celeridades de las dunas pequeñas existen las siguientes incertidumbres:

- Se sabe que éstas dunas se desplazan a mayor velocidad que las formas mayores. El hecho de que los registros disponibles exhiban una separación diaria o mayor no garantiza que las dunas pequeñas no escapen a la ventana de observación establecida durante los trabajos de campo del equipo de medición del Túnel y las pequeñas dunas identificadas correspondan en rigor a un tren posterior que posea una morfología muy parecida a las dunas seguidas. En este caso, las celeridades estimadas serían menores a las reales.
- Debe tenerse en cuenta que en todo el perfil de la duna de  $\mathcal{O}(1)$  tanto la celeridad como la amplitud de las dunas de  $\mathcal{O}(2)$  son variables, creciendo ambas desde el valle hacia la cresta de la duna grande. Debido a la calidad de la información, sólo fue posible identificar entre dos registros sucesivos a dunas pequeñas en la zona cercana a la cresta de las grandes dunas, por lo que los valores de celeridad podrían estar sobreestimados.

Por lo tanto se agregó el cálculo por diferencia de formas que sólo persigue introducir un valor comparativo, ya que estos datos también son escasos y muy dispersos. Estos valores, en el mejor de los casos, aportan un orden de magnitud del fenómeno, ya que es notable la variabilidad existente, entre crecida y crecida, tanto en la morfología como en la cinemática de las formas de fondo.

## 4.4. Cuadros y Figuras

<b>1983</b>	$C_{LS}$	$Q$	$h$	$u$	$q$	$\Lambda$	$c_B$	$q_B$	$c$	$\epsilon$
Día	[ $m$ ]	[ $\frac{m^3}{s}$ ]	[ $m$ ]	[ $\frac{m}{s}$ ]	[ $\frac{m^2}{s}$ ]	[ $m$ ]	[ $\frac{m}{día}$ ]	[ $\frac{m^2}{día}$ ]	[ $adim$ ]	[ $adim$ ]
08/07/1983	16.39	30731	26.0	1.8	46.7	4.5	37.5	66.8	2.4E-4	2.8E-5
16/07/1983	16.00	27962	24.6	1.7	40.6	4.6	14.0	25.5	9.8E-5	1.2E-5
21/07/1983	15.96	27697	24.9	1.6	38.8	4.6	10.3	18.8	7.7E-5	9.4E-6
26/07/1983	16.23	29555	23.9	1.7	39.4	5.2	14.2	29.2	1.0E-4	1.4E-5
28/07/1983	16.31	30136	24.0	1.7	40.1	4.7	22.3	41.5	1.5E-4	2.0E-5
30/07/1983	16.24	29626	23.8	1.6	38.7	4.7	14.8	27.5	1.1E-4	1.4E-5
31/07/1983	16.21	29412	23.8	1.6	38.7	4.3	17.5	29.8	1.3E-4	1.5E-5
<b>Promedio</b>	<b>16.18</b>	<b>29303</b>	<b>24.4</b>	<b>1.7</b>	<b>40.4</b>	<b>4.4</b>	<b>18.5</b>	<b>34.4</b>	<b>1.3E-4</b>	<b>1.6E-5</b>

Cuadro 4.1: Caudales sólidos y parámetros de transporte resultantes del seguimiento de grandes dunas sobre la progresiva 1256. Datos correspondientes a la crecida del año 1983.

<b>1992</b>		$C_{SL}$	$Q$	$h$	$u$	$q$	$\Lambda$	$c_B$	$q_B$	$c$	$\epsilon$
Prog.	Día	[m]	$[\frac{m^3}{s}]$	[m]	$[\frac{m}{s}]$	$[\frac{m^2}{s}]$	[m]	$[\frac{m}{día}]$	$[\frac{m^2}{día}]$	[adim]	[adim]
1200	25/06/92	16.43	31035	24.3	2.0	47.6	5.9	30.1	70.3	1.8E-4	2.8E-5
	27/06/92	16.27	29843	25.0	1.9	48.5	5.5	16.1	35.1	9.6E-5	1.4E-5
	28/06	16.20	29340	24.7	1.9	47.4	5.4	19.4	41.5	1.2E-4	1.7E-5
	<b>Prom.</b>	<b>16.30</b>	<b>30072</b>	<b>24.7</b>	<b>1.9</b>	<b>47.8</b>	<b>5.6</b>	<b>21.9</b>	<b>48.8</b>	<b>1.3E-4</b>	<b>2.0E-5</b>
1250	25/06/92	16.43	31035	23.9	1.5	35.6	5.3	33.0	69.3	2.6E-4	3.8E-5
	28/06/92	16.27	29340	23.6	1.4	33.0	4.4	27.0	47.0	2.2E-4	2.7E-5
	<b>Prom.</b>	<b>16.35</b>	<b>30072</b>	<b>23.7</b>	<b>1.5</b>	<b>34.3</b>	<b>4.9</b>	<b>30.0</b>	<b>58.2</b>	<b>2.4E-4</b>	<b>3.3E-5</b>
1300	25/06/92	16.43	31035	23.7	1.3	31.8	6.2	23.4	57.5	2.0E-4	3.5E-5
	27/06/92	16.27	29843	24.1	1.4	33.6	5.5	16.8	36.6	1.4E-4	2.2E-5
	28/06/92	16.20	29340	23.8	1.3	31.6	5.2	14.9	30.7	1.3E-4	1.9E-5
	<b>Prom.</b>	<b>16.30</b>	<b>30072</b>	<b>23.9</b>	<b>1.3</b>	<b>32.3</b>	<b>5.6</b>	<b>18.4</b>	<b>41.0</b>	<b>1.6E-4</b>	<b>2.5E-5</b>
1350	25/06/92	16.43	31035	22.1	1.4	29.8	6.0	26.0	61.8	2.2E-4	4.0E-5
	27/06/92	16.27	29843	23.3	1.4	32.2	6.3	23.9	59.6	2.0E-4	3.6E-5
	28/06/92	16.20	29340	23.2	1.4	31.6	6.3	16.2	40.4	1.4E-4	2.5E-5
	<b>Prom.</b>	<b>16.30</b>	<b>30072</b>	<b>22.9</b>	<b>1.4</b>	<b>31.2</b>	<b>6.2</b>	<b>22.0</b>	<b>54.0</b>	<b>1.9E-4</b>	<b>3.4E-5</b>
<b>1998</b>		$C_{SL}$	$Q$	$h$	$u$	$q$	$\Lambda$	$c_B$	$q_B$	$c$	$\epsilon$
Prog.	Día	[m]	$[\frac{m^3}{s}]$	[m]	$[\frac{m}{s}]$	$[\frac{m^2}{s}]$	[m]	$[\frac{m}{día}]$	$[\frac{m^2}{día}]$	[adim]	[adim]
1200	19/05/98	16.19	29270	22.8	1.7	38.5	3.3	17.6	23.0	1.2E-4	1.2E-5
	20/05/98	16.10	28640	22.3	1.7	37.2	3.3	16.5	21.6	1.1E-4	1.1E-5
	<b>Prom.</b>	<b>16.15</b>	<b>28955</b>	<b>22.6</b>	<b>1.7</b>	<b>37.9</b>	<b>3.3</b>	<b>17.1</b>	<b>22.3</b>	<b>1.2E-4</b>	<b>1.2E-5</b>
1250	19/05/98	16.19	29270	23.0	1.4	32.2	3.0	16.5	19.6	1.4E-4	1.2E-5
	20/05/98	16.10	28640	22.6	1.4	31.2	2.9	19.3	22.2	1.6E-4	1.4E-5
	27/05/98	15.72	26180	22.3	1.3	28.8	3.4	9.5	12.8	8.5E-5	8.6E-6
	<b>Prom.</b>	<b>16.00</b>	<b>28030</b>	<b>22.6</b>	<b>1.4</b>	<b>30.7</b>	<b>3.1</b>	<b>15.1</b>	<b>18.2</b>	<b>1.3E-4</b>	<b>1.2E-6</b>

Cuadro 4.2: Caudales sólidos y parámetros de transporte resultantes del seguimiento de grandes dunas sobre las progresivas 1200, 1250, 1300 y 1350 de la crecida de 1992 y 1200 y 1250 de la crecida de 1998.

1983	Duna I				Duna II			
	$\alpha$	$\alpha_f$	Superposición	$\Lambda/\lambda$	$\alpha$	$\alpha_f$	Superposición	$\Lambda/\lambda$
02/07	4°00	3°30	no	0.015	3°20	3°30	si	—
08/07	4°40	5°00	no	0.020	2°30	1°40	si	0.007
16/07	9°20	2°50	no	0.031	6°00	2°50	no	0.010
21/07	8°10	1°30	no	0.035	6°40	1°40	no	0.010
26/07	4°40	3°00	no	0.035	6°20	2°50	no	0.013
28/07	3°00*	2°50	si	0.028	6°50	2°40	no	0.009
30/07	6°30	2°40	no	0.025	4°20	2°50	no	0.011
31/07	4°10*	2°20	si	0.021	8°30	2°23	no	0.011
1992	Duna I				Duna II			
	$\alpha$	$\alpha_f$	Superposición	$\Lambda/\lambda$	$\alpha$	$\alpha_f$	Superposición	$\Lambda/\lambda$
<i>PROGRESIVA 1200</i>								
23/06	7°10	5°50	no	0.026	—	—	si	—
25/06	13°00	9°00	no	0.026	—	—	si	—
27/06	13°00	6°20	no	0.026	6°50	5°30	si	0.022
28/06	15°00	5°40	no	0.026	6°50	4°40	si	0.019
<i>PROGRESIVA 1250</i>								
23/06	6°10	3°10	no	0.015	2°50	1°30	si	0.025
25/06	9°50	6°00	no	0.021	—	—	si	—
28/06	7°00	3°10	no	0.020	2°00	1°20	si	0.016
<i>PROGRESIVA 1300</i>								
23/06	3°10	4°40	si	0.024	—	—	si	—
25/06	3°40	3°50	si	0.021	3°40	3°20	si	—
27/06	4°40	3°00	si	0.019	3°40	2°40	si	—
28/06	5°30	2°50	no	0.018	3°50	2°30	si	0.025
<i>PROGRESIVA 1350</i>								
23/06	3°00	4°30	si	0.020	—	—	si	—
25/06	3°50	4°00	si	0.019	3°00	2°30	si	—
27/06	4°10	2°30	si	0.021	4°30	3°40	si	—
28/06	5°00	3°20	si	0.020	4°30	4°10	si	0.032

Cuadro 4.3: Ángulo del frente de avance de las dunas I y II de de la crecida de 1983 y I y II de la crecida de 1992 de O(1) observadas en los datos originales ( $\alpha$ ) y en los datos filtrados ( $\alpha_f$ ). Presencia (si) o ausencia (no) de superposición de formas, peralte de dunas. El \* indica que estas últimas formas se encuentran perturbadas por la presencia de la estructura del Túnel.



1998	Duna I				Duna II			
	$\alpha$	$\alpha_f$	Superposición	$\Lambda/\lambda$	$\alpha$	$\alpha_f$	Superposición	$\Lambda/\lambda$
	<i>PROGRESIVA 1200</i>							
14/05	3°20	2°20	si	0.018	3°10	1°40	si	0.026
19/05	2°40	2°10	si	0.015	3°10	2°00	si	0.027
20/05	2°50	1°10	si	0.017	2°30	1°50	si	0.022
	<i>PROGRESIVA 1250</i>							
14/05	1°20	2°20	si	0.023	3°00	2°10	si	0.026
19/05	2°00	1°10	si	0.011	3°30	1°10	si	0.016
20/05	2°10	3°00	si	0.016	3°00	2°00	si	0.017
27/05	—	—	si	—	1°40	—	si	0.014
	Duna III				Duna IV			
	$\alpha$	$\alpha_f$	Superposición	$\Lambda/\lambda$	$\alpha$	$\alpha_f$	Superposición	$\Lambda/\lambda$
	<i>PROGRESIVA 1200</i>							
14/05	6°50	4°10	no	0.036	—	—	si	—
19/05	5°20	3°00	no	0.025	3°50	2°10	si	0.030
20/05	6°50	3°50	no	0.027	4°50	3°00	si	0.026
	<i>PROGRESIVA 1250</i>							
14/05	3°50	2°40	si	0.020	—	—	—	0.037
19/05	3°30	2°30	si	0.019	6°40	—	si	0.034
20/05	3°40	2°30	si	0.016	6°50	3°00	si	0.034
27/05	3°40	2°40	si	0.019	9°40	4°10	no	

Cuadro 4.4: Ángulo del frente de avance de las dunas I, II, III y IV de O(1) observado en los datos originales ( $\alpha$ ) de la crecida de 1998 y en los datos filtrados ( $\alpha_f$ ). Presencia (si) o ausencia (no) de superposición de formas en el mismo, peralte de las dunas.

<b>1983</b>	$Q$	$h$	$q$	$\Lambda_2$	$c_{B_2/1}$	$q_{B_2,1}$	$q_{Bt}$	%por	%por	$\epsilon_t$
Día	[ $m$ ]	[ $\frac{m^3}{s}$ ]	[ $m$ ]	[ $\frac{m^2}{s}$ ]	[ $m$ ]	[ $\frac{m}{día}$ ]	[ $\frac{m^2}{día}$ ]	[ $\frac{m^2}{día}$ ]	sup.	dif.
[ <i>adim</i> ]										
08/07/1983	30731	26.0	46.7	1.7	11.4	7.7	70.0	11	34	2.8E-05
16/07/1983	27962	24.6	40.6	1.2	—	—	27.2	0		1.3E-05
21/07/1983	27697	24.9	38.8	1.2	—	—	18.8	0		9.0E-06
26/07/1983	29555	23.9	39.4	1.6	—	—	29.2	0		1.5E-05
28/07/1983	30136	24.0	40.1	1.7	—	—	41.2	0		2.0E-05
30/07/1983	29626	23.8	38.7	1.0	—	—	27.5	0		1.4E-05
31/07/1983	29412	23.8	38.7	1.1	—	—	29.0	0		1.5E-05
<b>Promedio</b>	<b>29303</b>	<b>24.4</b>	<b>40.4</b>	<b>1.4</b>	<b>10.1</b>	<b>6.6</b>	<b>34.7</b>	<b>11</b>		<b>1.6E-05</b>

Cuadro 4.5: Caudales sólidos y parámetros de transporte resultantes de la superposición de dunas de  $O(1)$  y  $O(2)$  sobre la progresiva 1256, porcentaje adicional por considerar las dunas de  $O(2)$ . Datos correspondientes a la crecida del año 1983.

<b>1992</b>		$Q$	$h$	$q$	$\Lambda_2$	$c_{B_2/1}$	$q_{B_2,1}$	$q_{Bt}$	$\%por$	$\%por$	$\epsilon_t$
Prog.	Día	$[\frac{m^3}{s}]$	$[m]$	$[\frac{m^2}{s}]$	$[m]$	$[\frac{m}{dia}]$	$[\frac{m^2}{dia}]$	$[\frac{m^2}{dia}]$	<i>sup.</i>	<i>dif.</i>	$[adim]$
1200	25/06/92	31035	24.3	47.6	1.9	—	—	77.8	0		3.1E-5
	27/06/92	29843	25.0	48.5	1.5	11.0	7.4	40.8	18		1.7E-5
	28/06/92	29340	24.7	47.4	1.3	40.7	21.0	51.7	41	47	2.1E-5
	<b>Prom.</b>	<b>30072</b>	<b>24.7</b>	<b>47.8</b>	<b>1.6</b>	<b>25.9</b>	<b>18.0</b>	<b>56.8</b>	<b>30</b>	<b>57</b>	<b>2.3E-5</b>
1250	25/06	31035	23.9	35.6	1.4	35.8	18.4	53.5	34		2.9E-5
	28/06	29340	23.6	33.0	1.3	4.6	1.8	32.9	5	48	1.9E-5
	<b>Prom.</b>	<b>30072</b>	<b>23.7</b>	<b>34.3</b>	<b>1.4</b>	<b>20.2</b>	<b>10.1</b>	<b>43.2</b>	<b>20</b>		<b>2.4E-5</b>
1300	25/06/92	31035	23.7	31.8	1.5	12.5	10.4	53.6	20		3.2E-5
	27/06/92	29843	24.1	33.6	1.4	15.5	8.9	32.4	28		1.9E-5
	28/06/92	29340	23.8	31.6	1.3	44.0	22.7	42.3	54	59	2.6E-5
	<b>Prom.</b>	<b>30072</b>	<b>23.9</b>	<b>32.3</b>	<b>1.4</b>	<b>24.0</b>	<b>14.0</b>	<b>42.8</b>	<b>34</b>		<b>2.6E-5</b>
1350	25/06/92	31035	22.1	29.8	1.4	17.0	9.4	71.2	13		4.6E-5
	27/06/92	29843	23.3	32.2	1.4	—	—	—	—		—
	28/06/92	29340	23.2	31.6	1.0	54.0	21.4	60.7	35		3.8E-5
	<b>Prom.</b>	<b>30072</b>	<b>22.9</b>	<b>31.2</b>	<b>1.3</b>	<b>35.5</b>	<b>15.4</b>	<b>66.0</b>	<b>24</b>		<b>4.2E-5</b>
<b>1998</b>		$Q$	$h$	$q$	$\Lambda_2$	$c_{B_2/1}$	$q_{B_2,1}$	$q_{Bt}$	$\%por$		$\epsilon_t$
Prog.	Día	$[\frac{m^3}{s}]$	$[m]$	$[\frac{m^2}{s}]$	$[m]$	$[\frac{m}{dia}]$	$[\frac{m^2}{dia}]$	$[\frac{m^2}{dia}]$	<i>sup.</i>		$[adim]$
1200	19/05/98	29270	22.8	38.5	1.0	17.0	8.2	32.4	25		1.6E-5
	20/05/98	28640	22.3	37.2	1.0	17.0	8.2	27.1	30	41	1.4E-5
	<b>Prom.</b>	<b>28955</b>	<b>22.6</b>	<b>37.9</b>	<b>1.2</b>	<b>17.0</b>	<b>19.0</b>	<b>30.0</b>	<b>25</b>		<b>1.5E-5</b>
1250	19/05/98	29270	23.0	32.2	1.1	16.2	6.6	24.4	36		8.2E-6
	20/05/98	28640	22.6	31.2	0.8	16.2	7.7	27.6	28		1.6E-5
	27/05/98	26180	22.3	28.8	0.6	16.2	7.7	28.2	27		1.9E-5
	<b>Prom.</b>	<b>28030</b>	<b>22.6</b>	<b>30.7</b>	<b>1.1</b>	<b>16.2</b>	<b>9.5</b>	<b>22.5</b>	<b>36</b>		<b>1.1 E-5</b>

Cuadro 4.6: Caudales sólidos y parámetros de transporte resultantes de la superposición de dunas de  $O(1)$  y  $O(2)$  sobre las progresivas 1200, 1250, 1300 y 1350 de la crecida de 1992 y 1200 y 1250 de la crecida de 1998. Porcentaje adicional por considerar las dunas de  $O(2)$ .

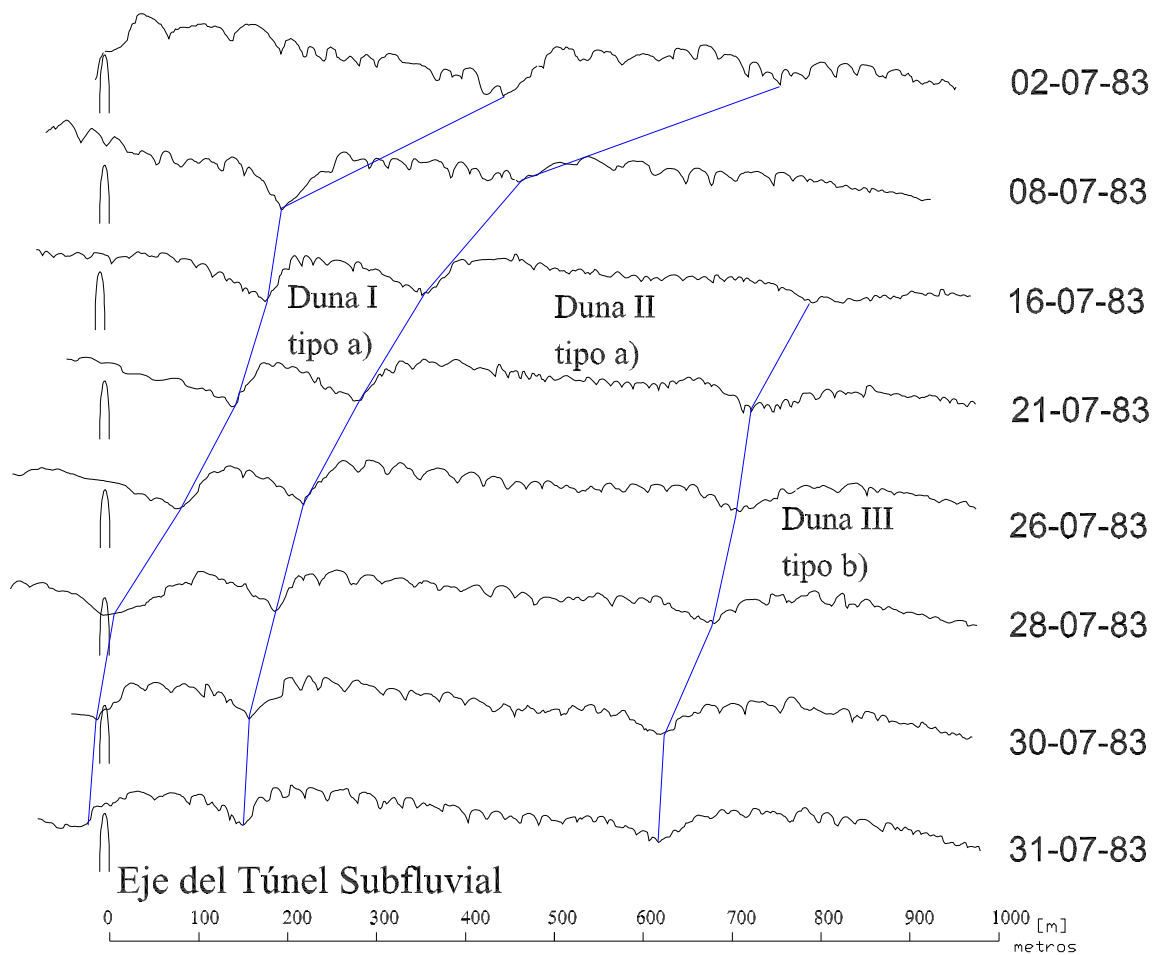


Figura 4.1: Perfiles relevados durante el mes de julio de 1983, a lo largo de la progresiva transversal 1256.

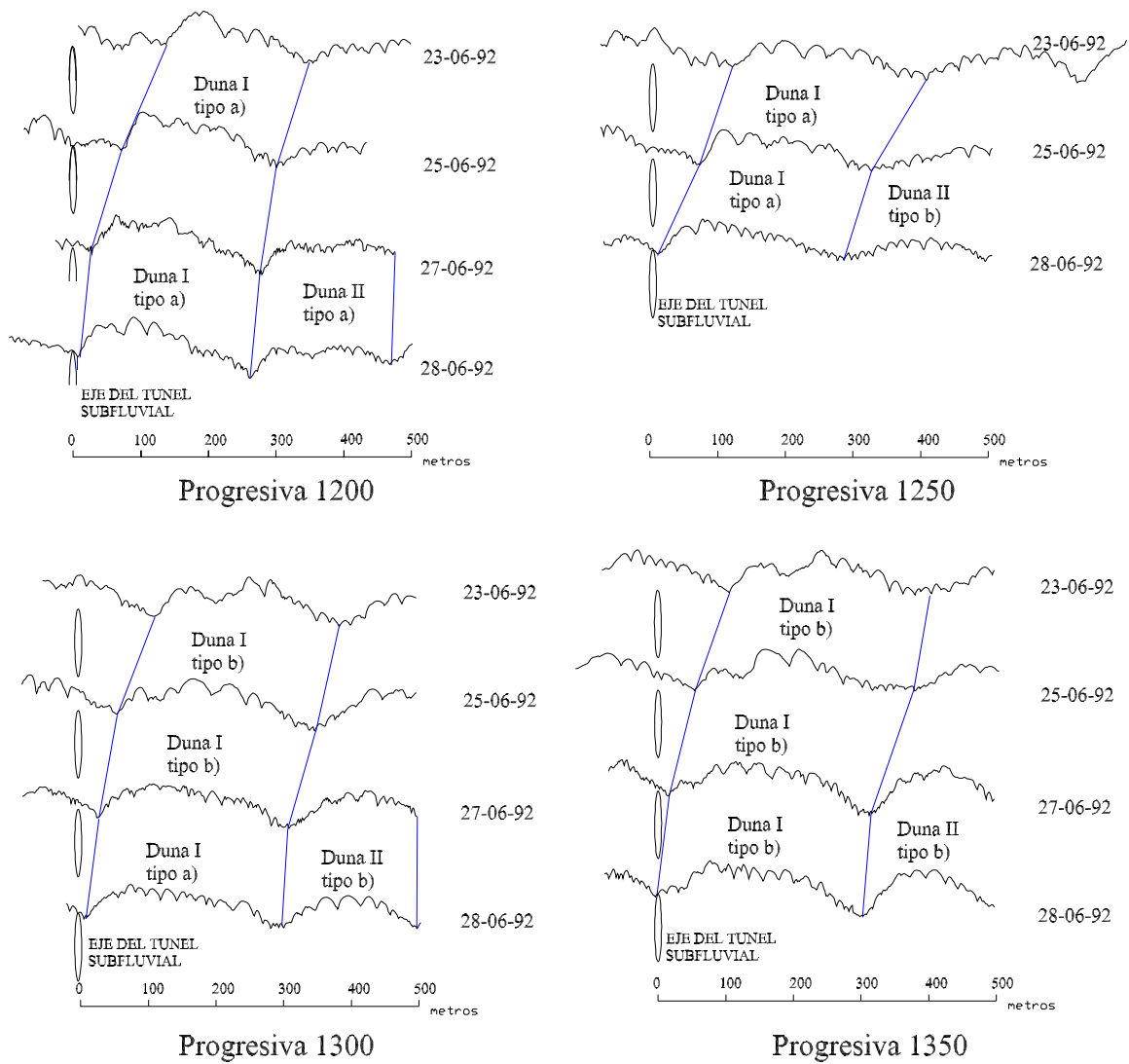


Figura 4.2: Perfiles relevados durante el mes de junio de 1992.

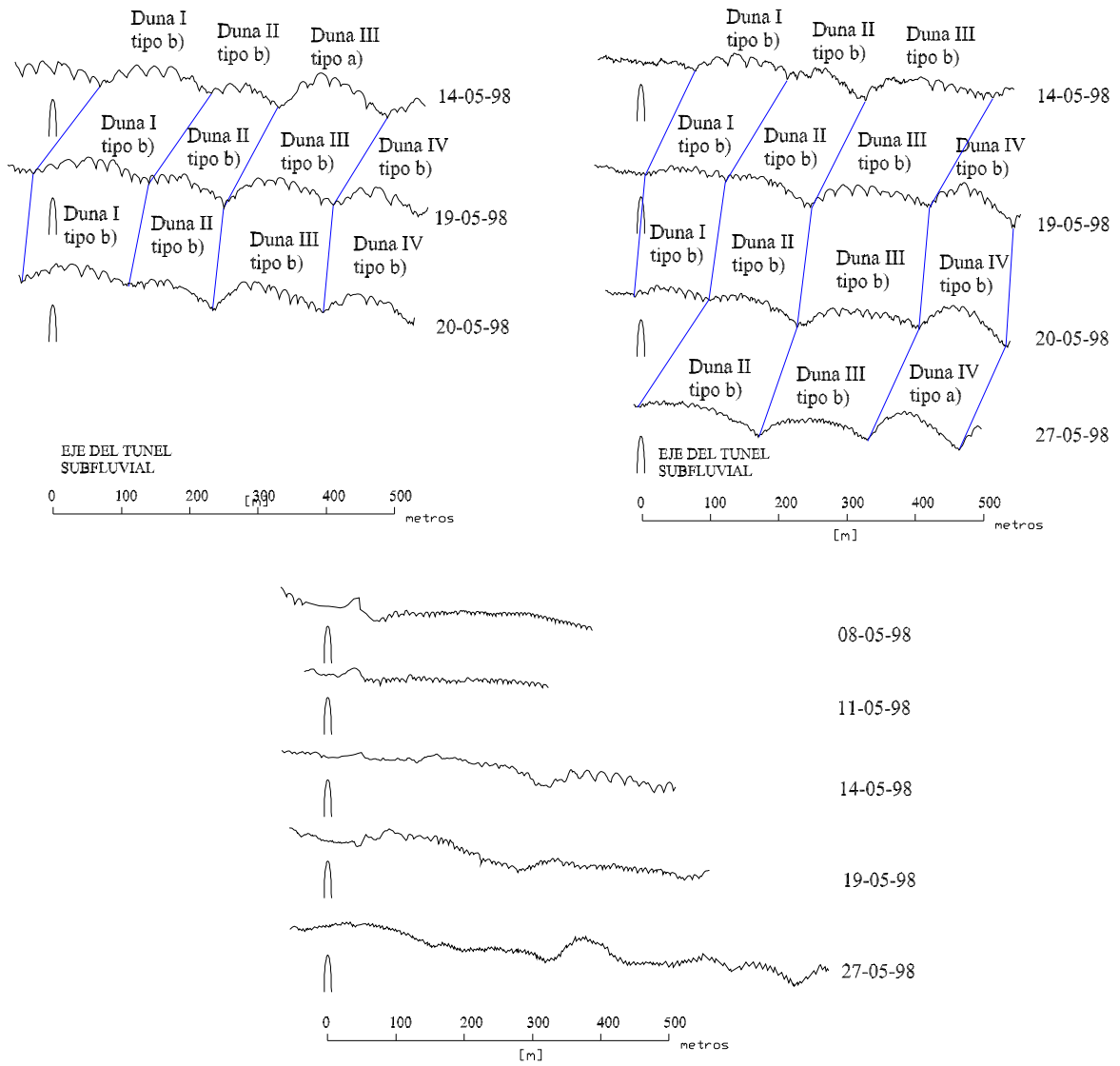


Figura 4.3: Perfiles relevados durante el mes de mayo de 1998.

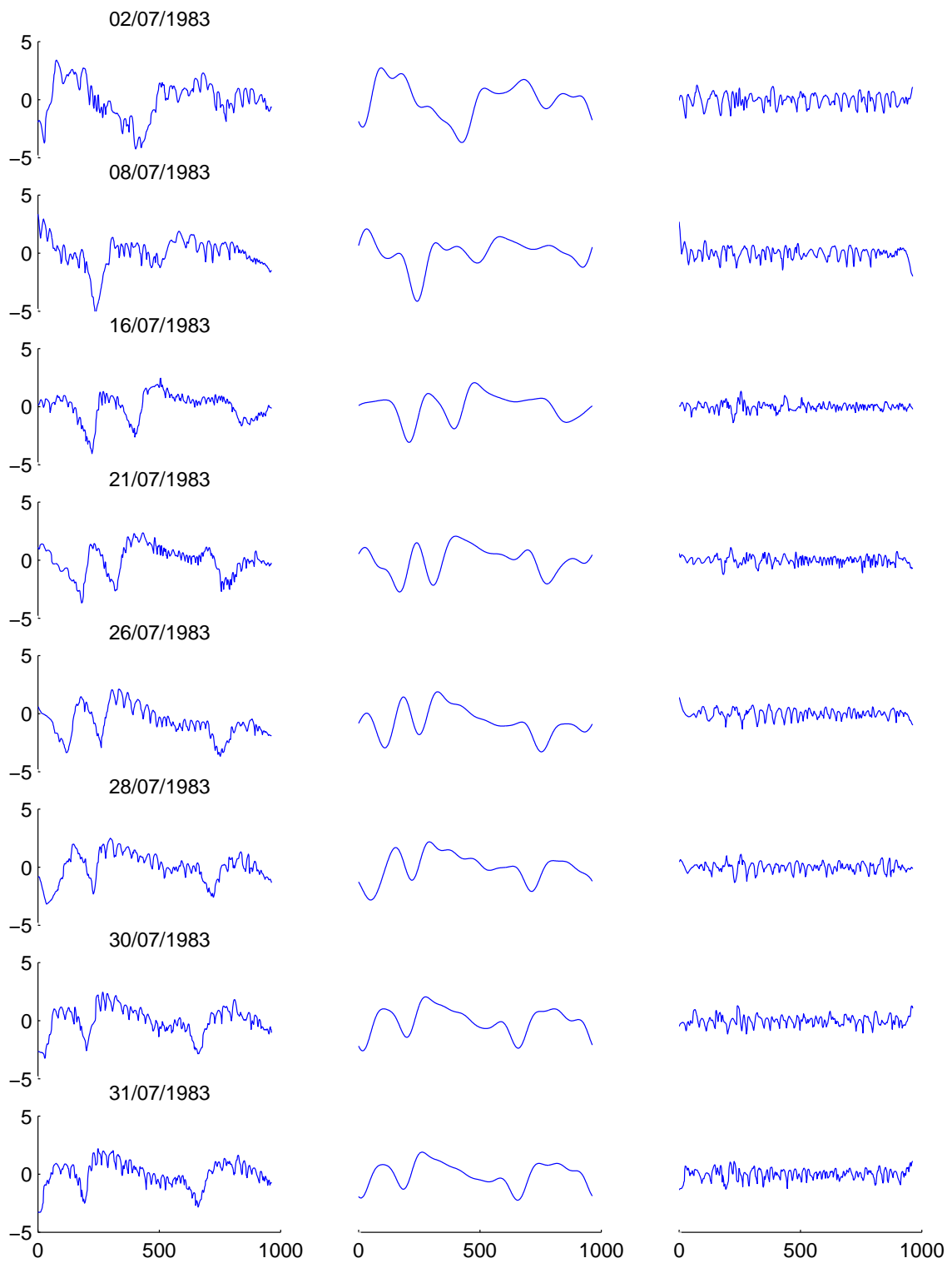


Figura 4.4: Registros año 1983: perfiles del lecho llevados a cota cero, perfiles del lecho sin ondas pequeñas (dunas de  $O(1)$ ), perfiles del lecho sin ondas grandes (dunas de  $O(2)$ ).

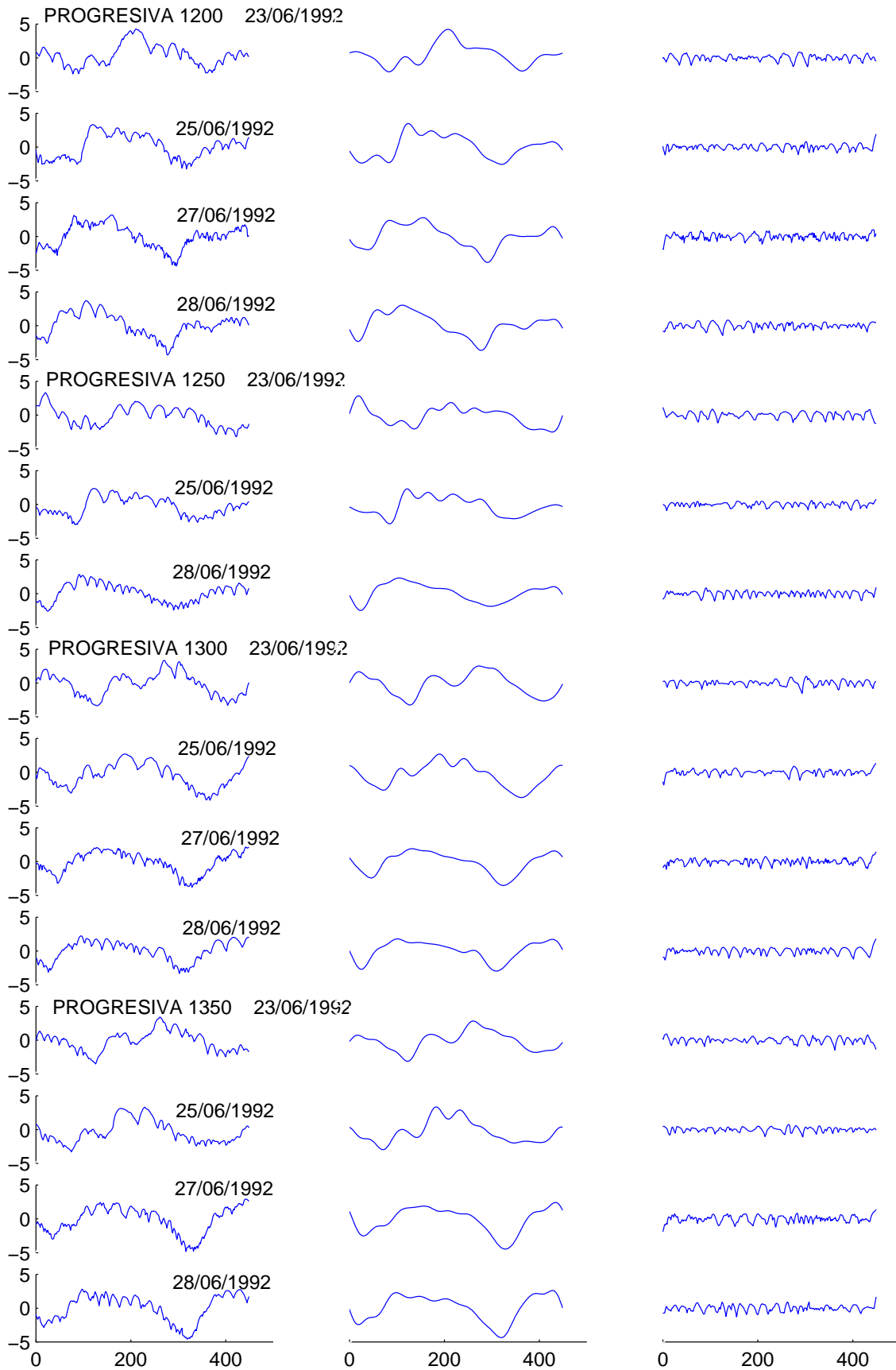


Figura 4.5: Registros año 1992: perfiles del lecho llevados a cota cero, perfiles del lecho sin ondas pequeñas (dunas de  $O(1)$ ), perfiles del lecho sin ondas grandes (dunas de  $O(2)$ ).



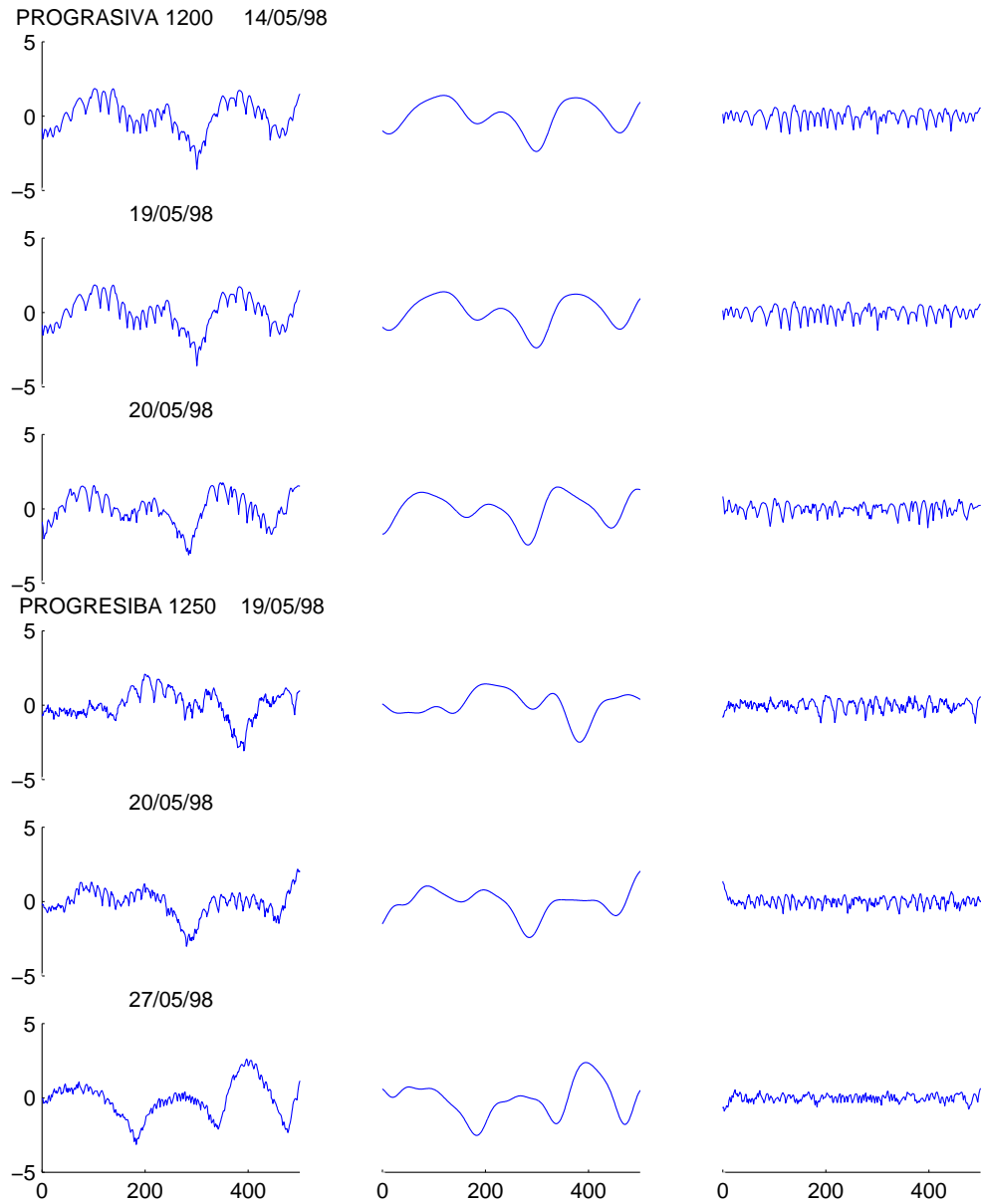


Figura 4.6: Registros año 1998: perfiles del lecho llevados a cota cero, perfiles del lecho sin ondas pequeñas (dunas de  $O(1)$ ), perfiles del lecho sin ondas grandes (dunas de  $O(2)$ ).

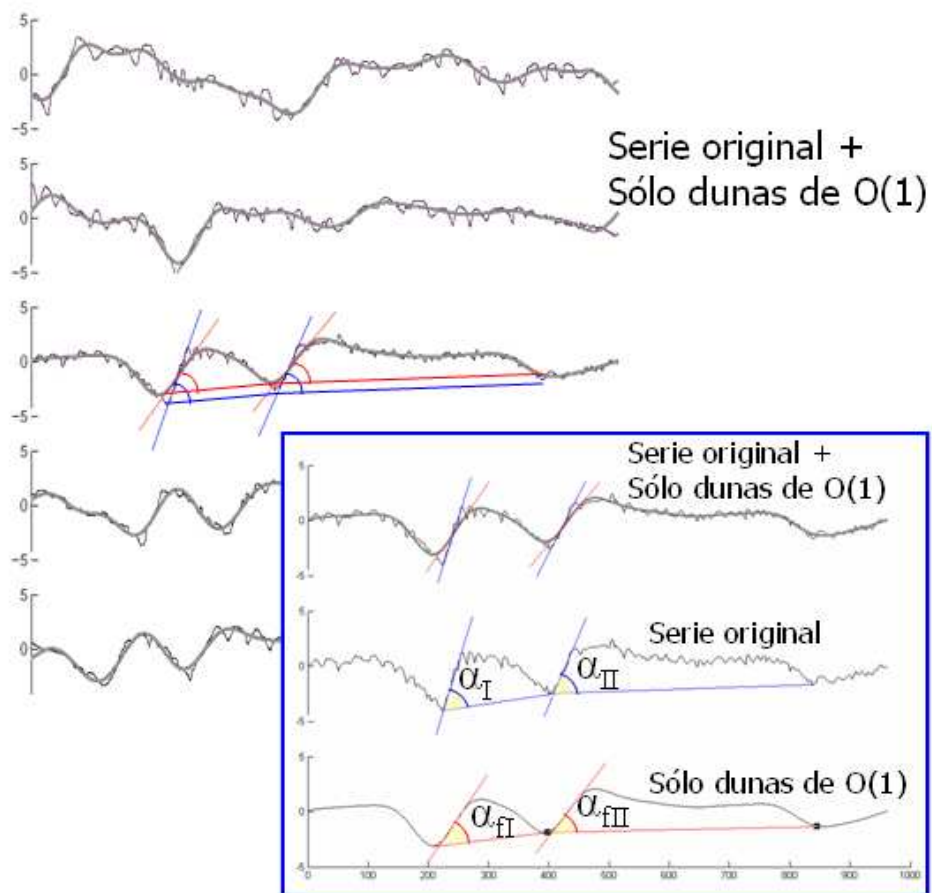


Figura 4.7: Contraste entre las series originales y las filtradas para la crecida del año 1983. La línea azul muestra la pendiente de la duna de  $O(1)$  original y la línea roja muestra la pendiente de la misma duna filtrada. En el detalle se muestra cómo fueron medidos los ángulos del frente de avance.

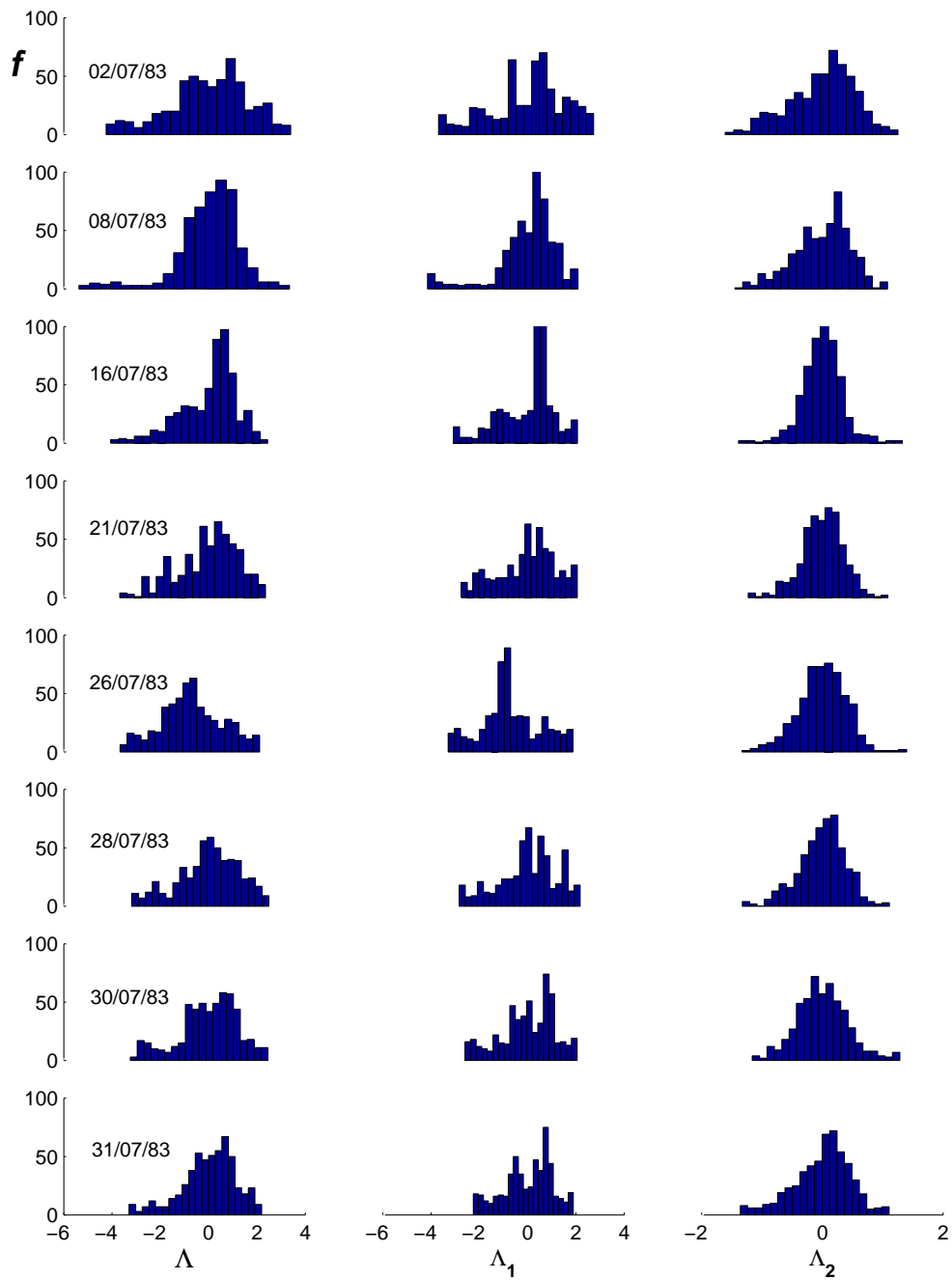


Figura 4.8: Histogramas de frecuencias de las series de la crecida de 1983: la primer columna pertenece a las series originales, la segunda columna a las dunas de  $O(1)$  y la tercer columna a las dunas de  $O(2)$ .

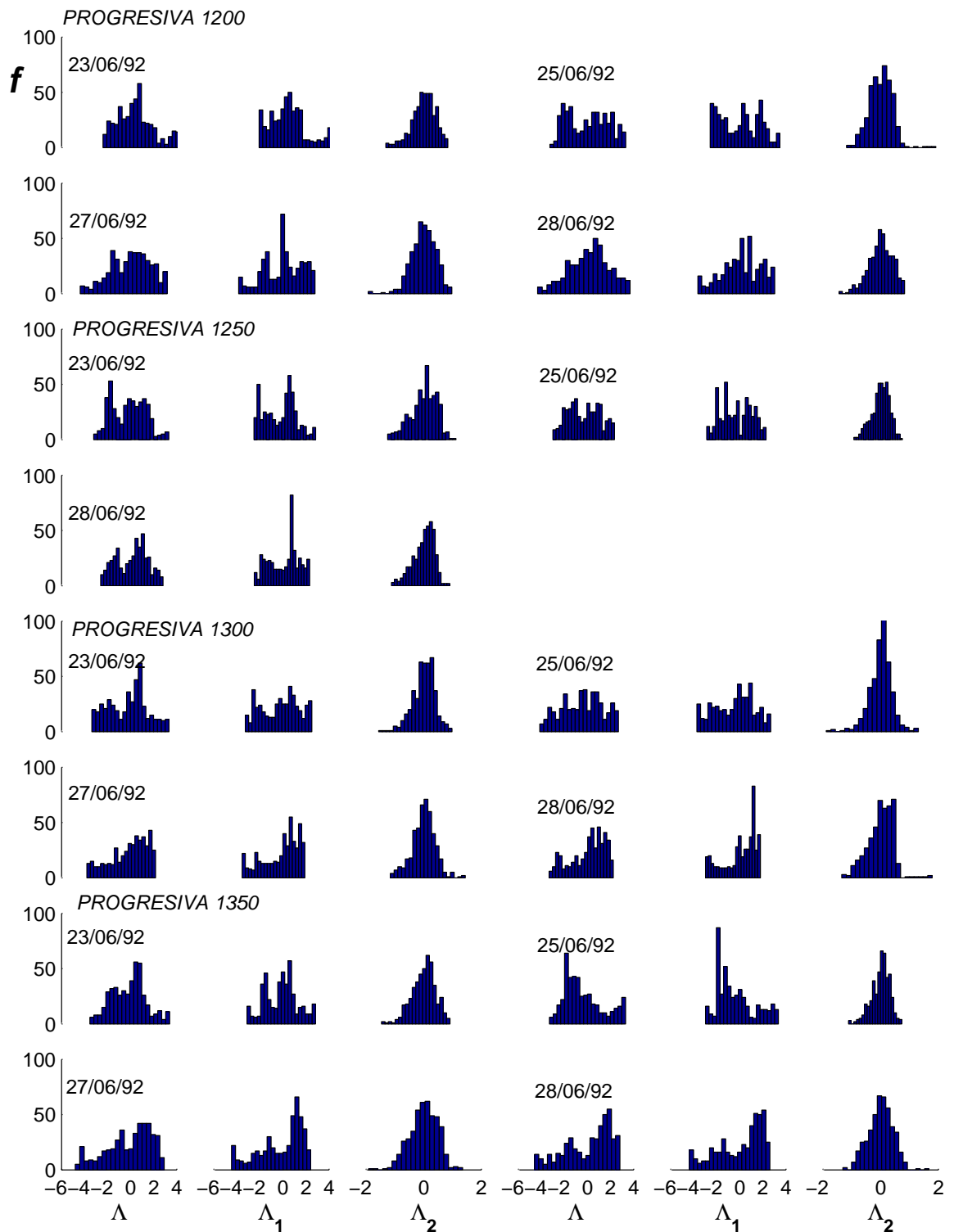


Figura 4.9: Histogramas de frecuencias de las series de la crecida de 1992.

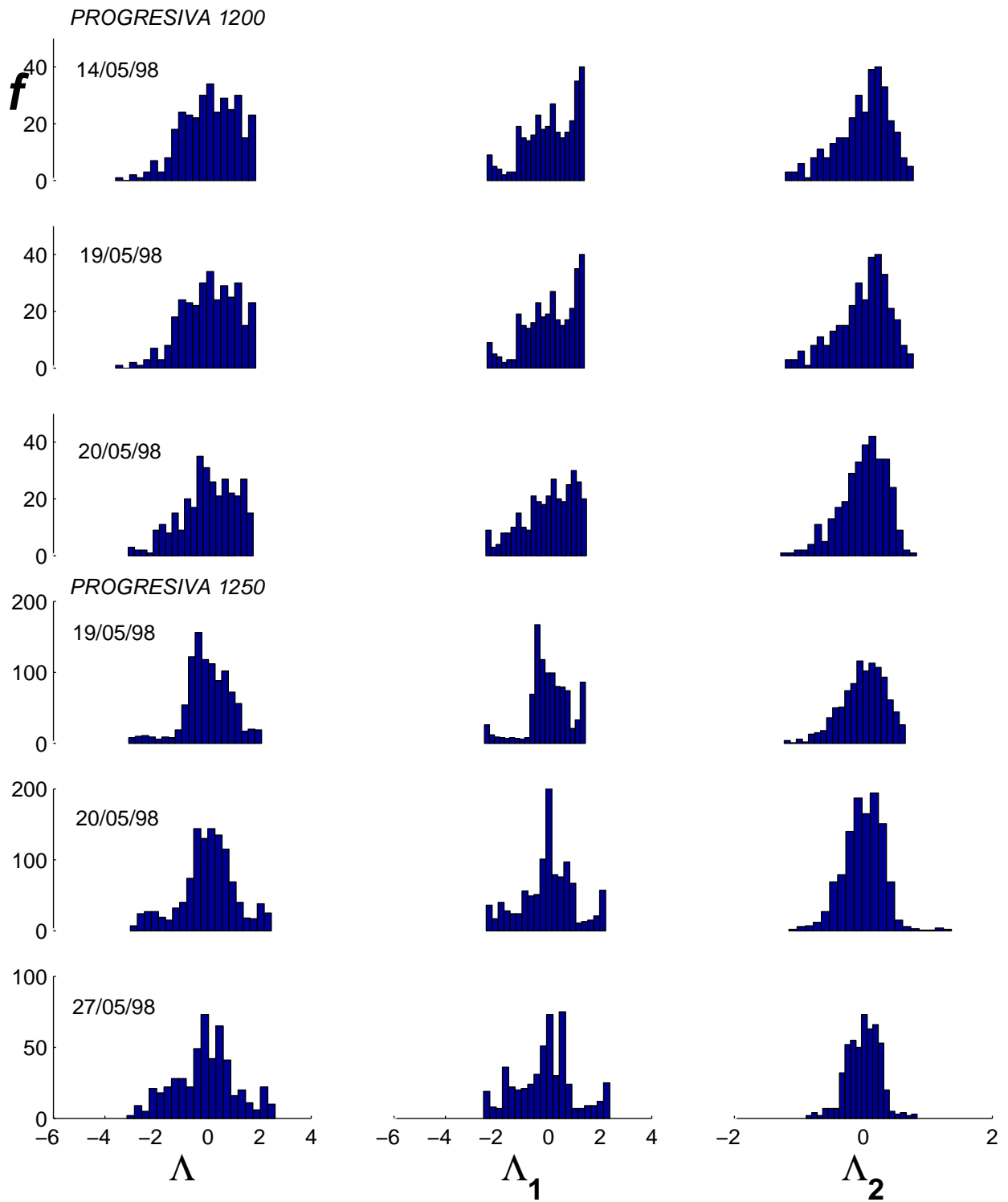


Figura 4.10: Histogramas de frecuencias de las series de la crecida de 1998.

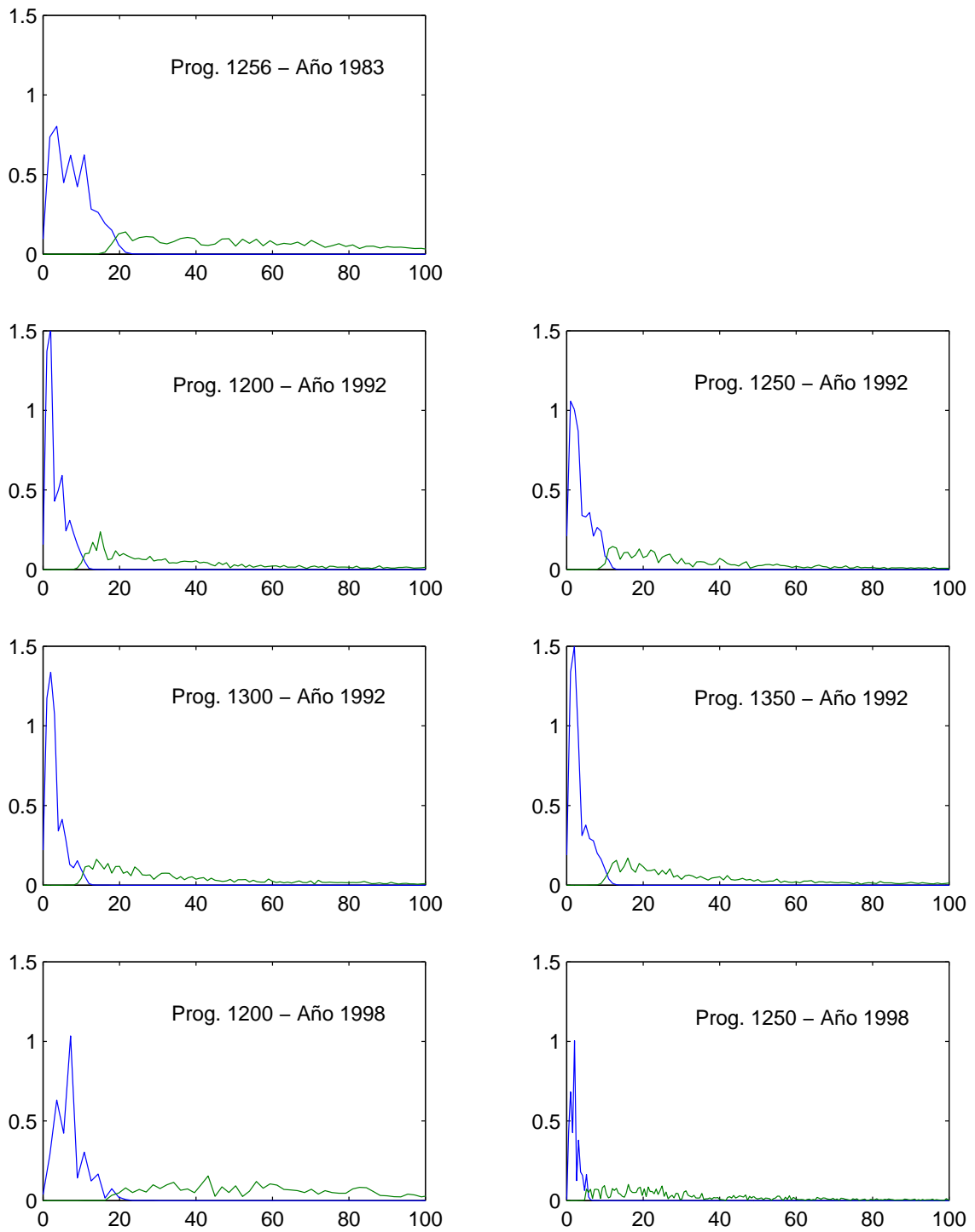


Figura 4.11: Espectros medios de cada progresiva relevada durante cada crecida analizada. Azul: espectro de las dunas de  $O(1)$ , verde: espectros de las dunas de  $O(2)$ .

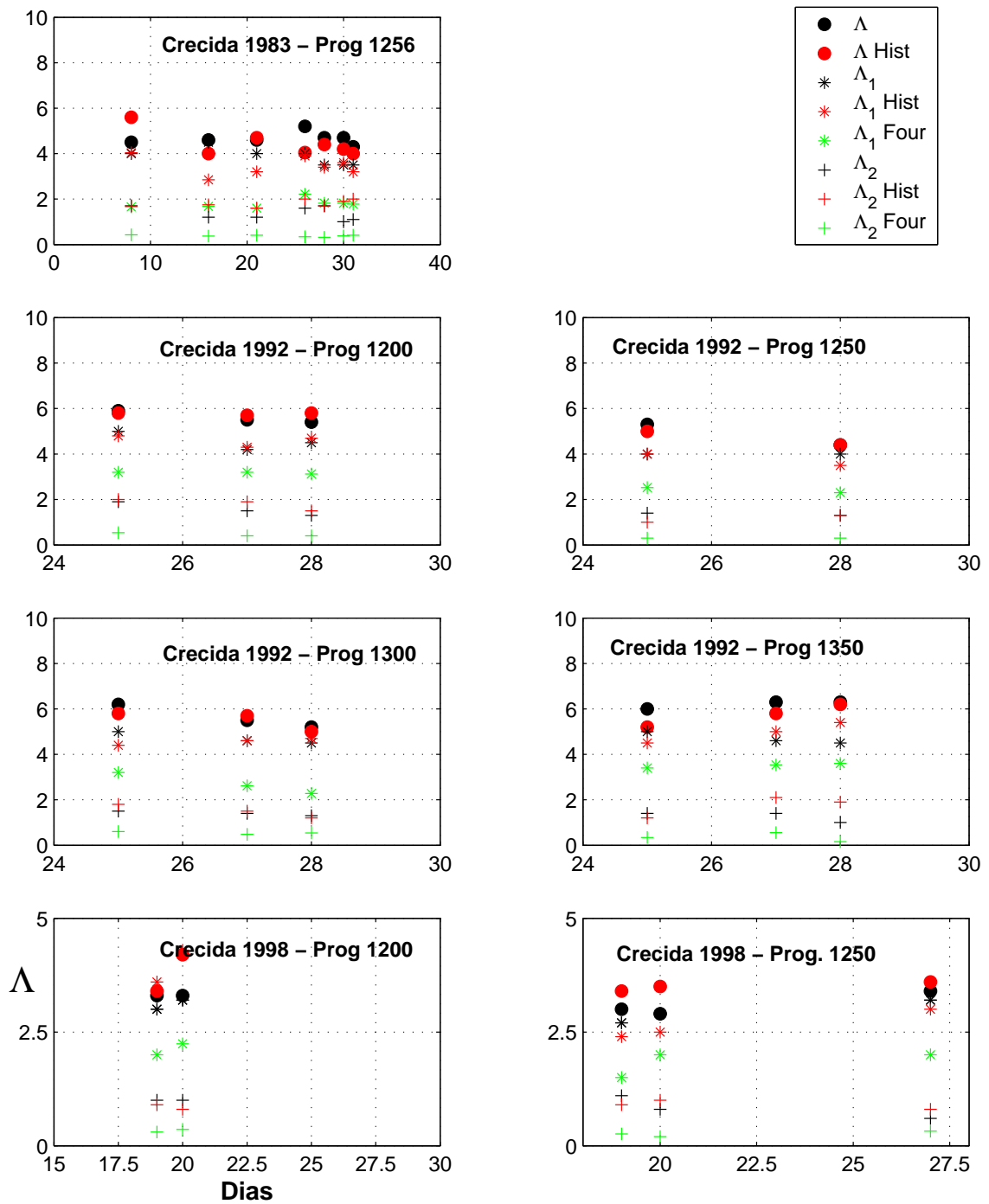


Figura 4.12: Gráficos comparativos entre las amplitudes  $\Lambda$ ,  $\Lambda_1$  y  $\Lambda_2$  medidas (negro), estimadas con el Histograma de frecuencias (rojo) y con el espectro de Fourier (verde).

## Capítulo 5

# Estimación de $q_B$ por Seguimiento de Evolución de Trincheras (SET)

En éste Capítulo se evalúa el transporte de fondo por medio de la contabilidad del material que cae en una trampa de sedimentos, luego de verificar que en ella no se deposita el material que se transporta en suspensión.

Se cuenta con datos medidos en campo y en laboratorio. Las mediciones en campo consisten en la excavación de trincheras en el lecho en donde el material que ingresa se contabiliza como la carga de fondo que aporta el flujo. Lo importante de ésta estimación es que lleva la cuenta directa del aporte de material del lecho, aunque las condiciones de contorno son muy difíciles de controlar. El seguimiento de la evolución de una de las trincheras relevadas en campo fue también realizado a escala en laboratorio. El mismo aporta información complementaria a las mediciones en campo. En éste caso, las condiciones de contorno se encuentran totalmente controladas, aunque la simulación no deja de ser una imitación simplificada de la realidad con los condicionamientos que ésto implica.

La información generada y recolectada en éste Capítulo es presentada en tablas respetando el mismo formato que se presenta en los Capítulos anteriores.

### 5.1. Estimación de $q_B$ mediante análisis de evolución de trincheras excavadas en el lecho.

El caudal sólido de fondo estimado por medio de ésta metodología corresponde al que ingresa a la trinchera  $q_B]_0$  (Figura 2.9) y se computó aplicando la ec. 2.92. El valor de porosidad utilizado fue el mismo que en el capítulo anterior,  $p = 0,4$ , y los incrementos de área  $dA$  se calcularon como



la diferencia entre el área que se encuentra por encima del perfil longitudinal de la trinchera en el tiempo  $t$  y en el tiempo  $t + \Delta t$ , como lo indica la ec. (2.93). Esta metodología se aplicó a los fines del cálculo del caudal sólido de fondo con los datos de las dos trincheras dragadas en el Paraná sobre el eje del emplazamiento del Túnel Subfluvial Hernandarias.

### 5.1.1. Trincheras del año 1960

#### Datos de Campo

Las cuatro mediciones realizadas sobre los dos perfiles longitudinales (B y C) de la trinchera dragada a fines del año 1960 (Figura 3.7.a) fueron superpuestas a los fines de calcular los incrementos de área resultado de su evolución. Las Figuras 5.1 y 5.2 muestran la evolución de la trinchera durante el período de medición. El incremento de área medio ( $\overline{\Delta A}$ ) utilizado para la estimación del caudal sólido resultó del cociente

$$\overline{\Delta A} = \frac{\Delta A_B + \Delta A_C}{2}$$

El Cuadro 5.1 presenta, en sus dos primeras columnas, el estado hidrométrico del río para cada día de medición. La tercer y cuarta columna presentan el área inicial de la fosa, la quinta y sexta la variación de éste área entre mediciones, la séptima y octava el incremento de área promedio y el paso de tiempo. En las cuatro siguientes columnas se encuentran los resultados de la aplicación de la metodología correspondiente a un citado tirante hidráulico  $h$  y un caudal unitario  $q = uh$ , donde  $u$  es la velocidad media de los perfiles relevados dentro de la trinchera (Urciuolo y otros, 1965) y su valor es  $u = 0,86m/s$ . El caudal sólido se obtuvo con la ec. 2.93 afectándose por porosidad.

#### Ensayos en modelo físico

En el año 1961 y a los fines de completar los estudios sobre hidráulica fluvial comenzados con el dragado de la trinchera en el lugar de emplazamiento futuro de la obra, en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Nacional de Córdoba (Urciuolo *et al*, 1965) se realizaron ensayos en modelo físico. Estos consistieron en la simulación del comportamiento hidrosedimentológico de la trinchera de prueba realizada en canal vidriado de 0,40 m de ancho. Los ensayos se realizaron con arena fina de diámetro medio  $d_{50} = 0,025$  cm, y condiciones hidráulicas semejantes a las medidas durante esa fecha en el sistema real. Dentro del canal vidriado en el cual se reprodujeron las condiciones del prototipo, se conformaron dunas periódicas, luego que éste entró en régimen se realizó la excavación, a la que se le dió un talud de borde de uno de altura por dos de base, es decir un talud natural bajo el agua en movimiento de  $\theta = 30^\circ$ , que se mantuvo sin modificar

durante toda la simulación. La experimentación consistió en la medición a determinados intervalos de tiempo del volumen de sedimento acumulado dentro de la trinchera por aporte del transporte generado aguas arriba de ésta. Con estas mediciones se confeccionó una tabla que presenta el caudal sólido de fondo aportado por el escurrimiento simulado. En la presente Tesis, esos valores fueron escalados a los fines de ser comparados con los calculados en base a datos de campo. El Cuadro 5.2 presenta los valores medidos en el modelo físico y su conversión a las dimensiones en el prototipo.

### **5.1.2. Trinchera del año 1992**

#### **Datos de Campo**

Se realizó la superposición de los nueve relevamientos sobre los tres perfiles longitudinales definidos, a los fines de determinar los incrementos de volúmenes de sedimento ingresantes a la trinchera. La Figura 5.3 muestra la evolución de la trinchera durante el período de medición. El Cuadro 5.3 presenta los valores de áreas medidas de los registros de sonda ecográfica que fueron escaneados, normalizados y digitalizados, siguiendo la metodología presentada en la sección 3.3. La estructura del Cuadro sigue la forma del descripto para la trinchera del año 1960. Este presenta las áreas medidas, la variación de éstas en cada medición, y las variables que alimentan la ec. 2.93 con los que se obtuvieron los valores presentados en el Cuadro 5.4.

#### **Sobre la presencia de dunas en los registros**

Los relevamientos de la trinchera del año 1992 trajeron información adicional al método SET. Los registros permiten identificar y realizar un seguimiento de un tren de dunas que viene desplazándose por el lecho, las que terminan siendo captadas por la trinchera. La información es de buena calidad y aporta datos adicionales al presente análisis. La presencia de formas de fondo superpuestas a éstas dunas, si existieron, no fueron capturadas en el registro, por lo que la estimación adicional del caudal sólido de fondo por el SMD se hizo con las formas de fondo simples. El Cuadro 9.15 del Anexo presenta un detalle sobre las dimensiones de las dunas encontradas en la zona de la fosa y los valores de sus celeridades. En el Cuadro 5.5 se presenta el promedio de los valores de amplitud y celeridad por período de medición y en el Cuadro 5.6 se listan los valores de los caudales sólidos de fondo estimados por el método de seguimiento de dunas.

### 5.1.3. Comentarios sobre las estimaciones

Las Figuras 5.4 y 5.5 permiten tener una visión resumida de los resultados obtenidos en éste capítulo. La comparación entre los valores de  $q_B$  estimados con datos de campo y con datos de laboratorio indica que, dentro de la información de laboratorio con la que se cuenta, la magnitud de las variables escapa a los valores promedio esperados. Por otro lado, valiéndose de las diferencias en cuanto al estado hidrológico del río, de las estimaciones realizadas con datos de campo de las dos trincheras, resultan valores coherentes, que no escapan a un orden de magnitud promedio.

La Figura 5.5 se confeccionó a los fines de comparar los valores de  $q_B$  estimados por evolución de trinchera de prueba y por seguimiento de dunas. Por teoría, las magnitudes obtenidas de la primer forma deberían ser levemente superiores a las obtenidas de la segunda, siendo la diferencia entre ambos el valor de  $q_\pi$ , definido como el material que transcurre por sobre la cresta de la duna sin depositarse aguas abajo de ésta, como se lo describió en el Capítulo 2. En la misma puede observarse que el valor estimado por evolución de trincheras es muy variante, siguiendo un sigzaguo producto de la precipitación de formas de fondo dentro de la hoya excavada, es así como los picos corresponden a la entrada de la cresta de una duna y las depresiones al paso de los valles. La misma estimación pero con datos de seguimiento de dunas no presenta ese comportamiento, por lo tanto sólo los promedios pueden compararse a los fines de llegar a alguna conclusión que permita establecer un orden de magnitud a  $q_\pi$ . De la diferencia entre ambos promedios resulta que un 4% del material del fondo escapa a la estimación por el método de seguimiento de dunas, valor que puede tornarse despreciable si consideramos los errores que pueden cometerse en la medición.

Por los resultados expuestos también se puede ver que es correcto el postulado de que el material en suspensión no aporta volumen a la trinchera, si no fuera así el orden de magnitud del gasto sólido cambiaría, creciendo el volumen de la fosa no sólo desde su frente por la caída del material del lecho, sino también desde su fondo, por precipitación del material en suspensión.

En cuanto a la estimación del parámetro de Transporte  $\epsilon$ , en la Figura 5.6.a), puede verse que los resultados de trincheras y de dunas caen dentro de un mismo rango de valores, pero no ocurre lo mismo con las celeridades, en la misma figura se puede ver que las celeridades de evolución de las trincheras son menores a las de evolución de dunas, lo que queda mas claro aún cuando se compara éstos resultados con los resultados estimados en el Capítulo 4 (Figura 5.6.b). Los datos de laboratorio presentan valores altos del parámetro de transporte para una celeridad adimensional del mismo orden de las estimadas con datos de campo.

## 5.2. Cuadros y Figuras

Día	$C_{SL}$ [m]	$Q$ [ $\frac{m^3}{dia}$ ]	Area[m <sup>2</sup> ]		$\Delta A$ [m <sup>2</sup> ]		$\overline{\Delta A}$ [m <sup>2</sup> ]	$\Delta t$ [dia]	$h$ [m]	$q$ [ $\frac{m^2}{s}$ ]	$q_B$ [ $\frac{m^2}{dia}$ ]	$\epsilon$ [adim]
			Progresiva B	Progresiva C	Progresiva B	Progresiva C						
13/12	12.90	14843	1621	1745	—	—	—	—	13.3	15.5	—	—
27/12	12.25	13231	1540	1648	80.3	96.2	88.3	14	12.7	13.8	3.8	6.0E-6
10/01	11.88	12357	1509	1581	31.7	67.8	49.8	14	12.3	12.9	2.1	3.7E-6
23/01	11.98	12593	1458	1465	50.2	115.2	82.7	13	12.4	13.1	3.8	6.8E-6
<b>Prom.</b>	<b>12.25</b>	13256							<b>12.7</b>	<b>13.8</b>	<b>3.2</b>	<b>5.5E-6</b>

Cuadro 5.1: Caudales sólidos y parámetros de transporte resultantes de la superposición de los perfiles longitudinales B y C. Datos correspondientes a la trinchera dragada a finales del año 1960 y comienzos de 1961.

Valores Medidos en el Modelo Físico							Conv. Prototipo	
$H$	$Q$	$\Delta t$	$\Delta V$	$q_B$	$q$	$\epsilon$	$q$	$q_B$
[cm]	[ $\frac{l}{s}$ ]	[h]	[cm <sup>3</sup> ]	[ $\frac{cm^2}{h}$ ]	[ $\frac{cm^2}{s}$ ]		[ $\frac{m^2}{s}$ ]	[ $\frac{m^2}{dia}$ ]
12	15	10	6240	156	375.0	1.2E-4	11.2	111.4
13	20	5	4000	100	500.0	5.6E-5	14.9	71.4
12	15	1.5	820	20.5	375.0	1.5E-5	11.2	14.6
13	20	5	3350	83.8	500.0	4.7E-5	14.9	59.8
13	20	1.5	1130	28.3	500.0	1.6E-5	14.9	20.2

Cuadro 5.2: Caudales sólidos y parámetros de transporte resultantes de la conversión de los datos de laboratorio a los del modelo real o prototipo.

Día	$C_{SL}$ [m]	Area[m <sup>2</sup> ]			$\Delta A$ [m <sup>2</sup> ]			$\overline{\Delta A}$ [m <sup>2</sup> ]	$\Delta t$ [dia]
		Progresiva			Progresiva				
		1538	1553	1576	1538	1553	1576		
27/10	13.62	2732	2754	2750					
30/10	13.66	2735	2736	2751	-3.6	17.4	-1.2	7.6	3
11/11	14.02	2687	2691	2688	48.5	45.8	62.9	51.5	12
16/11	14.16	2586	2614	2629	100.5	76.2	58.8	75.7	5
19/11	14.24	2562	2579	2647	23.9	35.2	-17.9	16.9	3
24/11	14.28	2547	2556	2561	15.8	23.0	86.1	40.7	5
01/12	14.26	2437	2474	2501	109.8	82.5	60.4	81.2	7
07/12	14.24	2300	2408	2399	137.1	65.8	101.6	90.7	16

Cuadro 5.3: Datos calculados para la estimación de los caudales sólidos, resultantes de la superposición de los perfiles relevados sobre las progresivas longitudinales 1538, 1553 y 1576 y correspondientes a la trinchera dragada el año 1992.

Día	$C_{SL}$ [m]	$Q$ [ $\frac{m^3}{s}$ ]	$h$ [m]	$q$ [ $\frac{m^2}{s}$ ]	$q_B$ [ $\frac{m^2}{dia}$ ]	$\epsilon$ [adim]
30/10	13.66	17014	15.4	15.0	1.5	2.0E-6
11/11	14.02	18211	15.8	16.1	2.6	3.2E-6
16/11	14.16	18713	15.9	16.6	9.1	1.1E-5
19/11	14.24	19010	16.1	16.8	3.4	4.0E-6
24/11	14.28	19162	16.6	17.0	4.9	5.7E-6
01/12	14.26	19086	16.4	16.9	7.0	8.0E-6
07/12	14.24	19010	16.6	16.8	3.4	4.0E-6
<b>Prom.</b>	<b>14.12</b>	<b>18400</b>	<b>16.0</b>	<b>16.5</b>	<b>4.5</b>	<b>5.4E-6</b>

Cuadro 5.4: Caudales sólidos y parámetros de transporte estimados con los datos del Cuadro anterior.

Día	Prog. 1538			Prog. 1553			Prog. 1576			Promedios		
	$\Lambda$	$c_B$	$q_B$	$\Lambda$	$c_B$	$q_B$	$\Lambda$	$c_B$	$q_B$	$\Lambda$	$c_B$	$q_B$
	[m]	$[\frac{m}{día}]$	$[\frac{m^2}{día}]$	[m]	$[\frac{m}{día}]$	$[\frac{m^2}{día}]$	[m]	$[\frac{m}{día}]$	$[\frac{m^2}{día}]$	[m]	$[\frac{m}{día}]$	$[\frac{m^2}{día}]$
30/10/92	3.9	4.0	6.2	3.2	6.0	7.6	2.8	5.3	5.9	3.3	5.1	6.6
11/11/92	3.5	4.2	5.8	3.3	4.2	5.5	2.8	5.3	5.1	3.1	4.5	5.5
16/11/92	3.7	3.4	5.0	—	2.8	—	2.2	4.0	3.5	3.0	3.4	3.9
19/11/92	3.8	4.0	6.0	—	3.3	—	2.2	7.0	6.1	3.0	4.8	5.3
24/11/92	—	4.0	—	—	2.8	—	1.4	3.2	1.8	1.4	3.3	3.3
01/12/92	—	3.1	—	2.6	2.9	3.0	1.5	3.4	2.0	2.1	3.2	2.9
07/12/92	2.6	3.3	3.4	—	3.7	—	1.5	2.7	1.6	2.1	3.3	3.1

Cuadro 5.5: Caudales sólidos estimados por seguimiento de las dunas relevadas con la trinchera de ensayo del año 1992 para cada progresiva.

Día	$C_{SL}$	$Q$	$h$	$q$	$u$	$\Lambda$	$c_B$	$q_B$	$c$	$\epsilon$
	[m]	$[\frac{m^3}{s}]$	[m]	$[\frac{m^2}{s}]$	$[\frac{m}{s}]$	[m]	$[\frac{m}{día}]$	$[\frac{m^2}{día}]$	[adim]	[adim]
30/10/92	13.66	17014	15.3	14.7	1.15	3.3	5.1	6.6	7.6E-5	8.5E-6
11/11/92	14.02	18211	15.4	15.3	1.20	3.1	4.5	5.5	6.4E-5	6.8E-6
16/11/92	14.16	18713	15.8	16.0	1.21	3.0	3.4	3.9	4.5E-5	4.7E-6
19/11/92	14.24	19010	15.9	16.4	1.22	3.0	4.8	5.3	6.1E-5	6.2E-6
24/11/92	14.28	19162	16.6	16.6	1.22	1.4	3.3	3.3	3.8E-5	3.8E-6
01/12/92	14.26	19086	16.4	16.6	1.22	2.1	3.2	2.9	3.4E-5	3.3E-6
07/12/92	14.24	19010	16.6	16.6	1.21	2.1	3.3	3.1	3.6E-5	3.7E-6
<b>Prom.</b>	<b>4.52</b>	<b>18600</b>	<b>16.0</b>	<b>16.0</b>	<b>1.0</b>	<b>2.6</b>	<b>3.9</b>	<b>4.4</b>	<b>5.1E-5</b>	<b>5.3 E-6</b>

Cuadro 5.6: Caudales sólidos y parámetros de transporte estimados por seguimiento de dunas relevadas con la trinchera de ensayo del año 1992.

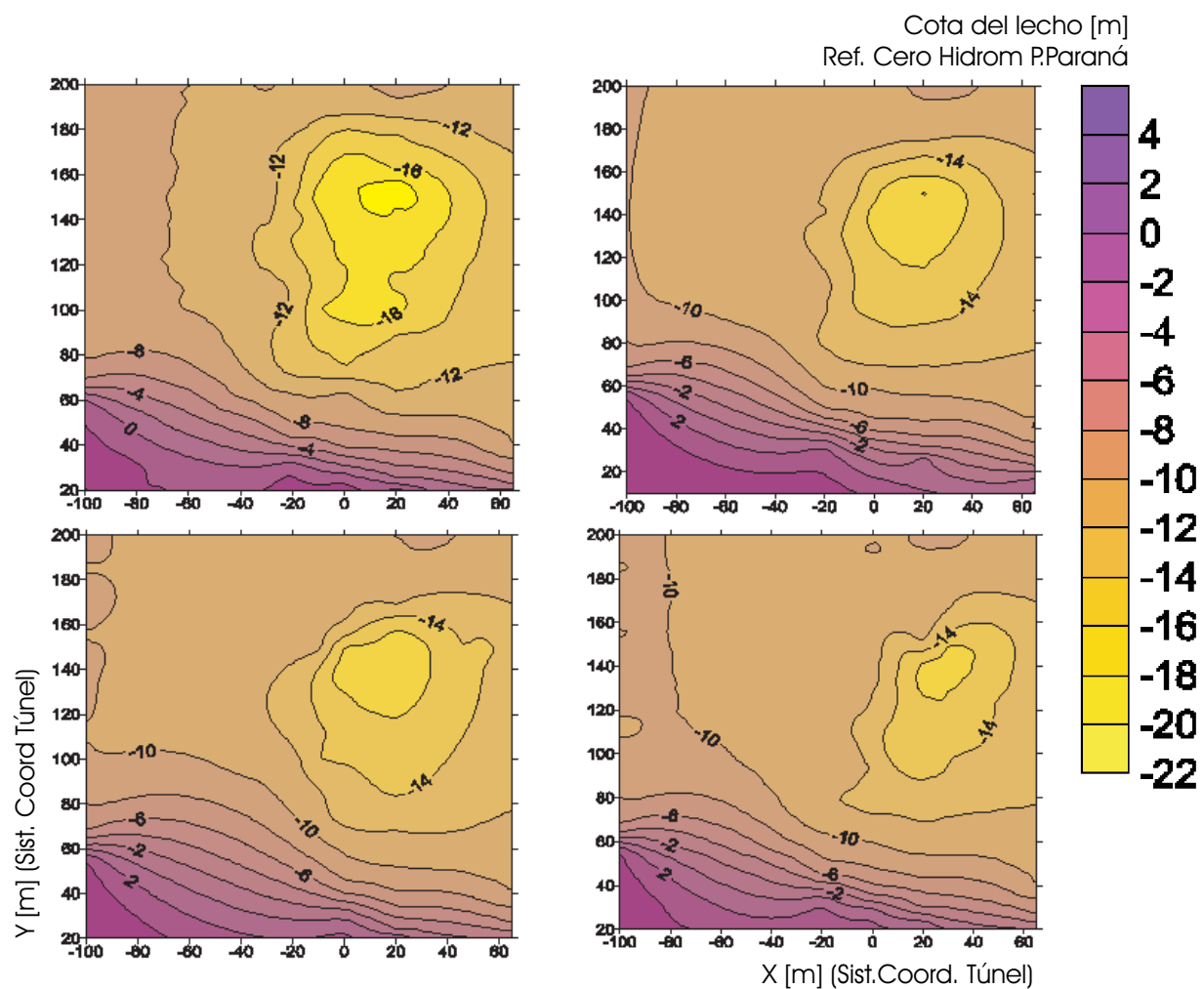
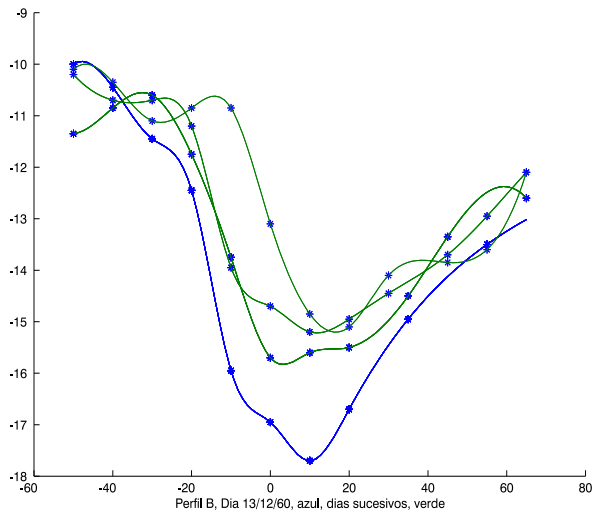
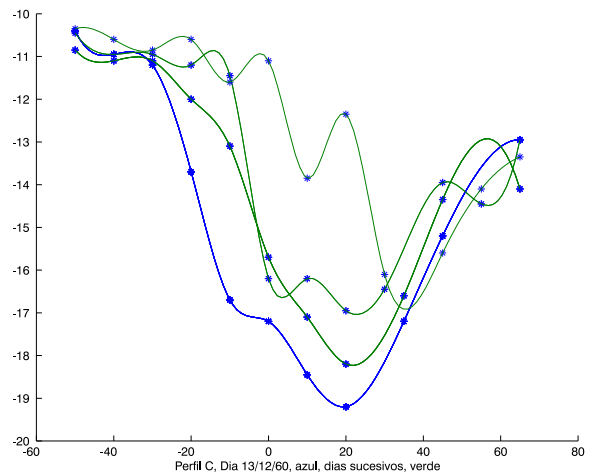


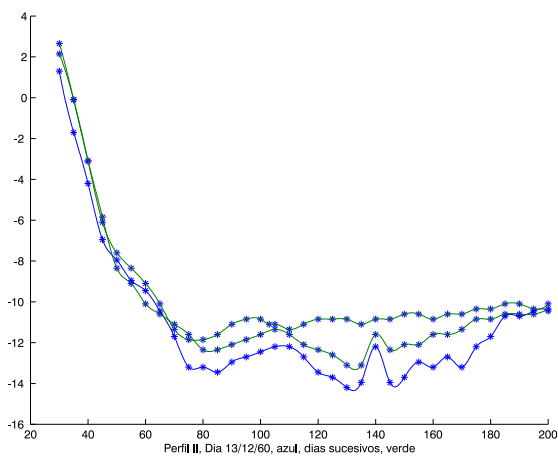
Figura 5.1: Isocurvas de cota del lecho referenciadas al cero del Hidrómetro de Puerto Paraná. Evolución de la trinchera relevada durante el mes de junio de 1960.



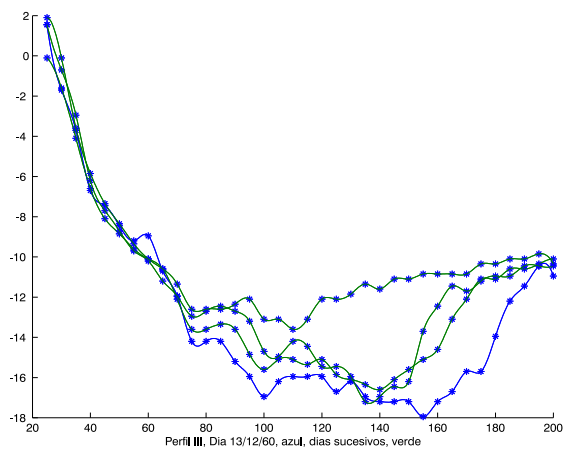
Perfil longitudinal B



Perfil longitudinal C



Perfil transversal II



Perfil transversal III

Figura 5.2: Perfiles relevados durante el mes de junio de 1960.



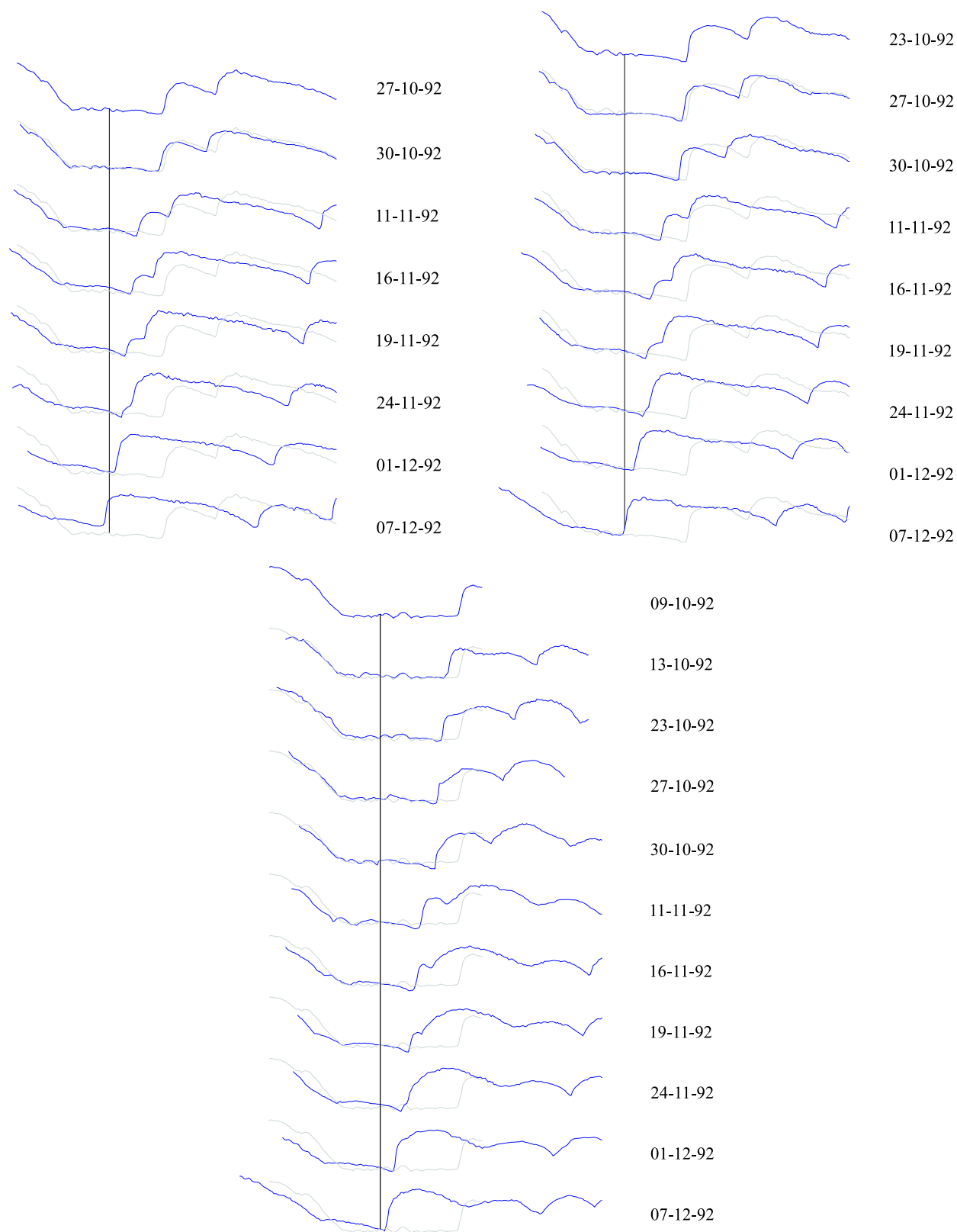


Figura 5.3: Perfiles relevados durante el mes de junio de 1992.

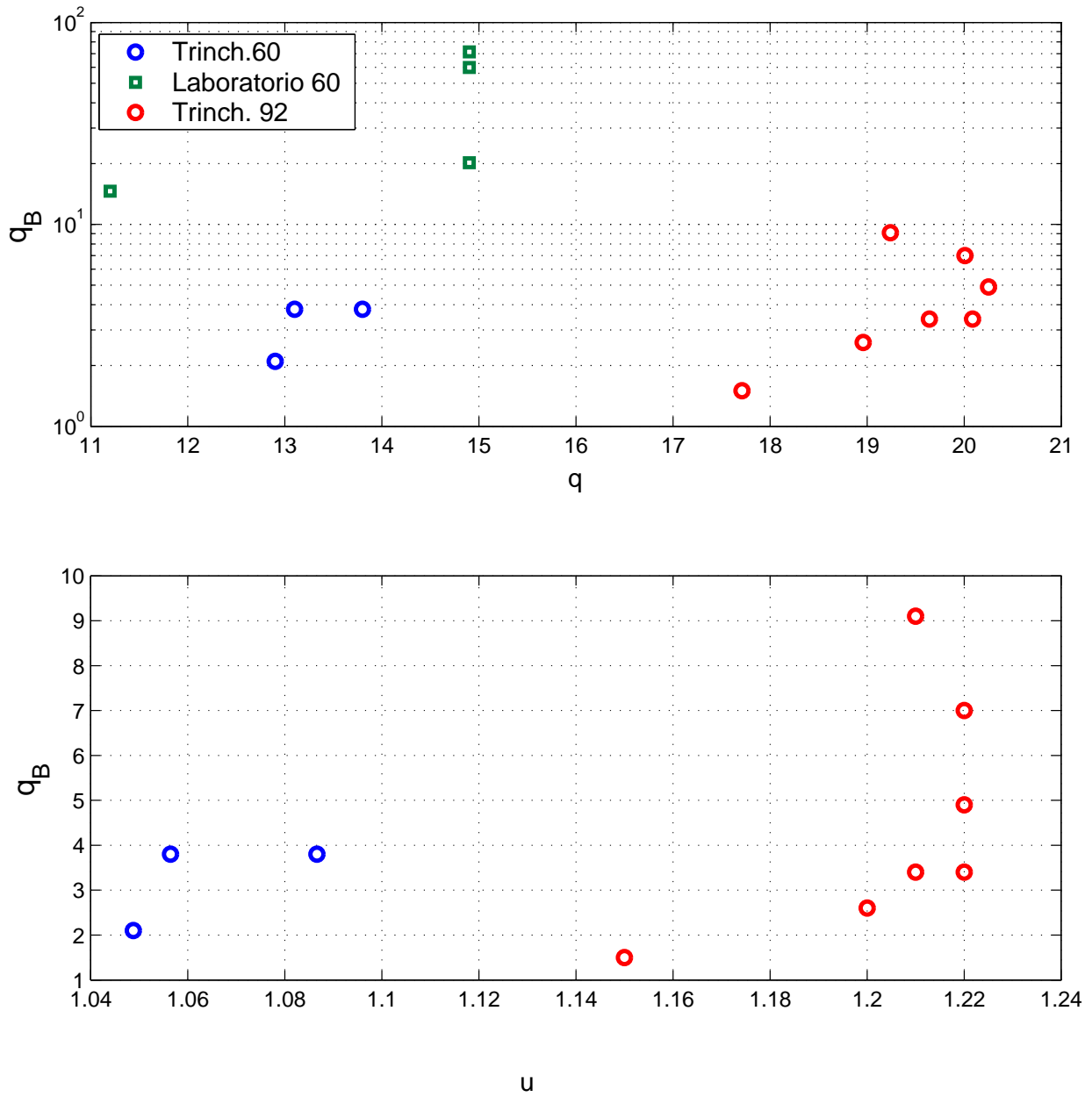


Figura 5.4: Arriba: Caudales sólidos de fondo estimados en ambas trincheras y en Laboratorio vs caudal líquido. Abajo: caudales sólidos de fondo vs velocidad de la corriente. Las velocidades  $u$  se encuentran en  $m/s$ ,  $q$  en  $m^2/s$  y  $q_B$  en  $m^2/dia$ .

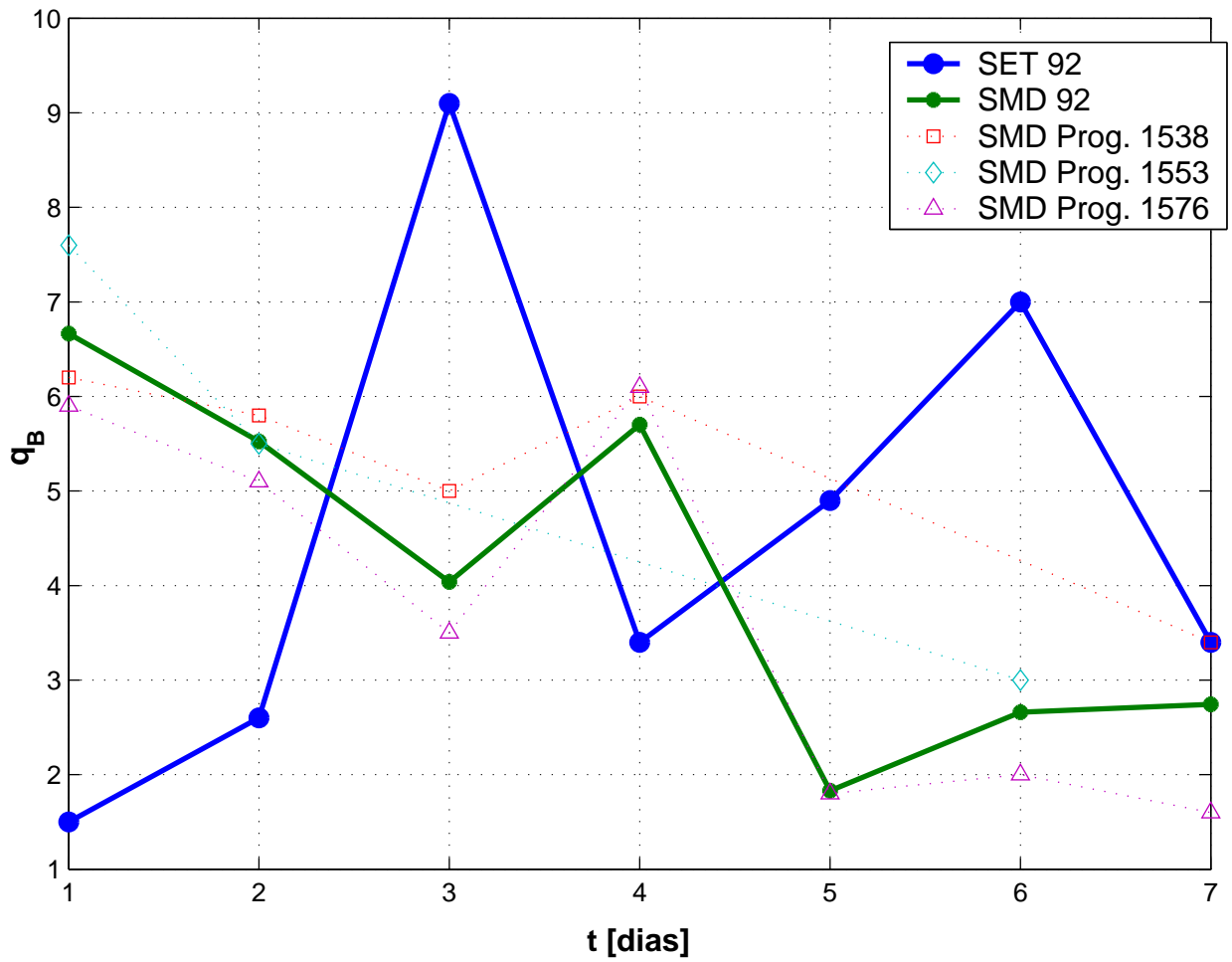


Figura 5.5: En azul, caudales sólidos de fondo calculado con los datos de la trinchera del año 1992 ; en verde, caudal sólido de fondo estimados por seguimiento de dunas, promediado en las tres progresivas ; caudal sólido de fondo calculado por seguimiento de dunas en cada una de las progresivas.  $q_B$  está en  $m^2/dia$ ,  $t$  en  $dias$  y  $q$  en  $m^2/seg$ .

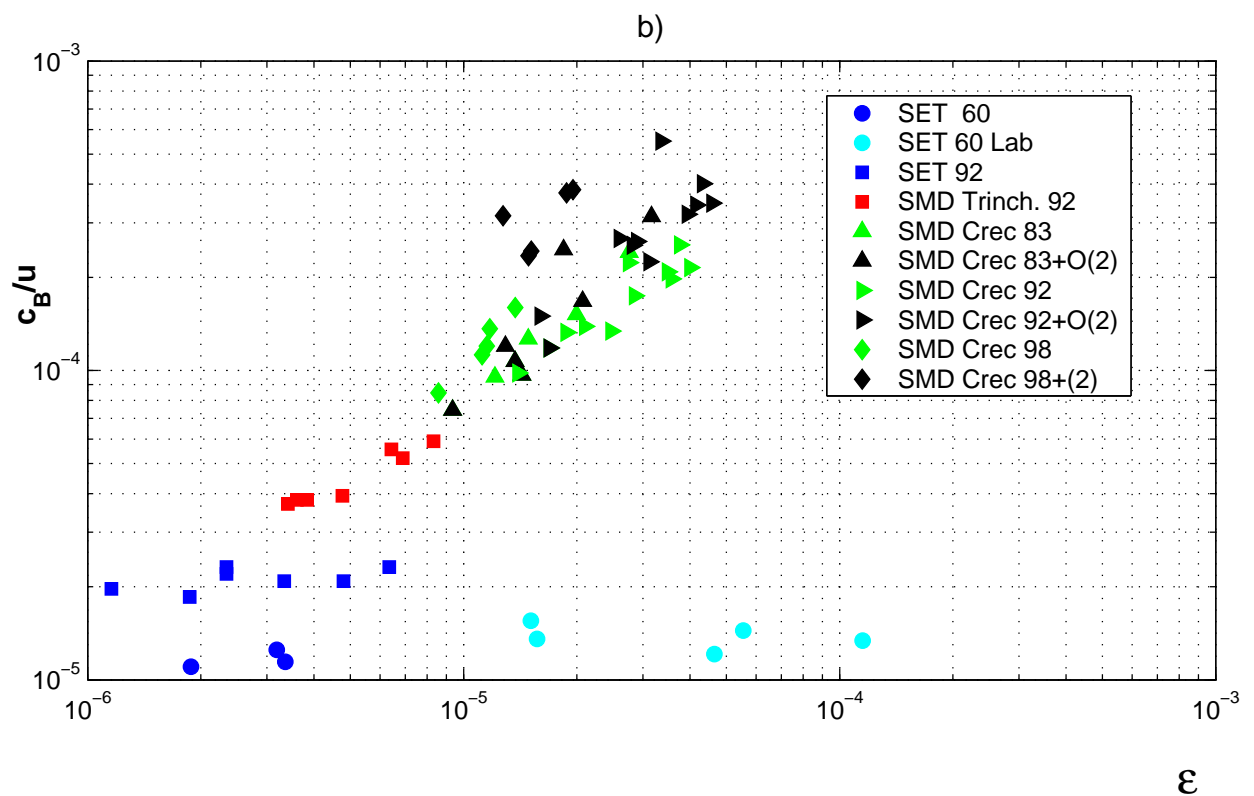
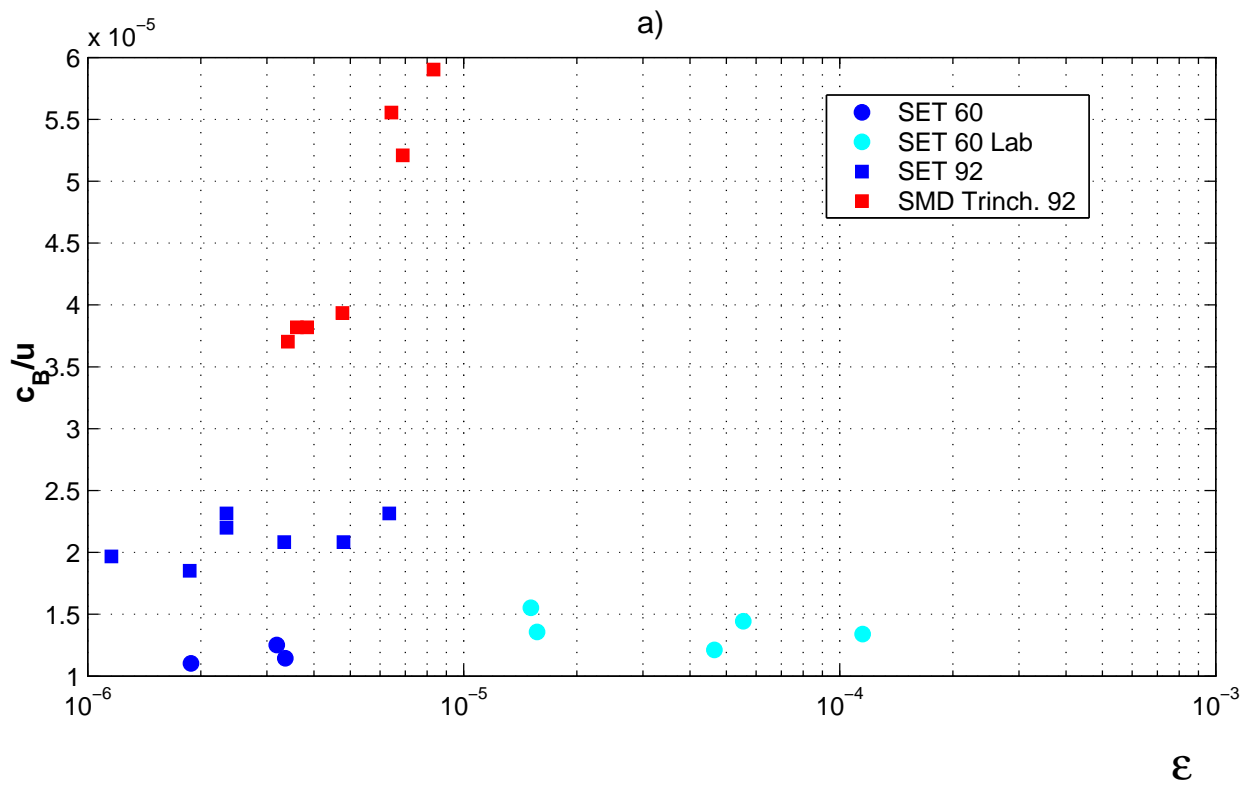


Figura 5.6: a) Parámetro de transporte estimado con los datos de trinchera relevadas en campo (azul), en laboratorio (celeste) y por seguimiento de dunas (rojo); b) comparación de los datos de a) con las estimaciones realizadas por SMD para las tres crecidas.

## Capítulo 6

# Comparación de las estimaciones de $q_B$ con las producidas por otras metodologías y/o investigadores

Como ya se mencionó anteriormente, varios autores realizaron estimaciones de  $q_B$  aplicando el método de seguimiento de dunas, tanto a datos de campo como a datos de laboratorio. Para el río Paraná, se realizaron varios estudios aplicando específicamente este método a los fines de conocer el orden de magnitud del caudal sólido. La información antecedente recopilada, y presentada en este Capítulo, fue agrupada junto a los demás resultados obtenidos en la presente Tesis para su posterior evaluación y comparación. Por tanto, entre los objetivos específicos perseguidos en este Capítulo, puede mencionarse lo siguiente:

1. Adicionar información de campo y de laboratorio a la recopilada hasta este punto.
2. Verificar, en lo posible, la incertidumbre presente en los datos y su posterior influencia en los resultados del transporte sólido de fondo.
3. Obtener conclusiones sobre la física del proceso que permitan ratificar o rectificar parte o la totalidad de la metodología imperante sobre el tema.

### 6.1. Datos de laboratorio

Se incluyen y analizan los resultados de las mediciones realizadas por Guy *et al*(1966) en las instalaciones del Laboratorio de Fort Collins, Colorado. Estos datos permiten evaluar el transporte de material del fondo por dos métodos distintos:

- Por un lado, se cuenta con mediciones de caudal sólido total obtenidas con una trampa de sedimentos a la salida del canal, y con mediciones de caudal sólido en suspensión realizadas con un muestreador integrador en la vertical. De la diferencia entre ambas surge la estimación del transporte sólido de fondo.
- Por otro lado se cuenta con un detallado análisis de las formas de fondo resultantes de distintas corridas, clasificadas como rizos, dunas, fondo liso, antidunas y rápidas. Se presentan datos de velocidad de desplazamiento y amplitud de las formas generadas. Por lo tanto, pudo estimarse el transporte sólido de fondo por el método de seguimiento de dunas, para su posterior contraste con las mediciones descriptas anteriormente.

## 6.2. Datos de campo

- Tramo Villa Urquiza, río Paraná:
  - Profundidades del fondo relevadas sobre los perfiles 3 y 5 (Figura 6.1) durante el período del 19/12/86 al 15/10/87, y procesados por Lima *et al* (1990).
  - Los mismos perfiles citados en el punto anterior, procesados por Amsler y Gaudin (1994), adicionando información sobre superposición de formas de distintas amplitudes. Los autores presentaron dos series de datos para cada progresiva relevada, una que tiene en cuenta la superposición y otra que no (Amsler y Gaudin 1994).
- Tramo Túnel, río Paraná:
  - Datos procesados por Stuckrath en el año 1969 (Stuckrath 1969).
  - Datos relevados por HYTSA en el año 1987, con motivo de los estudios básicos previos al proyecto de construcción del Gasoducto Mesopotámico (HYTSA 1987).
  - Datos relevados y procesados por la FICH, publicados en el año 1992 (Amsler 1992).

Todos estos datos se encuentran acompañados por la correspondiente medición de velocidad media del flujo.

### 6.3. Estimación de $q_B$ con datos de Laboratorio (Guy, Simons and Richardson, 1967)

Guy, Simons y Richardson (1966) publicaron los resultados de una extensa colección de mediciones experimentales realizadas en la Universidad del Estado de Colorado (Colorado State University), como parte de un proyecto de Investigación de la División de Recursos Hídricos del Servicio Geológico de los Estados Unidos (U.S. Geological Survey) entre los años 1956 y 1961. Los autores realizaron 339 corridas en dos canales de laboratorio de 2 y 8 *pies* de ancho con 10 condiciones de borde diferentes a los fines de determinar los efectos del tamaño del material del fondo, la temperatura del flujo y el sedimento fino en las variables hidráulicas y de transporte. Las simulaciones se realizaron partiendo de un lecho plano y sin transporte hasta un lecho con antidunas en flujo rápido. Las variables medidas fueron pendiente de la superficie libre, tirante hidráulico, caudal líquido, temperatura del agua, concentración de sedimento del lecho en suspensión, concentración del transporte sólido total, graduación del sedimento y configuración del fondo. También presentaron el cómputo de las velocidad media, distribución vertical de la velocidad, velocidad de corte, caudal sólido, viscosidad cinemática, tensión de corte en el fondo, número de Reynolds, número de Froude y coeficientes de resistencia. De la gran cantidad de información puesta a disposición de la comunidad científica desde entonces, se separó aquella que interesa a los fines de la presente Tesis. Así es que de la totalidad de las simulaciones se eligieron aquellas en las que la configuración del fondo correspondiera a dunas, para las gradaciones de sedimento correspondientes a 0.19, 0.27, 0.28, 0.32 y 0,33 *mm* (Figura 6.2), las que pueden asociarse a arenas presentes en distintos ríos de Estados Unidos, y que se encuentran dentro del rango de diámetros de las arenas del Paraná. No obstante, el parámetro crítico aquí no es la similitud entre arena de río y laboratorio, sino la movilidad.

El transporte de sedimento fue cuantificado por medio de mediciones de concentración de material sólido del fondo en suspensión y de material sólido de fondo total, a los que aquí se refiere como caudales sólidos de fondo en suspensión y total.

La concentración de material sólido del lecho en suspensión fue medida a unos 30 *m* de la cabecera del canal de 2,44 *m* de ancho y 45 *m* de largo, y a unos 11 *m* de la cabecera del canal de 0,61 *m* de ancho y 45 *m* de largo, con un muestreador integrador en profundidad especialmente preparado para estas mediciones. En algunos casos, dentro de los cuales se encuentran las configuraciones de dunas seleccionadas en el presente trabajo, las mediciones de material en suspensión presentaron mayor concentración que las medidas de concentración total. Esas diferencias son debidas a una

cantidad insuficiente de muestras, y a la posibilidad de que el muestreador se haya ubicado en una región donde las tensiones de corte locales por efecto turbulento hayan superado notablemente a los valores medios. La concentración total de sedimentos integrada en la profundidad y ancho fue medida con una trampa de sedimentos ubicada al final del canal. Solamente durante las simulaciones realizadas con material de diámetro medio 0,47 y 0,54  $mm$  se agregó material fino y se estimó el transporte de sedimento en suspensión como parte del transporte total. En las demás simulaciones el transporte de fondo es igual al caudal sólido total. La medición de la configuración del fondo consistió en la identificación de las clases de formas de fondo y en la medición de la longitud de onda, amplitud y velocidad de desplazamiento de éstas.

### 6.3.1. Sobre los valores medidos

Como ya se ha descrito anteriormente, el método de seguimiento de dunas considera al material del fondo que se arrastra por sobre la onda del lecho y aquel que circunstancialmente entra en suspensión en la zona de separación del flujo para luego depositarse aguas abajo de ésta. La diferencia entre el caudal sólido de fondo total medido y el caudal sólido de material del lecho en suspensión medido sería equivalente, en principio al transporte de material sólido de fondo estimado con el método de seguimiento de dunas. Respecto de los altos valores medidos de material del lecho en suspensión, los autores reconocen defectos en las mediciones por presentarse situaciones en las que el transporte en suspensión medido es mayor que el total, lo que indica que la carga suspendida puede estar sobreestimada.

## 6.4. Estimación de $q_B$ con datos de campo

Los datos estimados por los autores citados se contrastan con los obtenidos en la presente Tesis por medio del método SMD de dunas periódicas simples. Luego se seleccionaron los datos en cuyo análisis se incorpora el efecto de la superposición de formas (Amsler y Gaudin 1994) para compararse con los obtenidos en la presente Tesis.

### 6.4.1. Sobre los datos sin superposición

La Figura 6.3.a muestra la relación entre el parámetro de transporte y la celeridad adimensional de dunas  $c_B/u$ , para todos los datos seleccionados y los calculados en la presente Tesis, así como entre el parámetro de transporte y la amplitud adimensional de dunas  $\Lambda/h$  (Figura 6.3.c). Comparando ambos gráficos se observa que la celeridad adimensional ( $c_B/u$ ) presenta una relación



aproximadamente lineal con el parámetro de transporte ( $\epsilon$ ), lo que evidencia que el caudal sólido de fondo es más sensible a las variaciones de la celeridad de las dunas que a la amplitud de cada una de ellas.

Como ya lo mostró Marti (1998), los datos de laboratorio se encuentran alejados de los medidos en campo, por uno y dos órdenes de magnitud, magnificando el transporte de fondo. En la Figura 6.3.b se presentan los valores de  $q_B$  correspondientes a cada medición.

#### 6.4.2. Sobre los datos con superposición

Amsler y Gaudin (1994) realizaron cálculos aplicando la fórmula clásica de seguimiento de dunas, para luego considerar la superposición de formas de distintas amplitudes. Sus cálculos se basaron en la hipótesis de que las dunas de O(2), que se encuentran en el valle de una duna de O(1), son las que preservan su forma y movilidad luego de haber bajado por el talud del frente de avance de la duna de O(1) anterior. Por lo tanto, son estas ondas de O(2) las que generan el transporte de fondo adicional.

La Figura 6.4 (arriba) presenta un contraste de la relación entre el parámetro de transporte estimado solamente con las dunas de O(1) (rojo) y con las dunas de O(1) y O(2) y la celeridad adimensional de las dunas de O(1), también se presenta (6.4 abajo) la relación entre las amplitudes adimensionales de ambas jerarquías de dunas (abajo) y el parámetro de transporte.

### 6.5. Comentarios sobre las comparaciones

En la Figura 6.3 se han volcado datos obtenidos con el método SMD en campo y en laboratorio y el SET en campo y en laboratorio para estados de aguas medias y altas. Es notable el apartamiento presente entre los órdenes de magnitud de los datos medidos en campo de aquellos medidos en laboratorio, por lo que se puede observar:

- para los ensayos de laboratorio de SMD, tanto la celeridad  $c_B$  como el parámetro de transporte  $\epsilon$  se encuentran entre 1 y 2 órdenes por arriba de los medidos en campo.
- para ensayos de laboratorio de SET, siendo la celeridad del frente de avance de la trinchera del mismo orden que la medida en campo, el transporte de fondo es un orden de magnitud mayor.

La concordancia que muestran los valores estimados con SET y SMD (Figura 6.3) indican que el método SMD es un buen indicador de la carga de material del lecho que transporta el curso

fluvial.

En cuanto a la comparación entre los caudales sólidos estimados teniendo en cuenta la superposición de formas, la Figura 6.5.a y 6.5.b presentan la relación entre los caudales sólidos estimados con el seguimiento de dunas de  $O(2)$  y el caudal sólido total ( $q_{B2,1}/q_{Bt}$ ) respecto del caudal líquido unitario  $q$ . Se incluyen los valores de Amsler y Gaudin (1994) como referencia. Puede verse que los valores estimados en la presente Tesis revierten la tendencia creciente que tienen los estimados por Amsler y Gaudin (1994), y este defecto en las magnitudes puede deberse a las siguientes causas:

- Por un lado queda clara la diferencia metodológica; si bien Amsler y Gaudin (1994) presentan valores estimados en base a mediciones de celeridades de las pequeñas dunas en el valle de las grandes dunas donde éstas se deslizan a menor velocidad, los autores utilizaron la velocidad absoluta de estas pequeñas dunas en su cálculo, la cual es mucho mayor a la celeridad relativa implementada por deducción teórica en la presente Tesis.
- La incertidumbre inherente a la medición de la celeridad de las pequeñas dunas.
- La falta de datos antecedentes correspondientes a crecidas extraordinarias que permitan verificar la tendencia del proceso en situaciones de aguas altas.

A los fines de indagar sobre las posibles causas de las discrepancias se incorporaron los valores estimados por el método de diferencia de formas (ver Sección 4.3.6) y se realizaron comparaciones entre los resultados presentados en el Capítulo 4 con el SMD, y se rehicieron los cálculos utilizando las celeridades absolutas como lo hicieron Amsler y Gaudin (1994). Para mayor claridad a partir de aquí se denominan M1 al método SMD implementado en la Tesis, M2 al método por diferencia de formas y M3 al método SMD implementado con celeridad absoluta de las pequeñas dunas por Amsler y Gaudin (1994).

Los resultados de las comparaciones se muestran en las Figuras 6.5 y 6.6. La diferencia entre éstas es que la Figura 6.5 presenta los resultados de los cálculos realizados en cada duna de  $O(1)$  de cada progresiva, mientras que la Figura 6.6 presenta los mismos valores promediados en cada progresiva.

El contraste de los cálculos estimados por M1 y M2 (Figura 6.5.a,.b y .c) muestra que ambos mantienen un orden de magnitud semejante y la tendencia de ambos es similar, aunque los valores de M1 correspondientes a la crecida de 1992 resultaron más bajos que el resto. La Figura 6.5.d muestra las estimaciones realizadas con M3. Con esta última se observa una tendencia creciente de los valores semejante a los del Autor de referencia, indicando que la metodología implementada es la mayor fuente de diferencia entre los resultados.

La Figura 6.6 presenta los mismos datos aunque promediados en cada progresiva eliminando aquellas dunas cuyas celeridades estimadas fueran tan bajos que se consideraron *outliers* a los fines estadísticos y sacados del promedio final. En este caso los valores se encuentran algo menos dispersos.

Considerando que M2 es teóricamente aceptable, los resultados de M1 parecen asemejarse más a estos últimos que a los calculados con celeridad absoluta (M3). La Figura 6.7 muestra la dispersión presente en los valores estimados. La separación entre los valores mínimos, máximos y medios expuestos hablan de la incertidumbre presente en las estimaciones, que están lejos de presentar valores medios representativos. Partiendo de la considerable dispersión presente en las mediciones realizadas con las dunas de  $\mathcal{O}(1)$ , cuya incertidumbre en las mediciones puede considerarse baja, no es posible esperar mejores resultados para la estimación del transporte dado por las dunas de  $\mathcal{O}(2)$ , ya que estas pequeñas dunas son marcadamente tridimensionales y pequeños corrimientos del eje del relevamiento cambian mucho el perfil de sus formas y además, a medida que avanzan, es muy probable que varíen sus formas rápidamente, por lo tanto, resulta muy difícil identificar y reconocer la misma duna pequeña entre dos relevamientos secuenciales. En la Figura 6.7 vuelve a encontrarse mayor semejanza entre los valores estimados con M1 y con M2.

La Figura 6.8 muestra la variación de las celeridades con el caudal líquido, Figura confeccionada a los fines de comparar las magnitudes de las celeridades de las dunas de  $\mathcal{O}(1)$  y  $\mathcal{O}(2)$  estimadas en la presente Tesis por M1 y M2, estimadas por Amsler y Gaudin y por Sidorchuck (1999) en el río Vichegdá, Rusia. Este último autor en su trabajo realizó el seguimiento de tres jerarquías de formas, yendo de las menores a las mayores (rizos a dunas y a barras). Haciendo una comparación estricta con las formas de fondo aquí analizadas, se deberían comparar los valores de celeridad de rizados con los de dunas de  $\mathcal{O}(2)$  y de dunas con los de dunas de  $\mathcal{O}(1)$ , aunque, por características dimensionales e hidráulicas, se entiende que las comparaciones deberan ser entre dunas con dunas de  $\mathcal{O}(2)$  y barras con dunas de  $\mathcal{O}(1)$  (las dimensiones de las barras del río Vichegdá son menores a las grandes dunas del Paraná). En la Figura 6.8 se identifican las celeridades de los rizados con  $c_3$ , de las dunas con  $c_2$  y de las barras con  $c_1$ . Cabe mencionar que se excluyeron los valores de  $c_{B_2}$  considerados *outliers*.

La Figura 6.8.a muestra las celeridades de las dunas de  $\mathcal{O}(1)$  y de barras y dunas de Sidorchuck ( $c_1$  y  $c_2$  Sidor). La medición de estas variables tiene muy bajo error por lo que se consideran confiables. La Figura 6.8.b muestra las celeridades de las dunas de  $\mathcal{O}(2)$ , aquí se agregan las estimaciones realizadas por M2, para las cuales las celeridades se obtienen por despeje de la fórmula del SMD, ya que se conoce la amplitud media de las dunas  $\Lambda_2$ . En esta Figura todos los datos

presentan la misma tendencia, ocurriendo lo mismo con la Figura 6.8.c. Se nota una importante dispersión en los datos estimados con M1 y M2 (Figura 6.8.d), donde  $c_2/c_1$  para M1 varía entre 1.3 y 4.00, mientras que los datos de Amsler oscilan entre 2.4 y 4.3 y los de Sidorchuck entre 1.7 y 2.1, si se consideran las dunas sobre barras.

Estos resultados coinciden en señalar que el mayor problema a la hora de aplicar el SMD con diferenciación de formas jerárquicas estriba en la estimación de la  $c_{B_2}$  y por lo tanto de la  $c_{B_{1/2}}$ , debido a lo dificultoso que resulta seguir un tren de dunas pequeñas cuando los registros no son lo suficientemente frecuentes ni se alinean siempre sobre la misma línea de corriente.

## 6.6. Figuras



Figura 6.1: Zona Túnel: perfiles procesados en la presente Tesis. Zona Villa Urquiza: perfiles procesados por Lima y otros (1990) y luego por Amsler y Gaudin (1994).

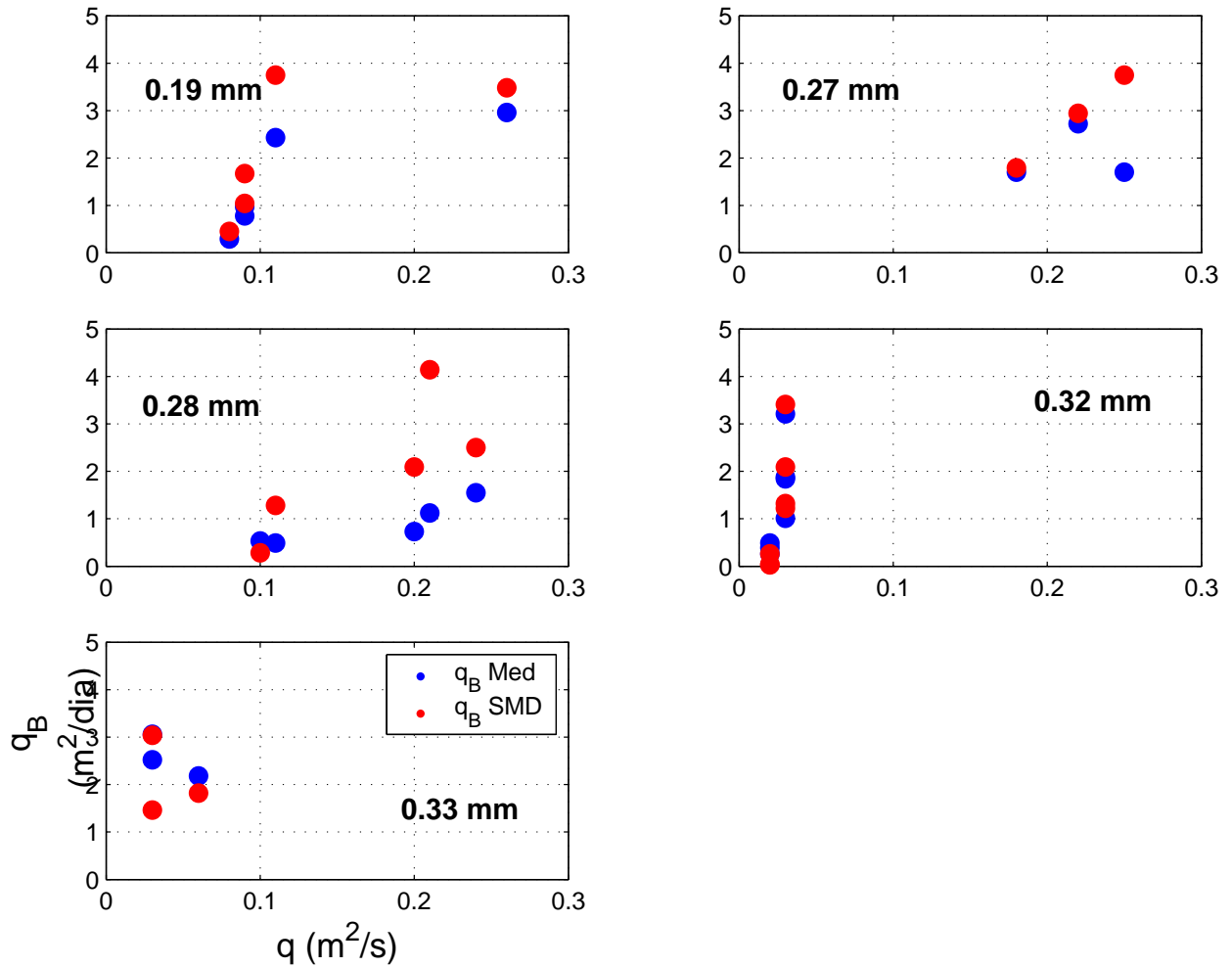


Figura 6.2: Caudales Sólidos de Fondo vs. Caudales Líquidos (datos tomados de Guy, Simons y Richardson, 1966): En azul, caudal sólido de fondo estimado como la diferencia entre el caudal sólido total medido y el caudal sólido en suspensión medido; en rojo, caudal sólido de fondo estimado por seguimiento de dunas.

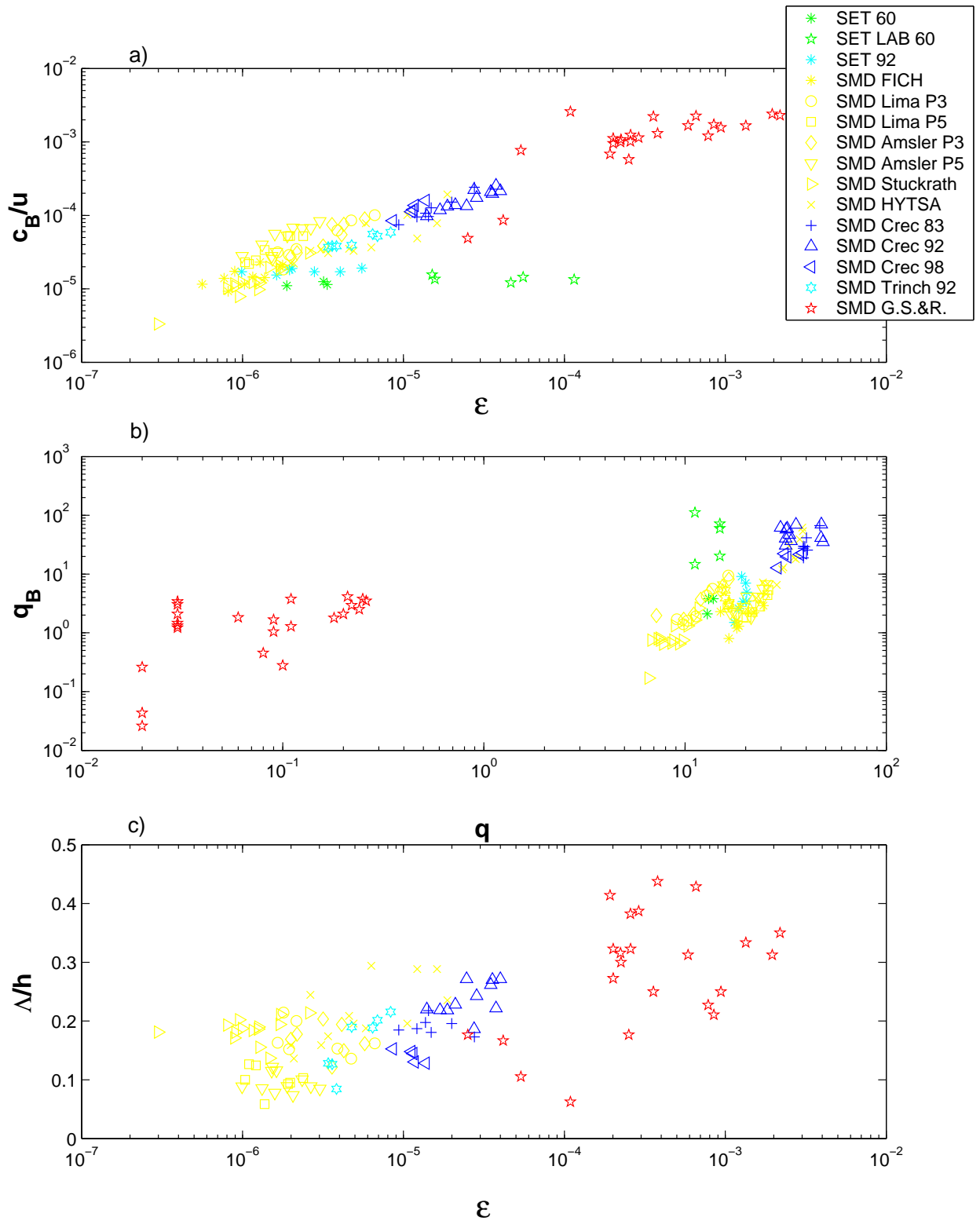


Figura 6.3: Arriba: Parámetro de Transporte vs. Celeridad adimensional; al medio: caudal sólido vs. caudal líquido; abajo: Parámetro de Transporte vs. Amplitud adimensional.

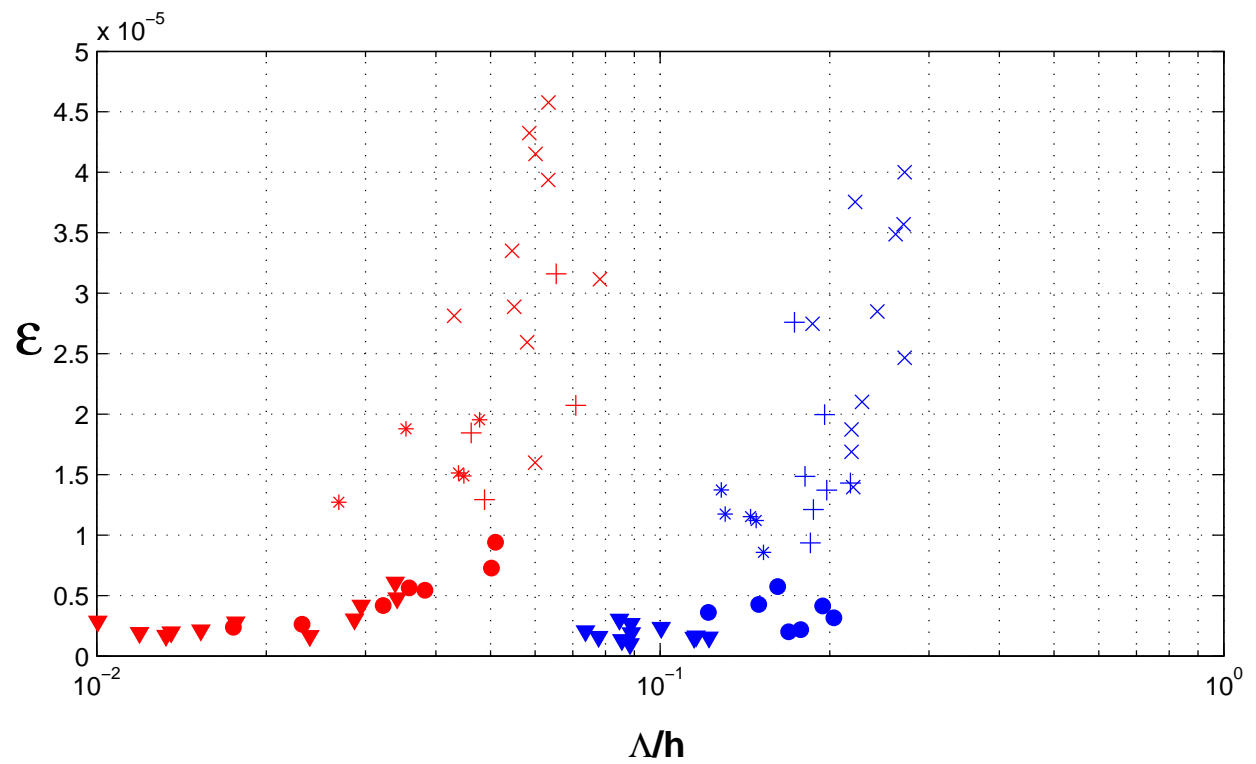
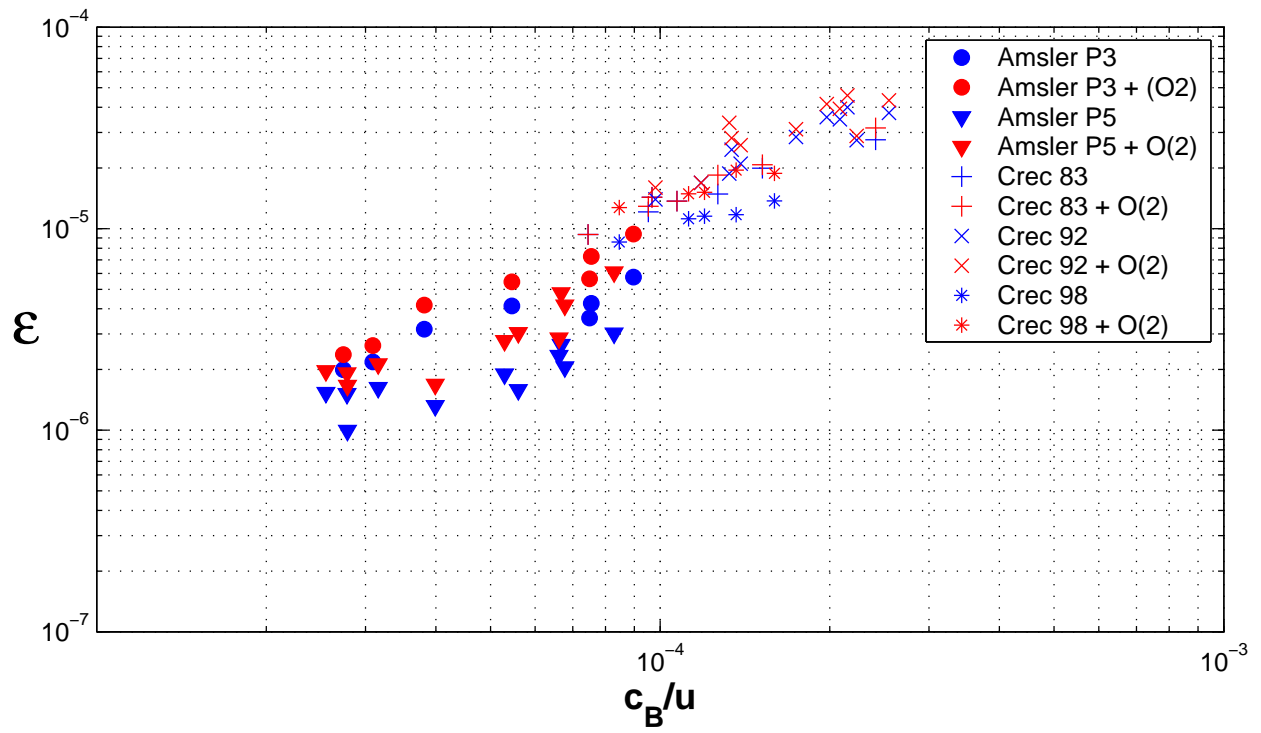


Figura 6.4: Parámetro de Transporte correspondiente a los caudales sólidos resultantes del aporte de las dunas de  $O(1) + O(2)$  vs celeridad adimensional de las dunas de  $O(1)$ .

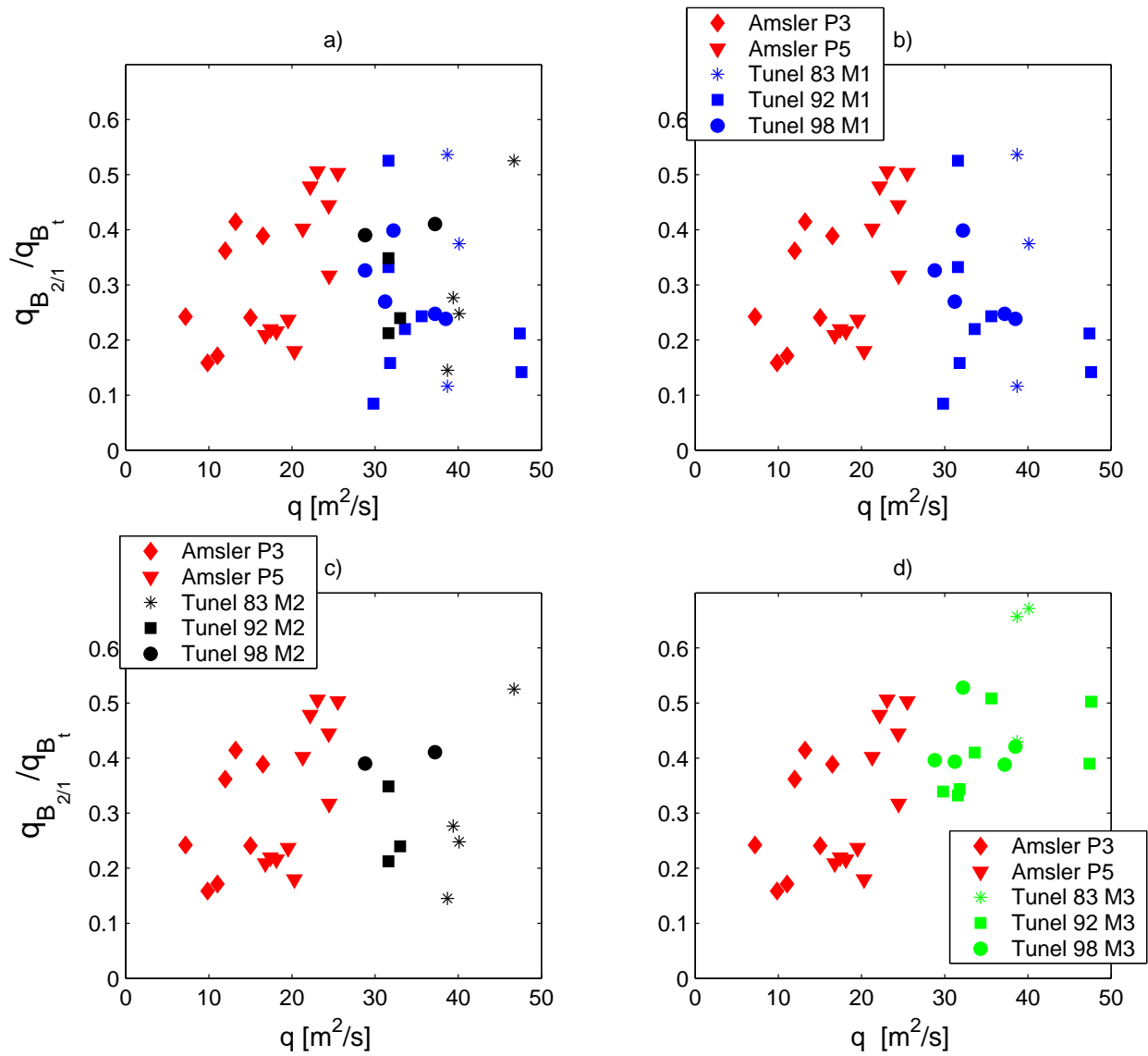


Figura 6.5: Proporción del caudal sólido aportado por las dunas de O(2) según Amsler y Gaudin (1994) y los resultados de la presente Tesis estimados duna por duna de la siguiente forma: a) por el método derivado de Sidorchuck (1990) y el método de diferencia de formas; b) por el método derivado de Sidorchuck (1990); c) por el método de diferencia de formas; d) por el método de Amsler y Gaudin (1994).



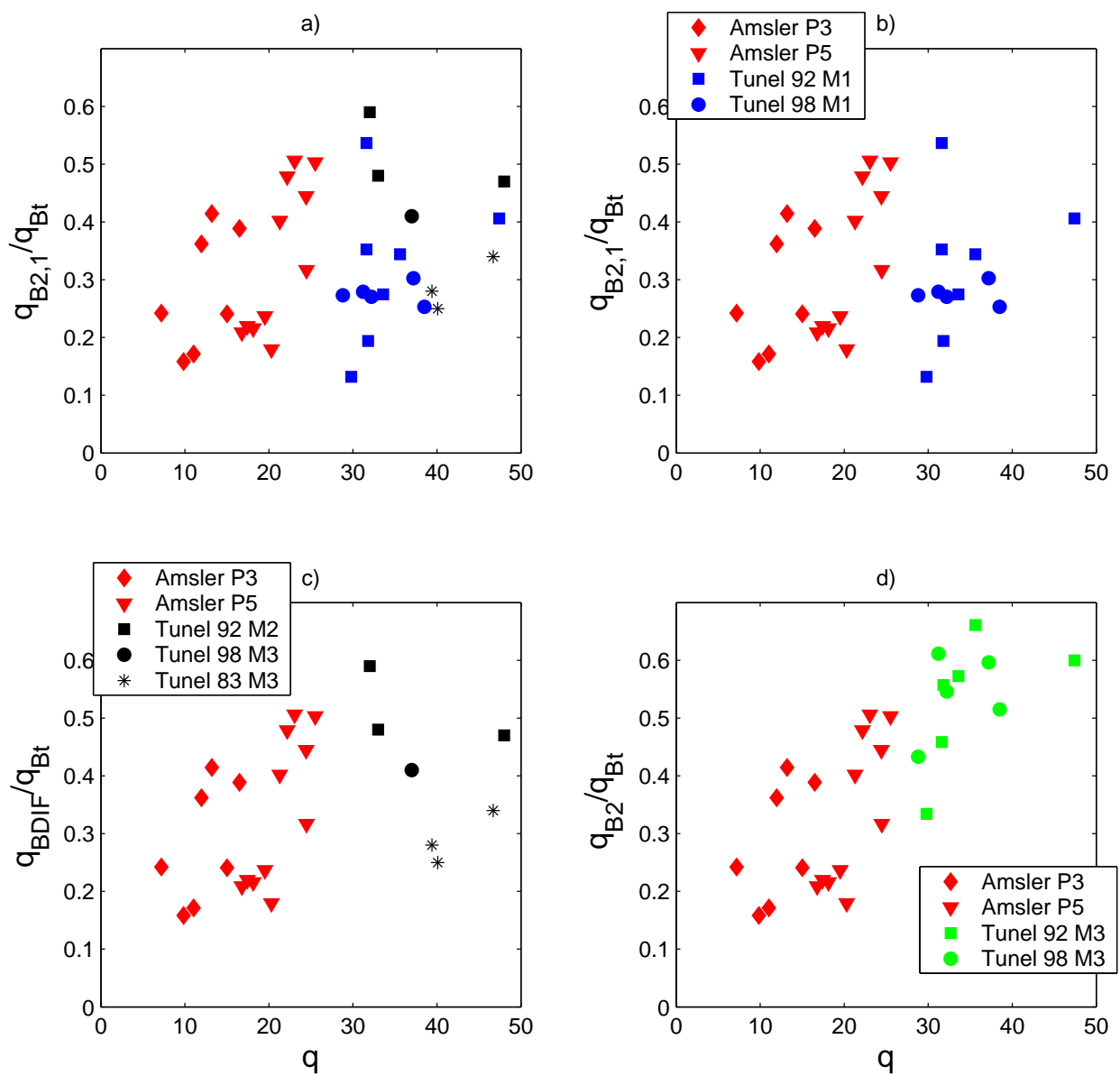


Figura 6.6: Proporción del caudal sólido aportado por las dunas de O(2) según Amsler y Gaudin (1994) y los resultados de la presente Tesis promediados en cada progresiva (ver Cuadros 4.5 y 4.6) y estimados de la siguiente forma: a) por el método derivado de Sidorchuck (1990) y el método de diferencia de formas; b) por el método derivado de Sidorchuck (1990); c) por el método de diferencia de formas; d) por el método de Amsler y Gaudin (1994).

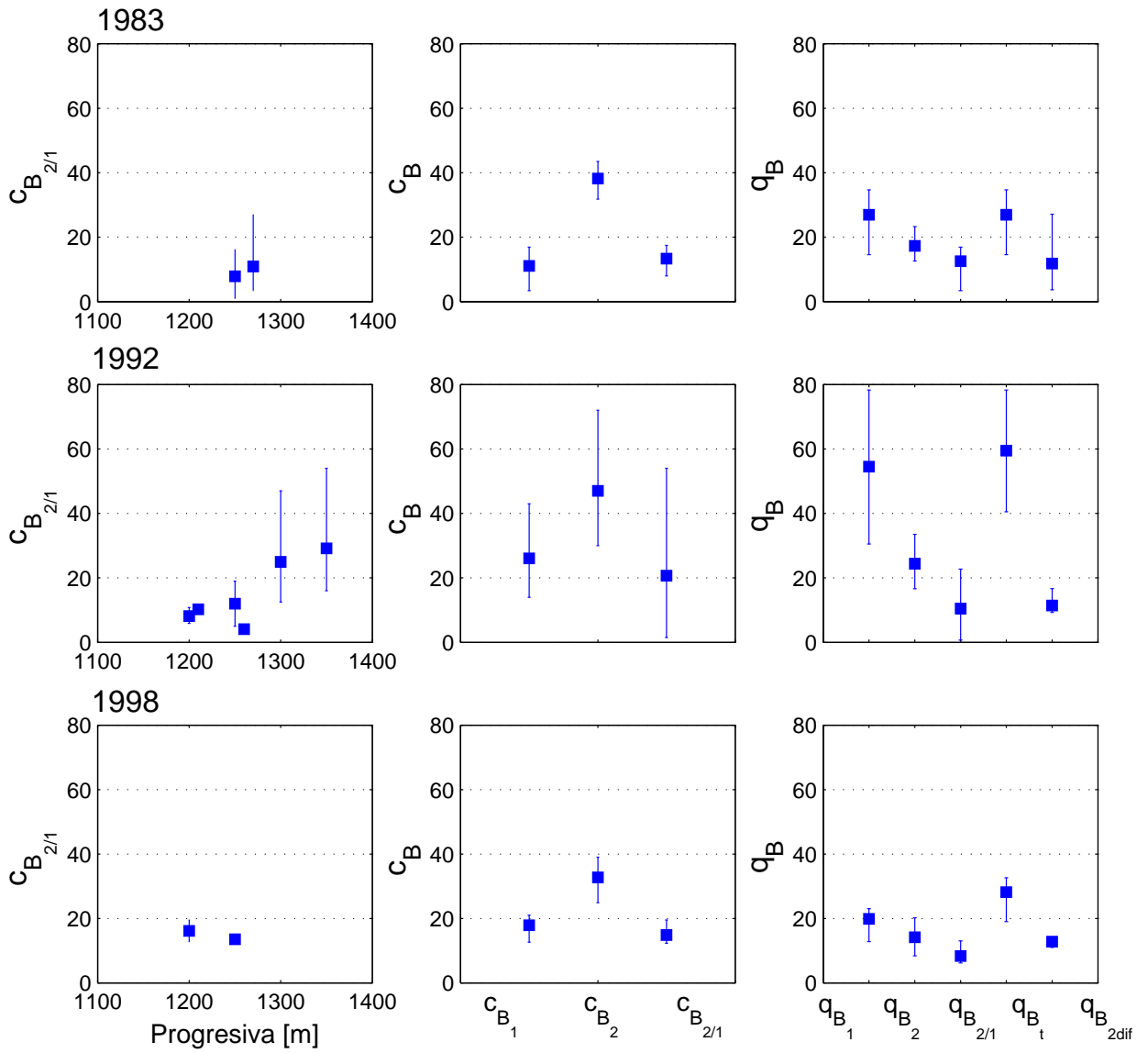


Figura 6.7: Dispersión de los valores estimados de celeridades y caudales sólidos de fondo: fila 1, crecida de 1983; fila 2, crecida de 1992; fila 3, crecida de 1998; columna 1, celeridades relativas estimadas duna por duna identificada en los registros; columna 2, celeridad de las dunas de  $\mathcal{O}(1)$ , de  $\mathcal{O}(2)$  absoluta y relativa; columna 3 caudales sólidos aportados por las dunas de  $\mathcal{O}(1)$ , por las de  $\mathcal{O}(2)$  con celeridad absoluta y relativa, caudal sólido total y estimado por diferencia de formas.

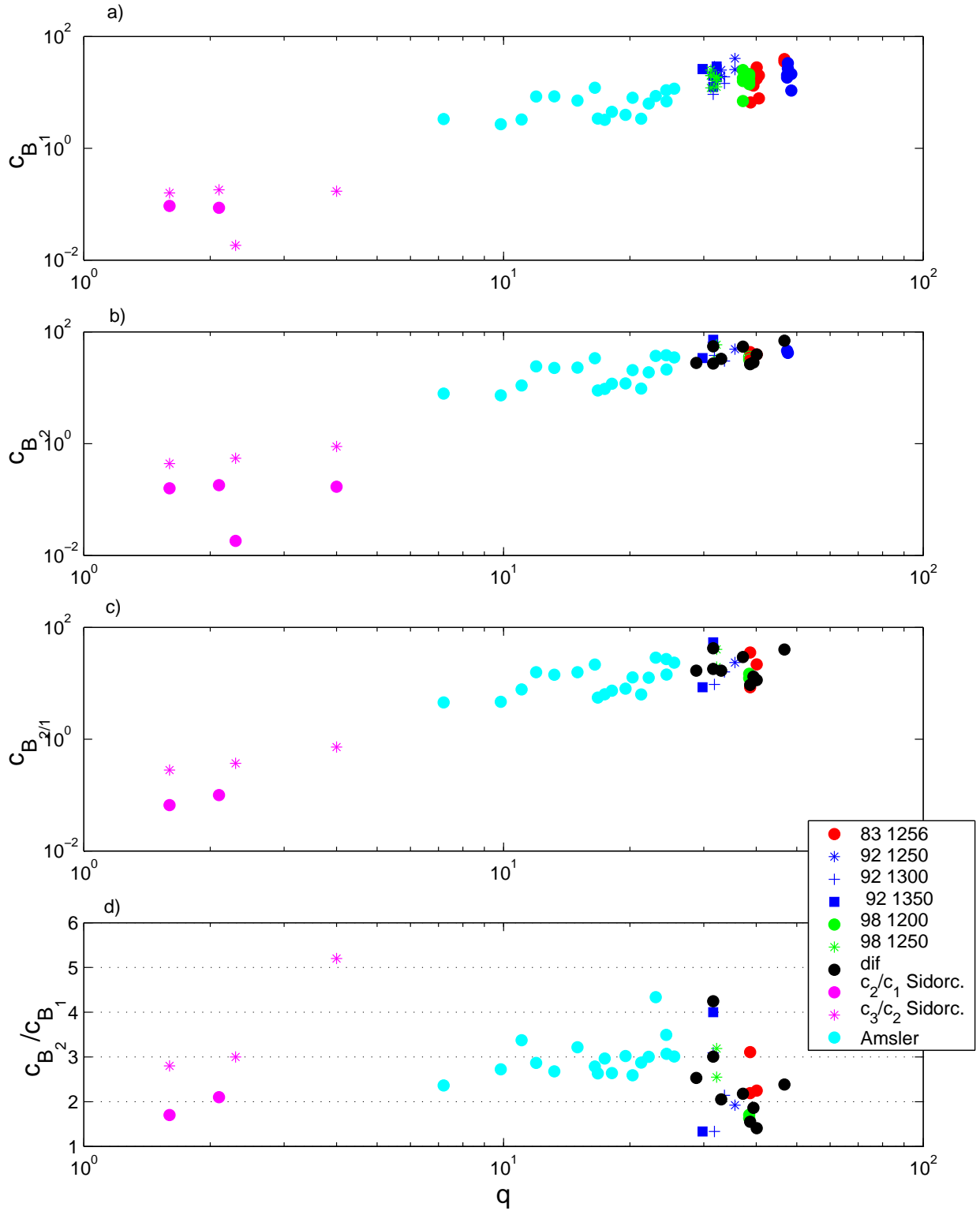


Figura 6.8: Celeridades de dunas vs. caudal líquido: a) Celeridades de las dunas de  $\mathcal{O}(1)$ ,  $c_1$ ; b) Celeridades de las dunas de  $\mathcal{O}(2)$ ,  $c_2$  c) Celeridades relativa  $c_{2/1}$  y d) Relación entre las celeridades de las dunas de  $\mathcal{O}(2)$  y las de  $\mathcal{O}(1)$ .

## Capítulo 7

# Estimación de $q_B$ en una zona divergente en planta y convergente en profundidad

El objetivo principal de este Capítulo consiste en estimar el caudal sólido de fondo  $q_B$  teniendo en cuenta la variación de la sección transversal de un tubo de corriente a medida que el transporte progresa aguas abajo. En la aplicación clásica del método, los datos empleados permiten estimar el transporte ignorando variaciones laterales en la sección transversal del tubo, al igual que cualquier cambio en la profundidad media del lecho. Por tanto, en este Capítulo se procesan los datos recolectados a los fines de realizar promediaciones en el sentido transversal, aunque filtrando las variaciones provocadas por la presencia del thalweg y de las zonas de taludes registradas en los relevamientos, que no se consideran para la presente Tesis. Al final del Capítulo se presenta la variación de la tasa de transporte de sedimento del fondo a lo largo de un perfil longitudinal representativo de todo el ancho del cauce. La estimación de los porcentajes de variación del caudal sólido de fondo, y del parámetro de transporte en función de los porcentajes de variación de la geometría de la sección transversal del cauce busca determinar la influencia de los cambios morfológicos de la sección transversal sobre la tasa de transporte, aspecto que no es frecuente encontrar en la bibliografía actual.

### 7.1. Descripción topográfica de la zona relevada

La zona relevada, presentada en el Capítulo 3, se caracteriza por una topografía cambiante tanto en el sentido longitudinal como transversal (Figura 7.1), debido a una divergencia en planta

y una convergencia en profundidad del perfil transversal, respectivamente. Las formas de fondo acompañan las variaciones geométricas del tramo de cauce, experimentando cambios en su longitud, amplitud y velocidad de desplazamiento. Las Figuras 7.2 y 7.3 muestran la geometría de las dunas encontradas en la zona y su variación a lo largo de cada trayectoria de las líneas de corriente, referenciadas como *línea nro* desde la margen entrerriana hacia la margen santafesina, teniendo en cuenta que el thalweg se encuentra cerca de la margen santafesina. Las Figuras 7.4 y 7.5 presentan dos proyecciones tridimensionales de las formas de fondo relevadas en la zona. Los cambios en la geometría de las dunas son notables no sólo por su tamaño sino también por su forma, que se vuelve irregular cuando se avanza desde la zona menos profunda hacia la más profunda, pudiéndose dividir al tramo en dos áreas, una que posee dunas de forma aproximadamente regular y otra que posee dunas de forma aproximadamente irregular (Figura 7.6). La irregularidad de las dunas quizás pueda deberse a que el aumento de velocidades y profundidades genere una coalescencia de formas no tanto estocástica, puesto que un análisis visual de los perfiles permite intuir la conformación de dunas mayores a partir de las pequeñas.

#### 7.1.1. División del área transversal en tubos de corriente

La determinación de las variables hidrosedimentológicas  $h$ ,  $u$ ,  $\Lambda$  y  $\Delta s$ , es decir, tirante hidráulico, velocidad de la corriente, amplitud de dunas, y desplazamiento de dunas, se realizó en puntos ubicados sobre los perfiles relevados. Dichos puntos se muestran en la Figura 7.7. El cálculo de la velocidad de la corriente, que se realizó por corridas de flotadores, como ya se detalló en el Capítulo 3, fue luego mejorado con un cálculo numérico realizado con el código computacional RMA2, previamente calibrado para el mismo tramo del río Paraná (Tassi 2001), con las condiciones de borde representativas de la hidrología del río en los días que se llevaron a cabo los trabajos de campo. Este cálculo permitió extrapolar las condiciones hidrodinámicas medias imperantes de la zona con mucha más certidumbre, al momento de los trabajos de campo. Los perfiles relevados a partir de la corrida de flotadores permitieron definir los tubos de corriente delimitados por las trazas en color rojo, tal como se observa en la Figura 7.7. Cada punto medido posee un valor de profundidad  $h$  y un valor de ancho del tubo de corriente  $B$ . Debido a la ley de conservación de la masa líquida, bajo la hipótesis de un flujo aproximadamente 1D, el caudal volumétrico  $Q = qB$ , debería mantenerse aproximadamente constante a lo largo de cada tubo de corriente. La Figura 7.8 muestra los valores de caudal volumétrico líquido calculado para cada punto y para cada perfil. Puede observarse que de las Líneas 1 a 7 los caudales mantienen un valor aproximadamente constante para cada línea de corriente, presentando las líneas 8 y 9 algunos desvíos de su valor medio. Los promedios y

desvíos estandar para cada perfil relevado se encuentran en el Cuadro 7.1. La Figura 7.8 también incluye la relación  $h/B$ , que define a las características geométricas dominantes en el tramo de cauce analizado: la convergencia en profundidad, es decir, la disminución de  $h$  con la progresiva, y la divergencia en planta, es decir, el aumento de  $B$  con la distancia. El producto  $Bh$  que constituye una medida del área transversal efectiva del tubo de corriente, puede o no mantenerse constante, dependiendo de la variación relativa de cada uno de los parámetros. Como puede verse en la misma figura, las áreas transversales se mantienen aproximadamente constantes para las líneas 2 a 7, experimentando pequeños cambios progresivos en los tubos 8 y 9, zona que concentra las mayores velocidades del flujo. Dado que casi en la mayoría de los puntos relevados, la magnitud del área transversal se mantiene prácticamente constante a lo largo del tubo de corriente, los cambios de velocidad del flujo, y por consiguiente, las variaciones del caudal líquido, podrían atribuirse exclusivamente a la pérdida de energía sufrida por el flujo por fricción. Puesto que las formas de fondo registradas en los tubos de corriente 8 y 9 exhiben un comportamiento significativamente diferente - mas irregulares - al de las formas observadas en los tubos de corriente vecinos (ver Figura 7.5), se consideró que las mismas representan *outliers* desde el punto de vista estadístico, y por tanto, fueron dejadas de lado en los análisis posteriores.

## 7.2. Estimación del $q_B$

El caudal sólido de fondo, presentado en la Figura 7.9, fue estimado por el SMD. A los fines de realizar el seguimiento de las formas de fondo, en este caso no resultó necesario escanear y escalar las fajas ecográficas, ya que los registros fueron transformados por un programa a datos digitales con coordenadas referenciadas al sistema Gauss Krüger al momento de las mediciones. Solo restó graficar la información digital y transformar los datos de profundidad del lecho respecto de la cota de la superficie libre, referenciando ambas lecturas al sistema del IGM. Como valores de los parámetros porosidad del material del lecho  $p$ , y coeficiente de forma de las dunas  $\sigma$ , se adoptaron los valores anteriormente mencionados.

### 7.2.1. Estimación de la velocidad de desplazamiento de las dunas $c_B$

La inspección visual de los perfiles longitudinales relevados en las distintas campañas permitió identificar las dunas y determinar sus desplazamientos. Luego, los gráficos de los registros de datos permitieron estimar longitudes y amplitudes de las ondas, así como sus velocidades de desplazamiento. Así fue como se confeccionó una tabla con datos medidos para cada una de las dunas

encontradas (Cuadro 7.3 y 7.4). Los valores de longitud ( $\lambda$ ), amplitud ( $\Lambda$ ), peralte ( $\Lambda/\lambda$ ) y celeridad de onda ( $c_B$ ), se presentan promediados en cada perfil (Cuadro 7.2), y ordenados del perfil 1 al 11 desde la margen entrerriana hacia la margen santafesina, donde se encuentran las mayores profundidades y mayores velocidades de la corriente. Cabe recordar que tanto 8 y 9 considerados *outliers* como los perfiles 10 y 11 que no presentan suficientes datos para medir celeridades fueron incluidos en éste Cuadro por poseer información afín.

Las celeridades de las dunas identificadas y el caudal sólido de fondo resultante, manifiestan variaciones en el sentido longitudinal, o sea que son afectados por el ensanchamiento del cauce.

### 7.2.2. Análisis del comportamiento de las variables sedimentológicas

Como puede verse en la Figura 7.9, los valores de caudal sólido de fondo por unidad de ancho resultantes de la aplicación del método de seguimiento de dunas registra variaciones significativas a lo largo de los tubos de corriente. La mayor variación se encuentra en la zona de mayor divergencia del flujo.

La Figura 7.10 muestra como cambia la celeridad de las dunas con la geometría del tubo de corriente, disminuyendo a medida que decrece la relación geométrica  $h/B$ . Podría inferirse, entonces, que en zonas donde el cauce aluvial sufre variaciones geométricas como las analizadas en este Capítulo, la variación del caudal sólido de fondo es más receptivo a cambios en el desplazamiento de las dunas que a cambios en su amplitud, valor que puede tomarse casi como una constante, característica ya vista en los Capítulos anteriores para estados de aguas altas. El parámetro de transporte  $\epsilon$ , resultante de la relación entre el caudal sólido de fondo y el caudal líquido, ambos decrecientes en el sentido de la corriente, no presenta tal comportamiento. El mismo se mantiene en valores similares a lo largo de cada perfil relevado. La Figura 7.11 muestra la relación entre el parámetro de transporte y la celeridad adimensional.

### 7.3. Relación entre $q_B$ y la geometría del cauce

En función de los valores promediados, graficados en las Figuras 7.12 y 7.10, puede verse que las relaciones  $q_B/Q_0 = f_1(S)$ ,  $h/B = f_2(S)$  y  $hB/h_0B_0 = f_3(S)$  miden la influencia de la cambiante geometría del cauce sobre el caudal líquido, casi como la competencia que se establece entre  $h$  y  $B$  por mantener el área transversal del tubo aproximadamente constante, aunque levemente creciente, respectivamente.

Para cuantificar su efecto, y en lugar de emplear las fórmulas del Capítulo 2, es plausible postular

que la relación clásica del cálculo del transporte de fondo se mantiene en estas nuevas condiciones, es decir  $\epsilon = \frac{q_B}{nuh} = \sigma \frac{\Lambda}{h} \frac{c_B}{u}$

En este caso, en lugar de adimensionalizar  $q_B$  con respecto a  $u_0 h_0$ , se tomó el flujo unitario unidireccional  $uh$  en dirección del tubo de corriente, bajo el supuesto que se verifica  $u_0 h_0 B_0 \cong uhB$  (Figura 7.12.a) con un efecto por divergencia en planta no apreciable. En la Figura 7.13.d se aprecia la variación del parámetro de transporte  $\epsilon$  con la distancia recorrida, mientras que en la misma Figura 7.13.e) y .f) se muestra lo mismo únicamente que en lugar de  $S$  se emplearon las relaciones  $B/B_0 = f_2(S)$  y  $h(S)/h_0 = f_3(S)$  que expresan el efecto de la divergencia.

Llegando a éstas relaciones, se propone introducir las a la estimación de la carga sólida de fondo en función de reemplazar las variables  $\Lambda(S)$  y  $c_B(S)$  por variables de mas sencilla obtención, como son las geométricas. Debido a que la variable  $\Lambda(S)$ , evaluada en su forma adimensional como  $\Lambda(S)_i/h(S)_i$  en la Figura 7.10.a) no manifiesta significativa variación con la divergencia, se propone reemplazarla por su valor medio  $\bar{\Lambda} = 1/L \sum \Lambda(S)_i$

La variable  $c_B(S)$  puede ser reemplazada por una función de la variable adimensional  $B(S)_i/B_0$ , o de  $h(S)_i/h_0$  o de ambas

$$c_B(S) = f(f_2(B(S)/B_0); f_3(h(S)/h_0))$$

Luego de algunas pruebas se ha encontrado que dicha función puede ser una combinación lineal, mostrándose como ejemplo la expresión

$$q_B = \sigma(1 - p)\bar{\Lambda}c_{B_0} \left( 0,4 \left( \frac{L - S}{L} \right) \frac{h(S)}{h_0} + \frac{B_0}{B(S)} \right) \quad (7.1)$$

donde  $L$  es la longitud del tramo.

La Figura 7.14 muestra la variación de los valores de  $q_B(S)$  y de la expresión (7.1).

Hasta aquí se ha intentado entender el comportamiento del transporte del material del fondo en un tramo de río con geometría cambiante. El análisis de las variables hidrosedimentológicas medidas en campo ha permitido encontrar relaciones entre el transporte y la geometría que son valiosas al momento de comenzar a tratar de entender la física que domina al transporte de material del lecho. La expresión 7.1 confeccionada sólo intenta plasmar la influencia que los parámetros geométricos tienen sobre el transporte sin pretender presentarse como una función de pronóstico. A estos fines, la evaluación aquí presentada se considera escasa.

## 7.4. Cuadros y Figuras



	$Q(m^3/s)$		Area ( $m^2$ )	
	Media	Desvío	Media	Desvío
Tubo 2	408	49.5	322.1	44.8
Tubo 3	487	66.2	377.5	10.6
Tubo 4	472	22.8	364.7	17.0
Tubo 5	475	24.2	360.0	41.1
Tubo 7	749	44.7	578.6	57.5
Tubo 8	1055	167.3	812.7	177.0
Tubo 9	1509	153.9	1165.0	617.0

Cuadro 7.1: Caudal Líquido Volumétrico medio y Área Transversal media para cada tubo de corriente definido.

Perfil Long.	$\lambda[m]$	$\Lambda[m]$	$\Lambda/\lambda[adim]$	$c_B [m/d]$
1	35	1.1	0.036	—
2	37	1.3	0.037	0.920
3	43	1.4	0.035	0.170
4	52	1.5	0.030	1.030
5	55	2.0	0.038	1.404
6	54	2.0	0.034	—
7	64	2.0	0.033	0.919
8	90	2.0	0.025	0.492
9	119	2.4	0.021	1.105
10	131	2.2	0.018	—
11	73	2.7	0.041	—

Cuadro 7.2: Dimensiones y celeridades medias de las dunas en cada perfil longitudinal relevado.

	Prog.	$B$	$h$	$u$	$q$	$\Lambda$	$c_B$	$q_B$	$c$	$\epsilon$
	[m]	[m]	[m]	[m/s]	[m <sup>2</sup> /s]	[m]	[m/d]	[m <sup>2</sup> /d]	[adim]	[adim]
Línea 2	235	17.2	13.98	1.39	19.43	1.5	1.05	0.62	8.7E-06	3.7E-07
	279	18.7	13.06	1.39	18.09	1.3	1.26	0.65	1.1E-05	4.2E-07
	327	22.3	12.21	1.38	16.80	1.3	1.05	0.54	8.8E-06	3.7E-07
	367	25	11.75	1.37	16.06	1.3	1.37	0.71	1.2E-05	5.1E-07
	479	32.5	10.95	1.33	14.56	1.7	0.84	0.57	7.3E-06	4.50E-07
	528	36.5	10.21	1.30	13.27	1.1	1.05	0.46	9.3E-06	4.0E-07
	565	36.8	10.06	1.28	12.88	1.5	1.05	0.62	9.5E-06	5.60E-07
	612	38.4	9.40	1.26	11.84	1.4	0.95	0.53	8.7E-06	5.1E-07
	654	39.5	8.90	1.24	11.04	1.5	0.84	0.50	7.8E-06	5.20E-07
	681	39.9	7.88	1.22	9.61	1.3	0.84	0.43	8.0E-06	5.2E-07
	726	41.9	8.12	1.20	9.74	1.6	0.84	0.53	8.1E-06	6.30E-07
	772	44.7	7.68	1.18	9.06	1.4	0.63	0.35	6.2E-06	4.5E-07
	843	47.4	6.84	1.15	7.87	1.6	0.63	0.40	6.3E-06	5.9E-07
891	48.9	6.66	1.13	7.53	1.6	0.42	0.27	4.3E-06	4.10E-07	
Línea 3	91	24.1	15.62	1.58	24.60	1.7	0.95	0.64	7.0E-06	3.0E-07
	245	27.1	14.58	1.39	20.28	1.7	1.16	0.78	9.7E-06	4.5E-07
	441	31.5	11.92	1.35	16.10	1.6	0.32	0.20	2.7E-06	1.5E-07
	602	36.4	10.11	1.27	12.79	1.9	0.26	0.20	2.4E-06	1.8E-07
	753	44.2	8.26	1.20	9.91	1.7	0.11	0.07	1.1E-06	8.6E-08
	921	56.6	6.79	1.13	7.65	1.7	0.00	0.00	0.0E+00	0.0E+07
	974	61.5	6.15	1.10	6.77	0.8	0.00	0.00	0.0E+00	0.0E+00
Línea 4	201	24.4	14.64	1.40	20.50	1.7	2.11	1.42	1.7E-05	8.0E-07
	315	26.8	13.62	1.37	18.71	1.2	1.68	0.80	1.4E-05	4.9E-07
	388	28.4	13.05	1.36	17.72	2.3	1.26	1.15	1.1E-05	7.5E-07
	444	28.6	12.39	1.34	16.60	2.4	1.26	1.20	1.1E-05	8.3E-07
	487	29.5	11.46	1.32	15.12	0.9	0.95	0.34	8.3E-06	2.6E-07
	521	30.1	11.41	1.30	14.87	1.3	1.05	0.54	9.3E-06	4.2E-07

Cuadro 7.3: Geometría de la divergencia-convergencia, celeridades , caudales sólidos de fondo y parámetros de transporte en las trayectorias relevadas

	Prog.	$B$	$h$	$u$	$q$	$\Lambda$	$c_B$	$q_B$	$c$	$\epsilon$
	[m]	[m]	[m]	[m/s]	[m <sup>2</sup> /s]	[m]	[m/d]	[m <sup>2</sup> /d]	[adim]	[adim]
	624	35.2	10.53	1.26	13.31	1.7	0.84	0.57	7.7E-06	4.9E-07
	685	37.8	10.16	1.24	12.61	1.9	0.63	0.47	5.9E-06	4.4E-07
	753	40.1	9.25	1.21	11.22	1.9	0.42	0.32	4.0E-06	3.3E-07
	861	49.7	7.90	1.17	9.26	1.4	0.11	0.06	1.1E-06	7.6E-08
Línea 5	76	17.9	16.85	1.59	26.84	2.2	1.79	1.56	1.3E-05	6.7E-07
	271	22.9	15.51	1.39	21.53	2.2	1.89	1.65	1.6E-05	8.9E-07
	444	27.1	12.73	1.33	16.98	2.1	1.58	1.31	1.4E-05	9.0E-07
	566	34.7	9.90	1.28	12.63	2.2	1.68	1.46	1.5E-05	1.3E-06
	766	43.0	9.59	1.23	11.79	1.8	0.84	0.60	7.9E-06	5.9E-07
	929	50.3	7.99	1.17	9.32	1.9	0.63	0.47	6.2E-06	5.9E-07
Línea 7	237	35.5	15.44	1.42	21.99	2.5	1.26	1.25	1.0E-05	6.6E-07
	381	37.4	13.54	1.38	18.66	1.4	1.58	0.88	1.3E-05	5.4E-07
	462	41.6	12.48	1.36	16.95	1.3	1.89	0.97	1.6E-05	6.6E-07
	562	47.5	11.47	1.32	15.15	1.4	1.26	0.70	1.1E-05	5.3E-07
	726	57.4	9.91	1.27	12.62	1.5	0.63	0.37	5.7E-06	3.4E-07
	783	60.6	10.40	1.26	13.09	2.0	0.63	0.50	5.8E-06	4.4E-07
	846	65.7	8.76	1.24	10.89	1.8	0.84	0.60	7.8E-06	6.4E-07
	883	69.2	9.28	1.23	11.41	1.8	0.84	0.60	7.9E-06	6.1E-07
	940	75.3	8.93	1.21	10.79	2.1	0.74	0.62	7.1E-06	6.6E-07
Línea 8	268	38.3	16.56	1.42	23.47	3.0	1.05	1.25	8.6E-06	6.2E-07
	409	44.4	14.00	1.38	19.25	2.1	0.21	0.17	1.8E-06	1.1E-07
	706	71.0	12.27	1.28	15.73	2.3	0.00	0.00	0.0E+00	0.0E+00
	822	82.6	11.10	1.26	13.93	2.3	0.00	0.00	0.0E+00	0.0E+00
	1004	97.0	10.51	1.22	12.81	1.8	0.00	0.00	0.0E+00	0.0E+00
Línea 9	268	54.6	16.64	1.40	23.26	3.0	1.53	1.82	1.3E-05	9.0E-07
	467	76.6	14.49	1.37	19.81	2.4	1.53	1.45	1.3E-05	8.5E-07
	572	86.5	13.56	1.25	16.95	2.4	0.74	0.70	6.9E-06	4.8E-07
	765	102.3	12.59	1.28	16.09	2.6	0.74	0.76	6.7E-06	5.5E-07
	992	117.4	11.45	1.22	13.95	2.0	1.00	0.79	9.5E-06	6.6E-07

Cuadro 7.4: Geometría de la divergencia-convergencia, celeridades , caudales sólidos de fondo y parámetros de transporte en las trayectorias relevadas

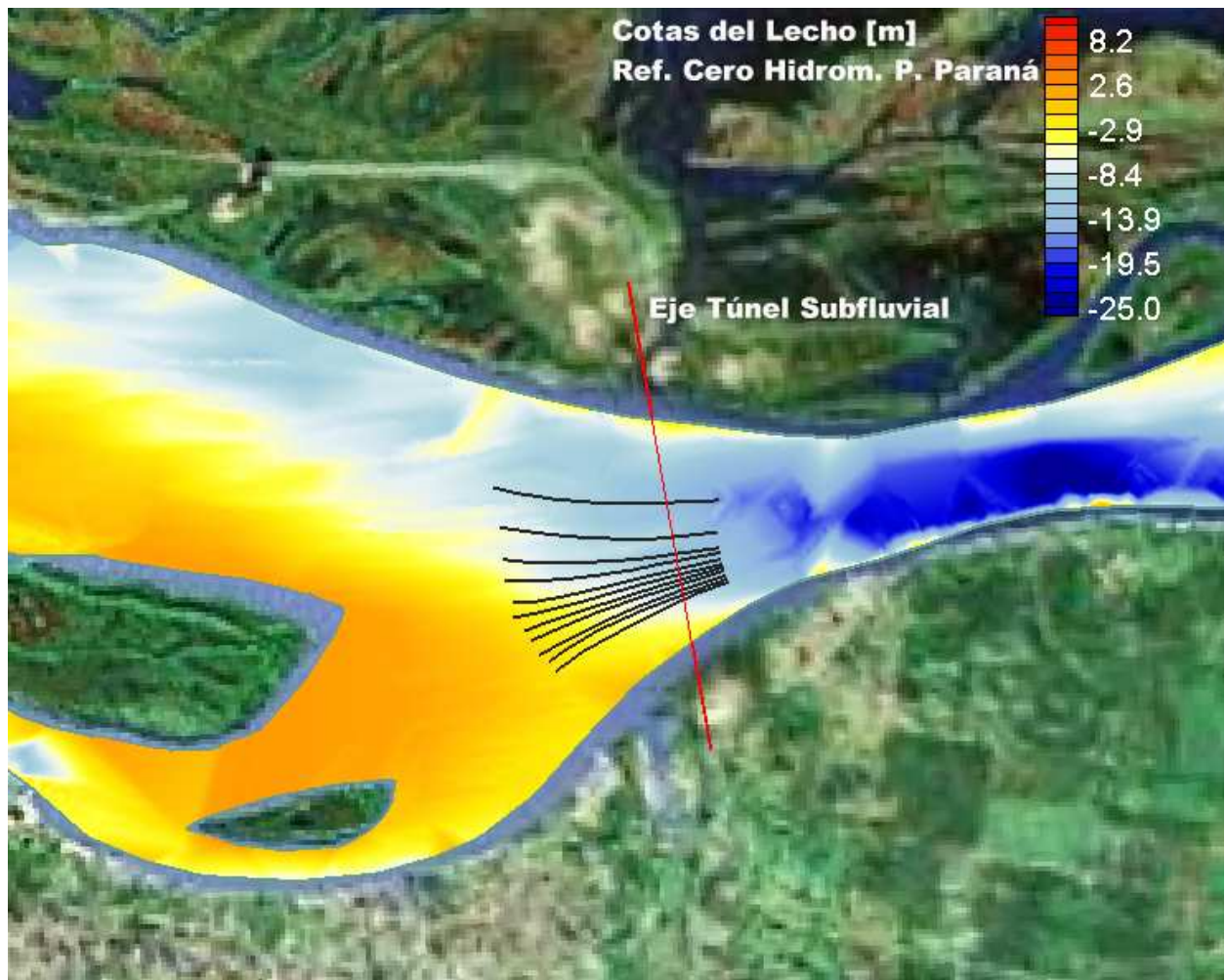


Figura 7.1: Perfiles longitudinales relevados.

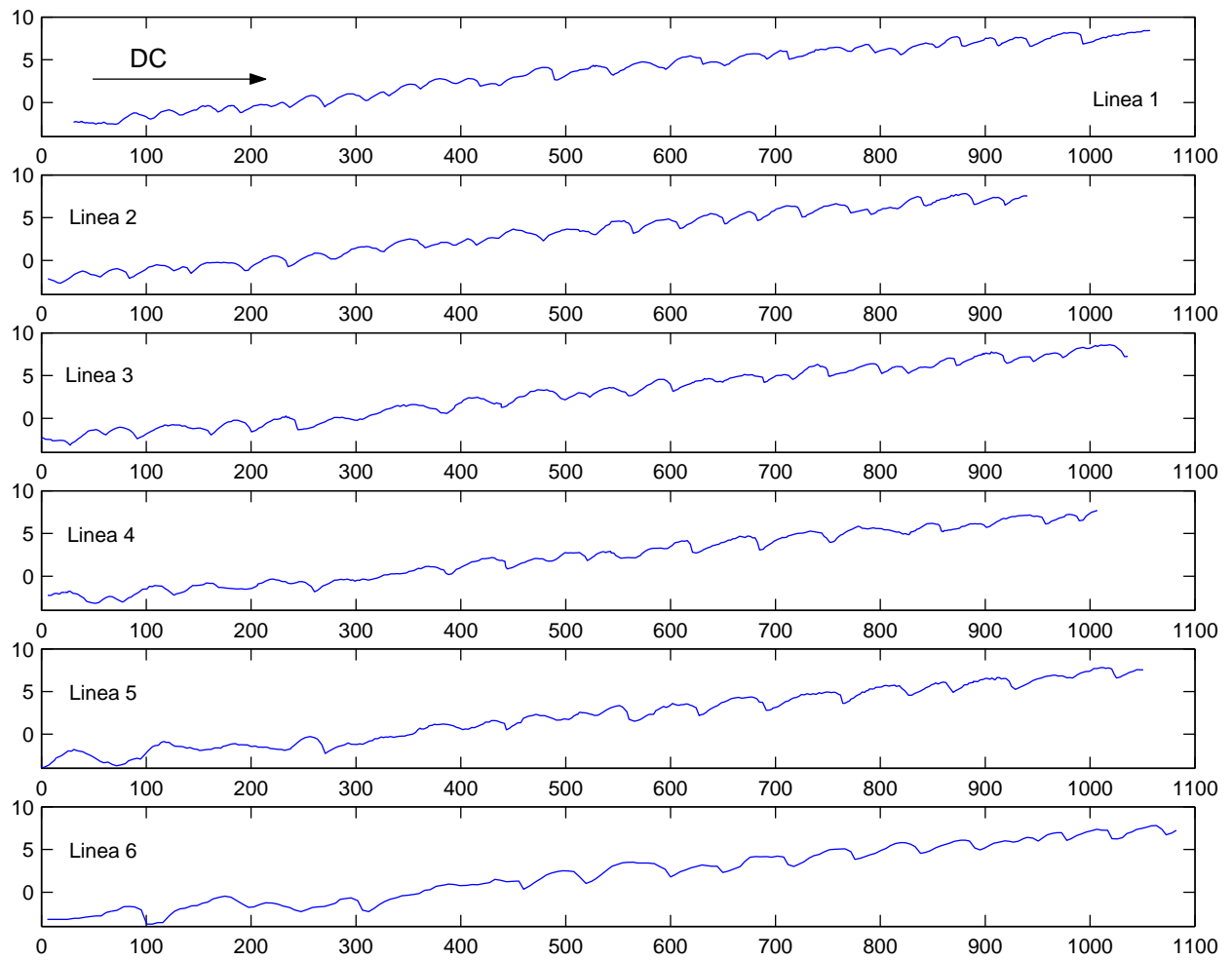


Figura 7.2: Perfiles longitudinales relevados.

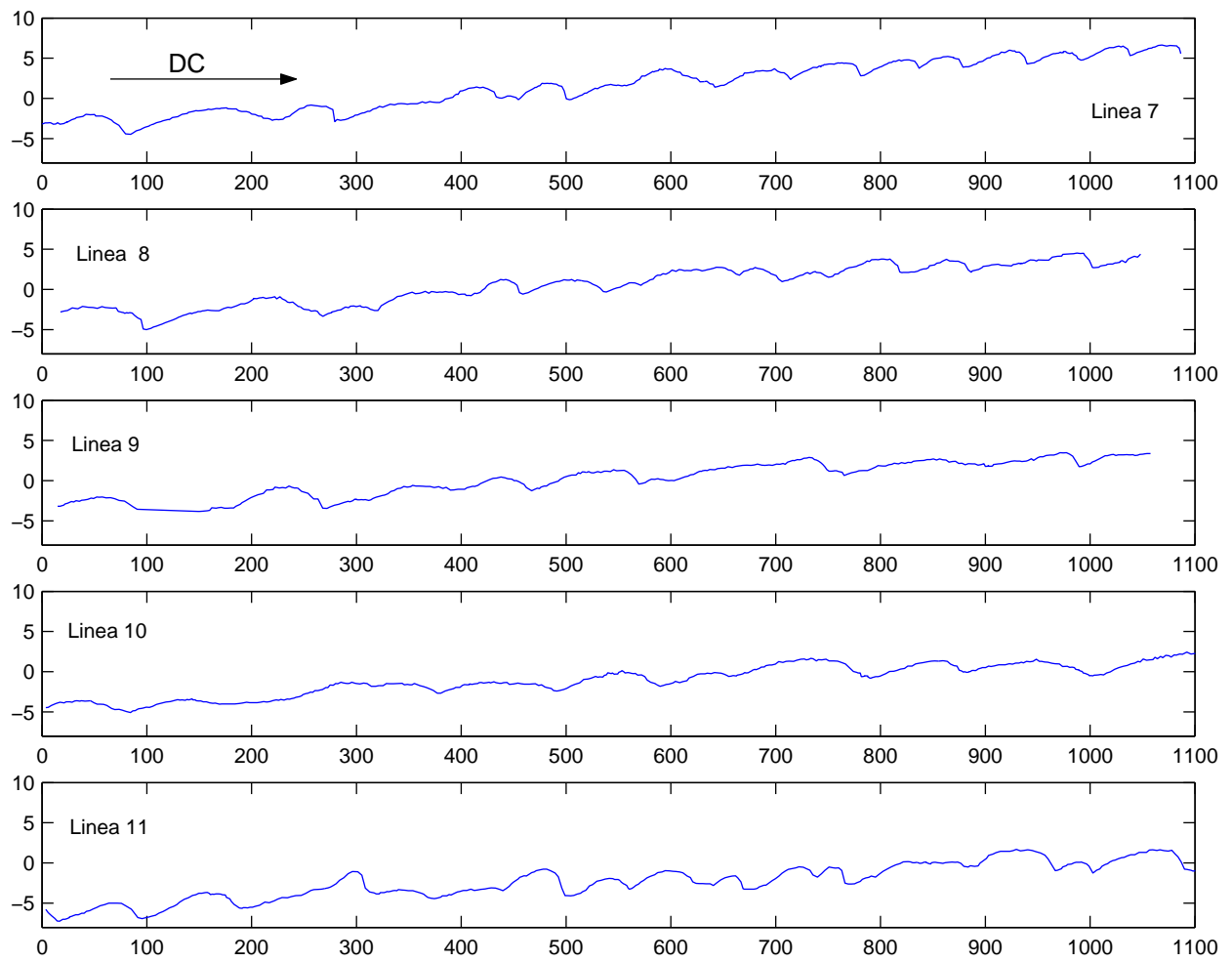


Figura 7.3: Perfiles longitudinales relevados.

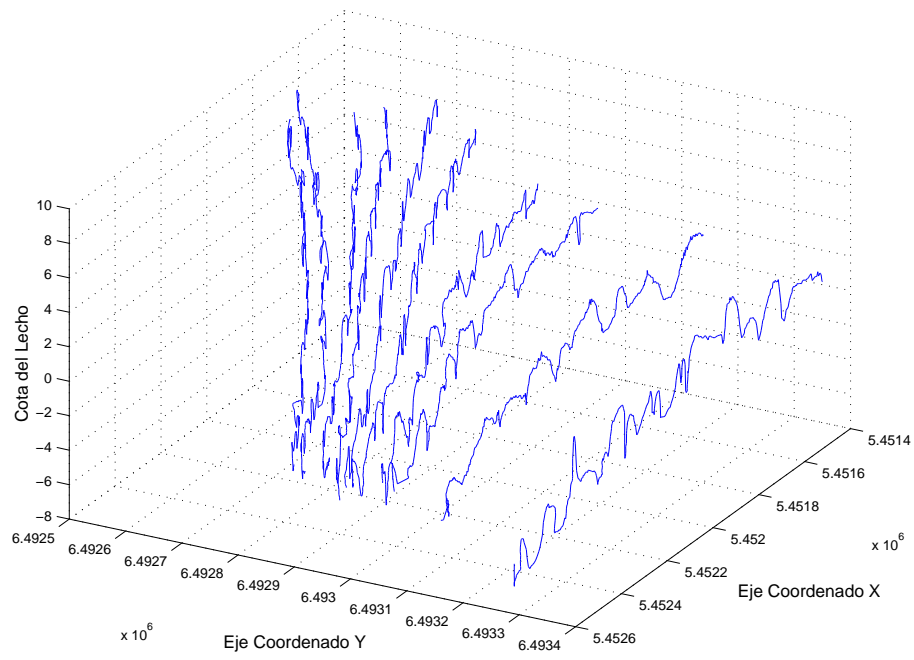


Figura 7.4: Vista tridimensional de los perfiles relevados.

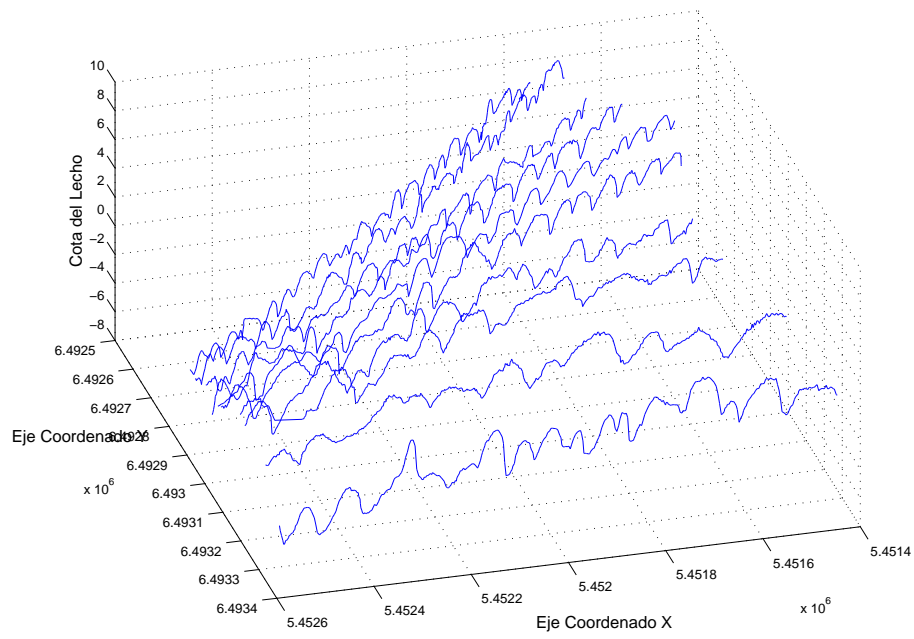


Figura 7.5: Vista tridimensional de los perfiles relevados.

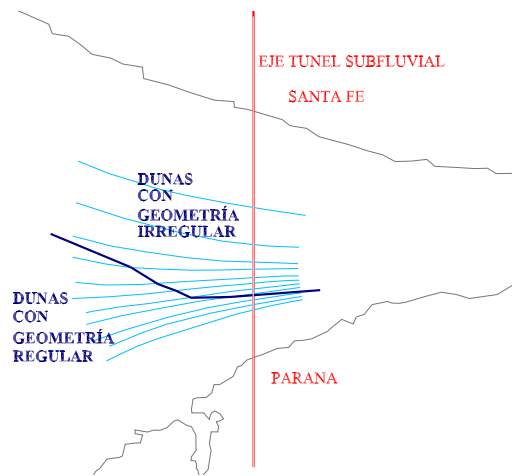


Figura 7.6: División del área según la geometría de las dunas

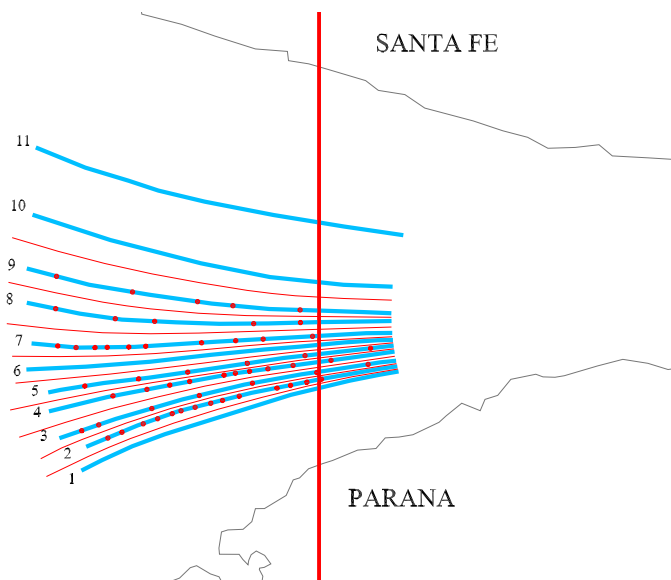


Figura 7.7: Puntos sobre los cuales se midió desplazamiento de dunas.



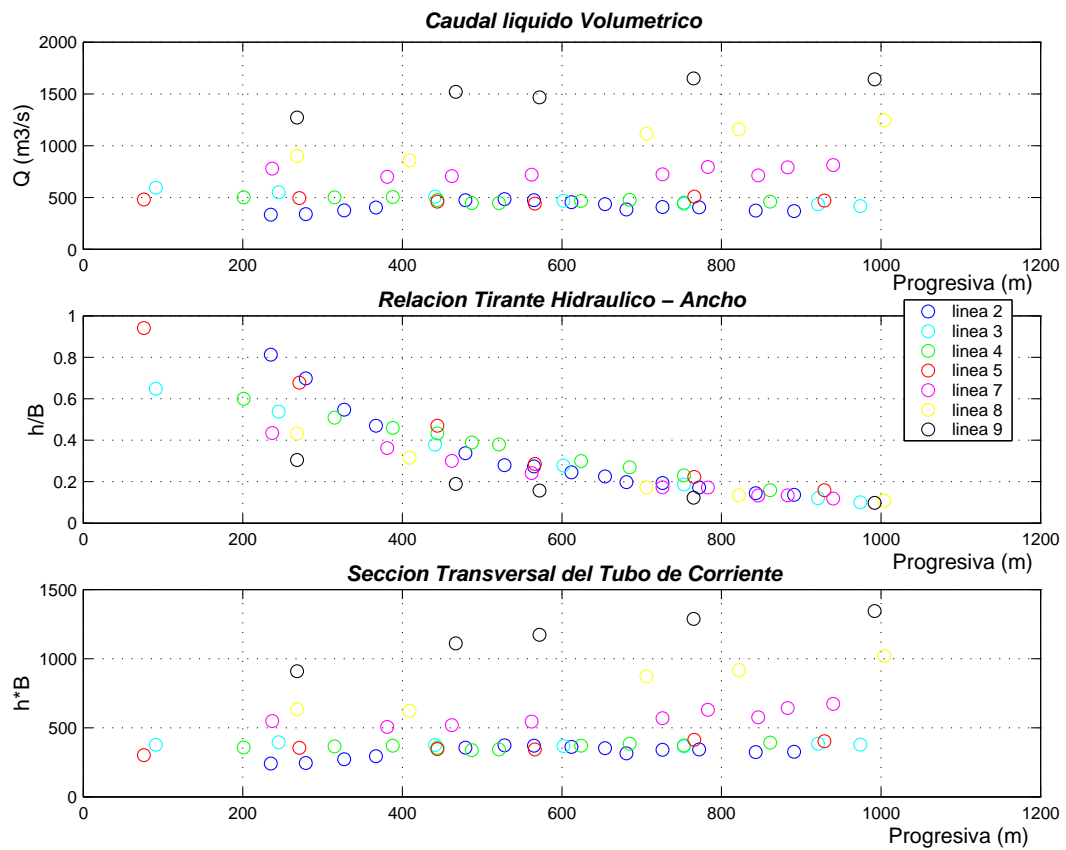


Figura 7.8: Distribución de los caudales líquidos volumétricos, de la relación tirante ancho y del área transversal medidos en cada Línea de corriente representativa de cara tubo de corriente.

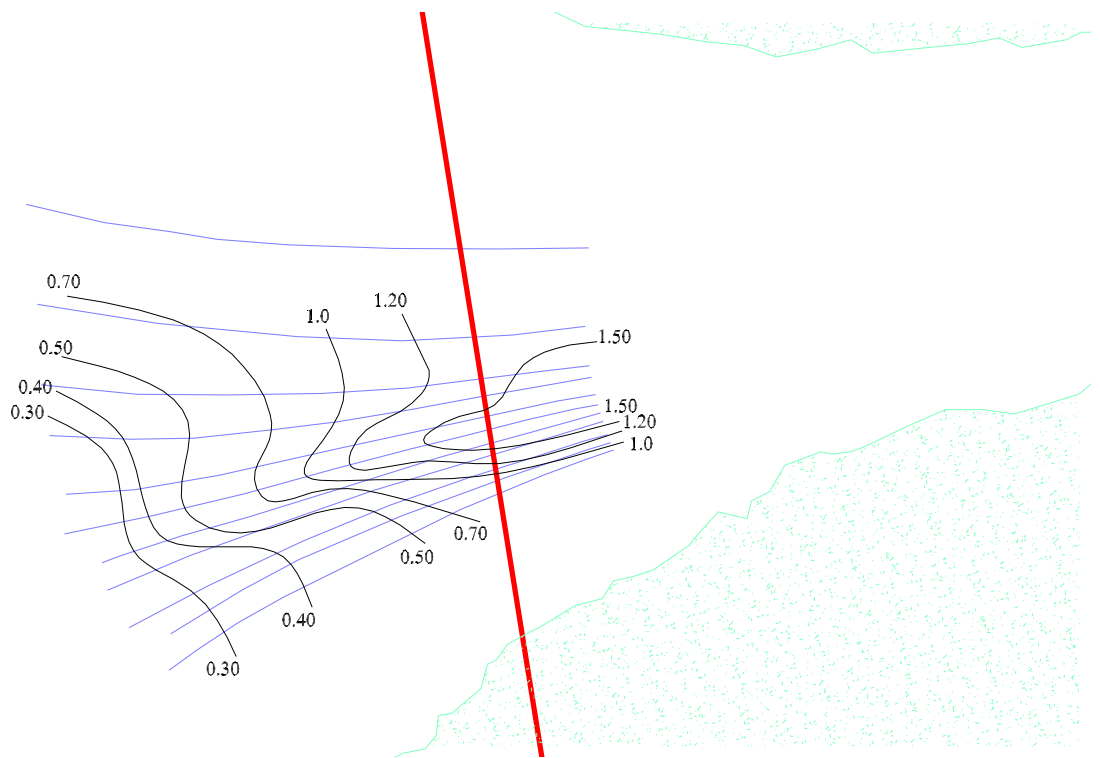


Figura 7.9: Isocurvas de caudal sólido de fondo.

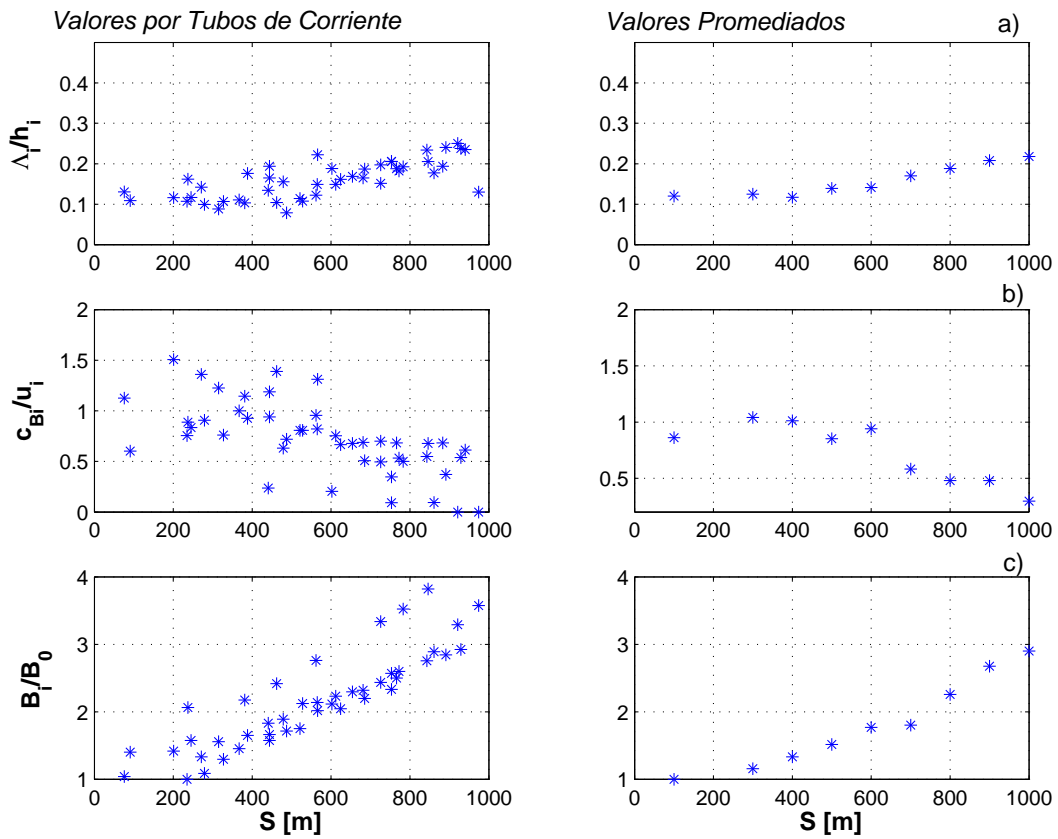


Figura 7.10: Comportamiento hidrosedimentológico en cada una de las Líneas (izquierda) y promedio (derecha): a) amplitud de dunas adimensional; b) celeridad adimensional; c) ancho del Tubo de corriente.

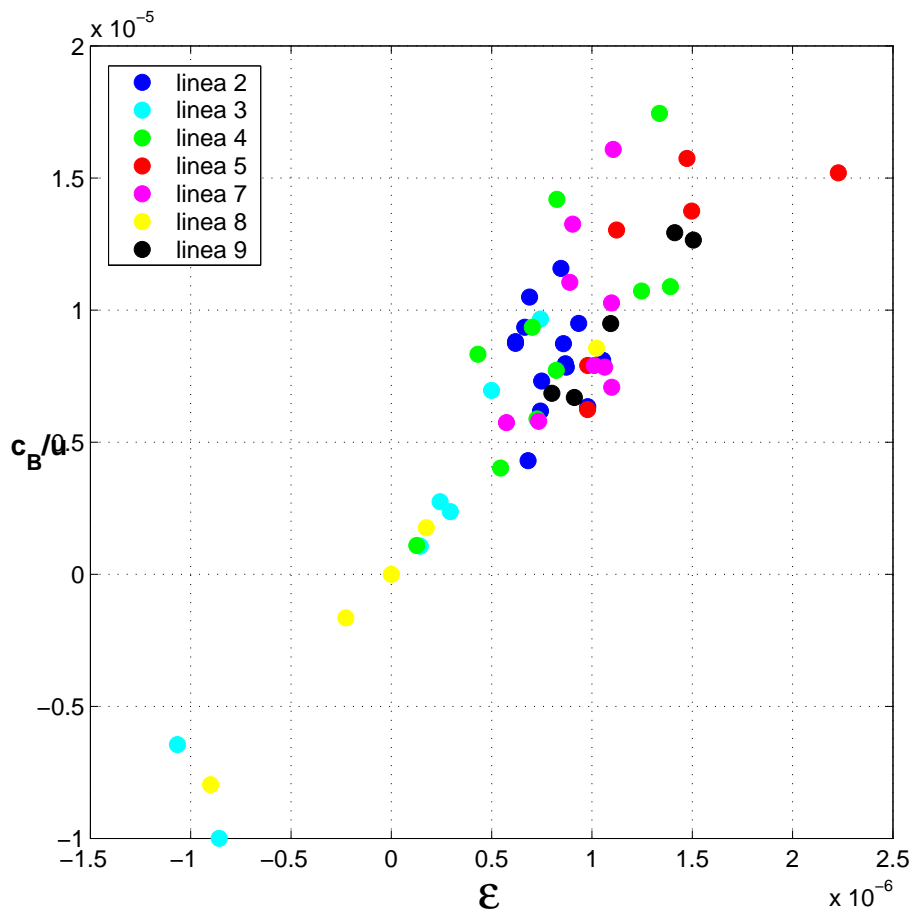


Figura 7.11: Parámetro de transporte  $\epsilon$  vs celeridad adimensional  $c_B/u$ .

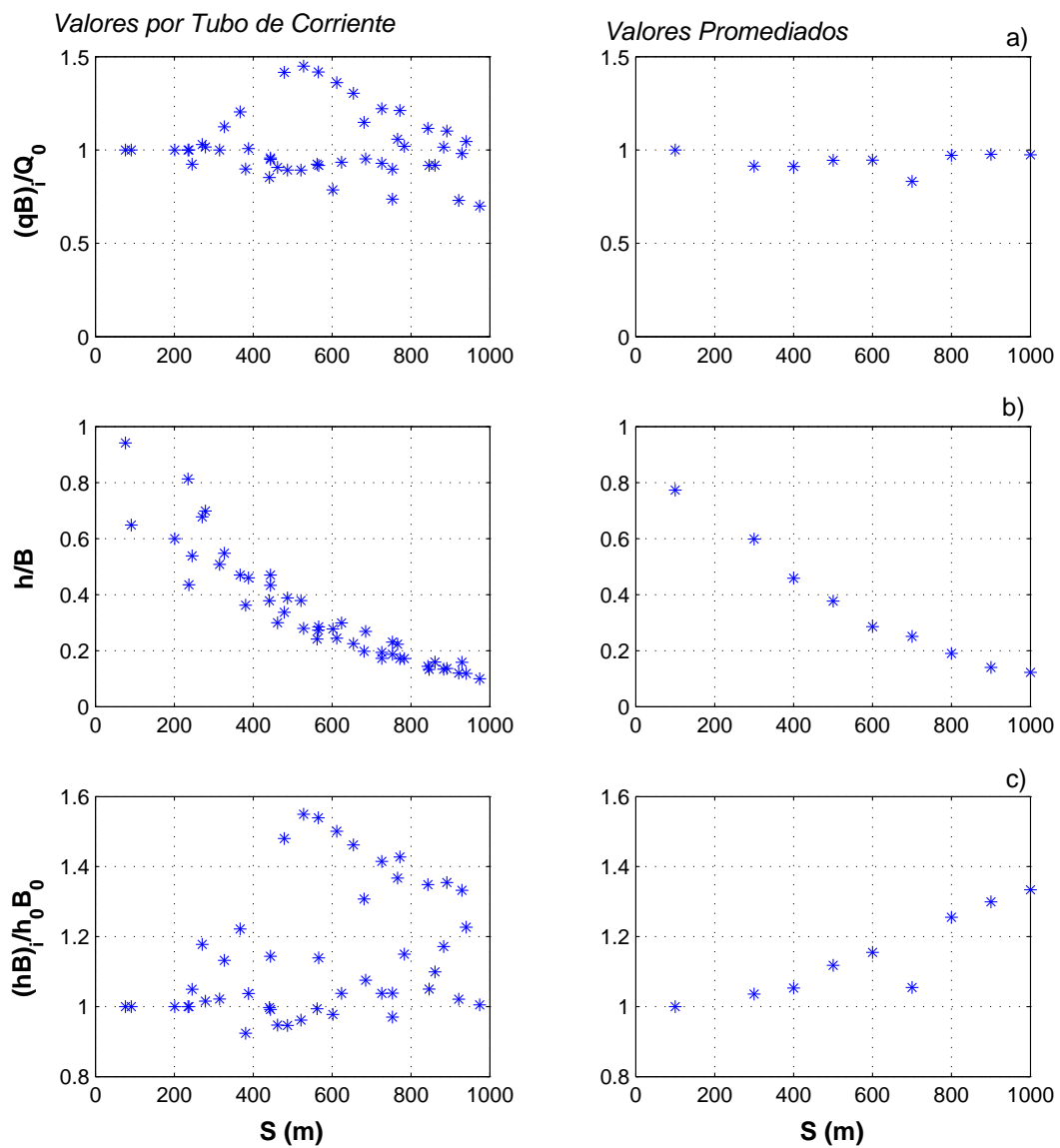


Figura 7.12: Comportamiento hidráulico en cada una de las Líneas (izquierda) y promedio (derecha): a) Caudal Líquido Volumétrico ; b) relación tirante-ancho; c) variación del área de la sección transversal.

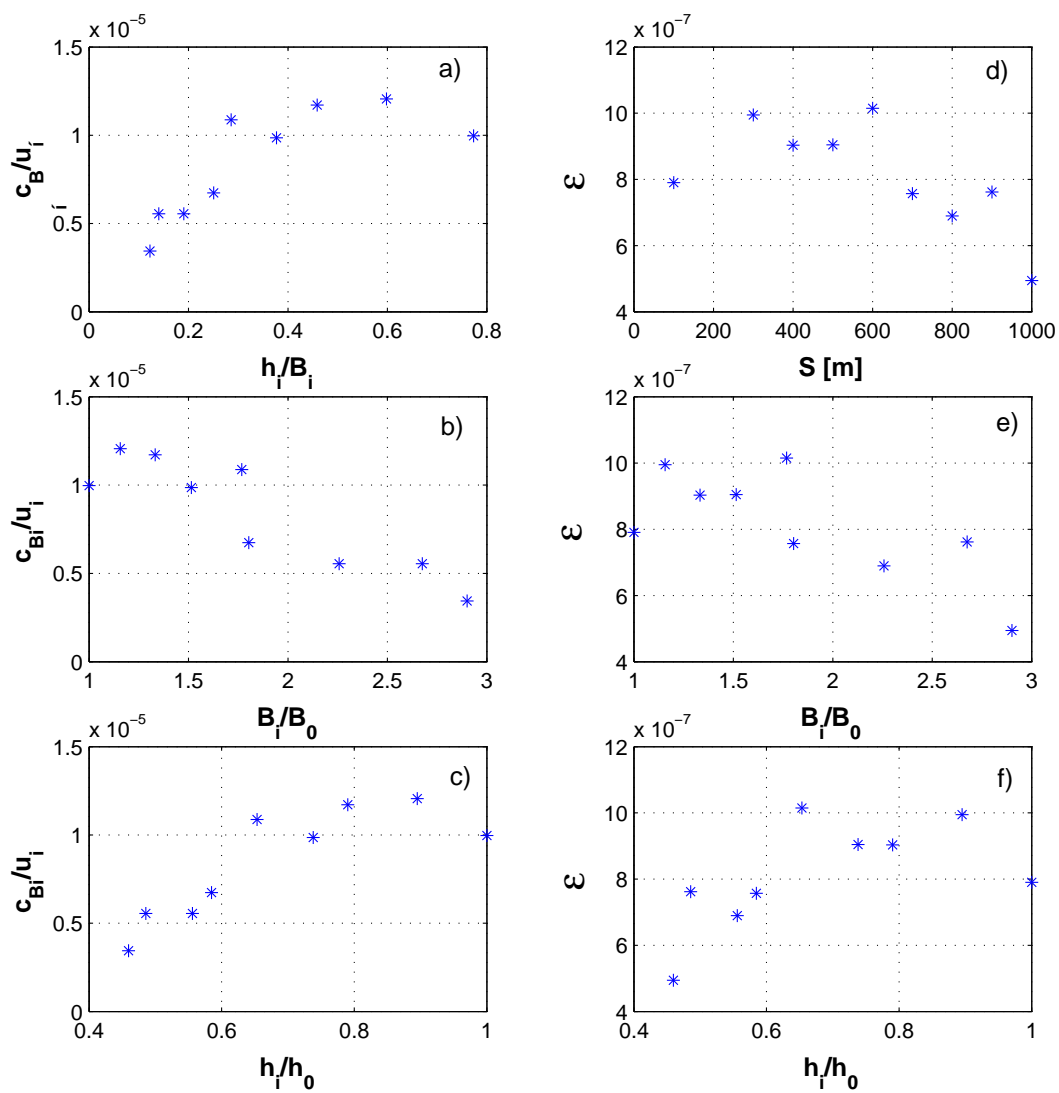


Figura 7.13: Relaciones entre la celeridad adimensional y las variables geométricas (a), b) y c) y entre el parámetro de transporte y las variables geométricas d), e) y f).

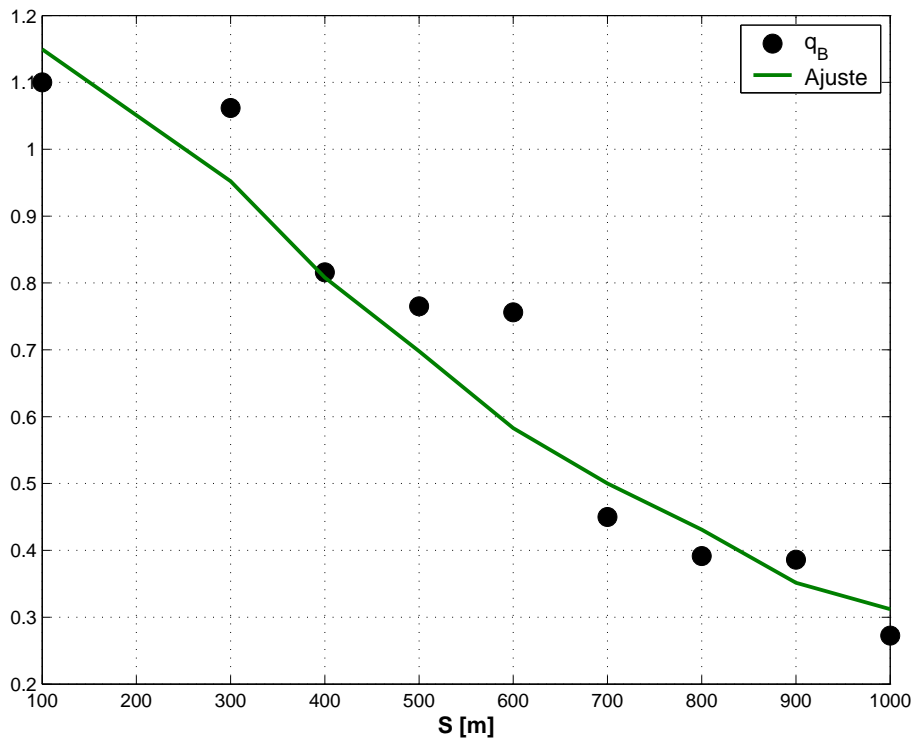


Figura 7.14: Caudal sólido estimado con el SMD y ajuste realizado con la expresión (7.1)

## Capítulo 8

# Conclusiones y recomendaciones

### 8.1. Conclusiones finales

En primer lugar se puede decir que se conformó una importante base de datos de campo en formato digital, lo que permitió encarar algunos aspectos inéditos desde el punto de vista de la tipificación estadística de la migración de dunas en un tramo del río Paraná (análisis de Fourier de sus longitudes de onda e histograma de frecuencias de sus amplitudes). Por otra parte, dicha base de datos ofrece nuevas posibilidades para aquellos interesados en profundizar aspectos vinculados a la mecánica de dunas de grandes ríos de llanura.

Se pudieron estimar las tasas de transporte del material del lecho por el método SMD teniendo en cuenta el fenómeno de superposición de formas de distintas jerarquías, cuyo tratamiento exige una diferenciación dependiendo si hay o no separación de la lámina líquida en la cara del frente de avance de las dunas, aspecto que de no tenerse en cuenta, puede generar una subestimación considerable del transporte de material del fondo. El grado del error introducido dependerá entonces de la magnitud del ángulo que forma la cara del frente de avance de las dunas con la horizontal, ya que se ha observado que cuanto más tendido es el talud del frente de la duna mayor es el porcentaje de transporte de material del lecho generado por las formas superpuestas. Como parte de los cálculos requeridos para tipificar la superposición de formas de distinta jerarquía, fue posible determinar valores umbrales de los ángulos del frente de avance de las grandes dunas del tramo del río Paraná que diferencian las dos situaciones básicas analizadas en esta Tesis (dunas de tipo *a* y dunas de tipo *b*). En dunas que presentan ángulos mayores a  $5^\circ$  no se han encontrado formas de fondo superpuestas en su frente de avance, lo que indica la presencia de la separación de la lámina líquida, y valida la hipótesis de aplicación del método SMD sin que sea necesario el análisis de formas jerárquicas. Para dunas que presentan ángulos entre  $4^\circ$  y  $5^\circ$  se ha encontrado que puede o



no haber superposición de formas y parece influir en esto la geometría de la duna mayor. Las dunas con ángulos del frente menores a  $4^\circ$  presentan en todos los casos superposición de formas.

Un aspecto a tener en cuenta es que los ángulos del frente de avance de las grandes dunas aquí analizadas sólo superan los  $10^\circ$  en pocos casos, cuestionando la hipótesis planteada por el método SMD que el talud frontal tiene un ángulo cercano al ángulo de reposo del material sumergido.

El procesamiento de la información necesaria para la estimación del transporte de fondo por el método SMD con formas de fondo compuestas constituye un trabajo tedioso. Se presentó entonces en esta Tesis una metodología que intenta simplificar el proceso en dos aspectos:

- separación de las componentes de Fourier de las dunas de distintos órdenes a los fines de analizar cada jerarquía de dunas en forma independiente, agilizando así la identificación visual de cada duna para la estimación de su celeridad.
- estimación de la amplitud de dunas por el método estadístico de análisis de frecuencias en reemplazo de la determinación directa duna por duna.

En mayor detalle, se propuso entonces la metodología  $FFT \rightarrow \text{filtro} \rightarrow FFT^{-1}$  para la separación de formas de  $\mathcal{O}(1)$  y  $\mathcal{O}(2)$ , obteniéndose así dos series con información diferenciable, una con las dunas de  $\mathcal{O}(1)$  algo suavizadas respecto del registro original, y otra con dunas de  $\mathcal{O}(2)$  las que muestran una clara diferenciación respecto del archivo original.

En cuanto a la estimación de la amplitud de dunas, se encontró que el análisis de frecuencias de la serie normalizada permite obtener valores bastante cercanos a los medidos, pudiéndose postular que el método arroja valores más confiables desde el punto de vista estadístico.

Por tanto, y en función a los resultados obtenidos en el Capítulo 4, la presente Tesis propone una metodología para estimar el transporte de fondo que contempla el aporte de caudal sólido generado por jerarquías de dunas menores, si es que éstas se encuentran presentes en la cara del frente de avance de las dunas mayores, basado en la separación de componentes. Sin embargo, es necesario destacar lo complejo que resulta estimar las celeridades de las dunas de  $\mathcal{O}(2)$ , parámetro que incide en la estimación del transporte de fondo agregado.

Los valores de caudal sólido de fondo fueron comparados con otras estimaciones realizadas con datos de campo y de laboratorio por diversos autores, y de la comparación surgen las siguientes conclusiones:

- Respecto de la aplicación del SMD sin diferenciación jerárquica, se encontró que los resultados

obtenidos en la presente Tesis son del mismo orden de magnitud que los valores publicados (Lima 1990, Asler 1992, Amsler y Gaudin 1994, Stuckrath 1969, HYTSA 1987).

- Respecto de la aplicación del SMD con diferenciación jerárquica (fórmula de Sidorchuck red-derivada por Vionnet, 2004), los resultados obtenidos algo inferiores a los presentados por Amsler y Gaudin (1994), lo que se explica por la diferencia metodológica existente entre ambos trabajos y la incertidumbre en la estimación de las celeridades de las dunas de  $\mathcal{O}(2)$ .
- Ambas estimaciones difieren del transporte de material de fondo ensayado en laboratorio, de entre uno y dos órdenes de magnitud menos respecto de los valores de campo, aspecto analizado anteriormente por Marti (1998).
- Las estimaciones basadas en el método SMD concuerdan con los resultados obtenidos por el SET, demostrando así la consistencia del método SMD.

El Cuadro 8.1 presenta un resumen de los valores de  $q_B$  estimados para las últimas tres crecidas más importantes del río Paraná, estos valores son promedios para los estados hidrológicos presentados. A su vez, estos datos complementan las estimaciones hechas por Amsler y Gaudin (1994) para un estado hidrológico de aguas medias (Figura 8.1.a). Ambos trabajos ofrecen un panorama sobre la magnitud del transporte de fondo para aguas medias y aguas altas. El parámetro de transporte (Figura 8.1.b) puede presentarse como dependiente del nivel hidrométrico y transformarse así en un parámetro para el pronóstico del transporte de material de fondo.

En cuanto al análisis del efecto de los cambios de la geometría del cauce en el transporte del material de lecho, se puede concluir que el detallado procesamiento de la información permitió observar que existe una relación casi directa entre las magnitudes del caudal sólido de fondo y las variaciones de la geometría. Los cálculos realizados indican que conociendo los valores de amplitudes medias de dunas y de celeridad a la entrada de la sección en cuestión, y los parámetros geométricos del tramo, que por lo general son fáciles de obtener o estimar, permiten corregir la magnitud del transporte de fondo en toda la longitud del tramo analizada.

## **8.2. Recomendaciones para posibles extensiones del presente trabajo**

Un aspecto importante a observar en las estimaciones realizadas es la presunción del desplazamiento de dunas sin desprendimiento o separación de la capa límite. Este fenómeno que hace unos

años no tenía mayor cabida en la comunidad científica, se presenta hoy como una de las líneas de la hidráulica fluvial más prometedoras (Best 2005). No obstante, la ausencia o no de la separación de la capa límite en la cara frontal de la duna mayor es de muy difícil cuantificación por mediciones directas en campo. Un método indirecto sería recurrir a la simulación numérica del flujo sobre geometrías de dunas con las mismas características que las presentadas en este trabajo. Por lo tanto, se propone como extensión de esta Tesis la utilización de herramientas numéricas para simular la eventual emanación de vórtices en la zona del frente de avance de las dunas. Los resultados podrían constituir un interesante aporte al entendimiento de las leyes de gobierno del fenómeno de migración de dunas.

En cuanto a las estimaciones realizadas sobre la influencia de la divergencia en planta y convergencia en profundidad del flujo, sería importante complementar al análisis realizado con información medida en campo de otro tramo del río Paraná que presente similares características hidráulicas y geométricas a las aquí analizadas, a los fines de fortalecer o modificar las hipótesis de cálculo adelantadas en este trabajo.

Año	$H_{pp}$ [m]	$h$ [m]	$u$ [m/s]	$q$ [m <sup>2</sup> /s]	$q_B$ [m <sup>2</sup> /dia]
<b>1983</b>	6.8	26.0	1.8	47	70
	6.7	24.0	1.7	40	41
	6.6	24.0	1.7	39	29
	6.6	24.0	1.6	39	29
	6.4	24.0	1.5	39	19
<b>1992</b>	6.8	24.0	1.6	36	62
	6.7	25.0	1.6	41	46
	6.6	24.0	1.5	36	62
<b>1998</b>	6.6	23.0	1.6	35	28
	6.5	22.5	1.6	34	29
	6.1	22.0	1.3	29	28

Cuadro 8.1: Caudales sólidos de fondo medios estimados en la presente Tesis para las crecidas extraordinarias de los años 1983, 1992 y 1998.

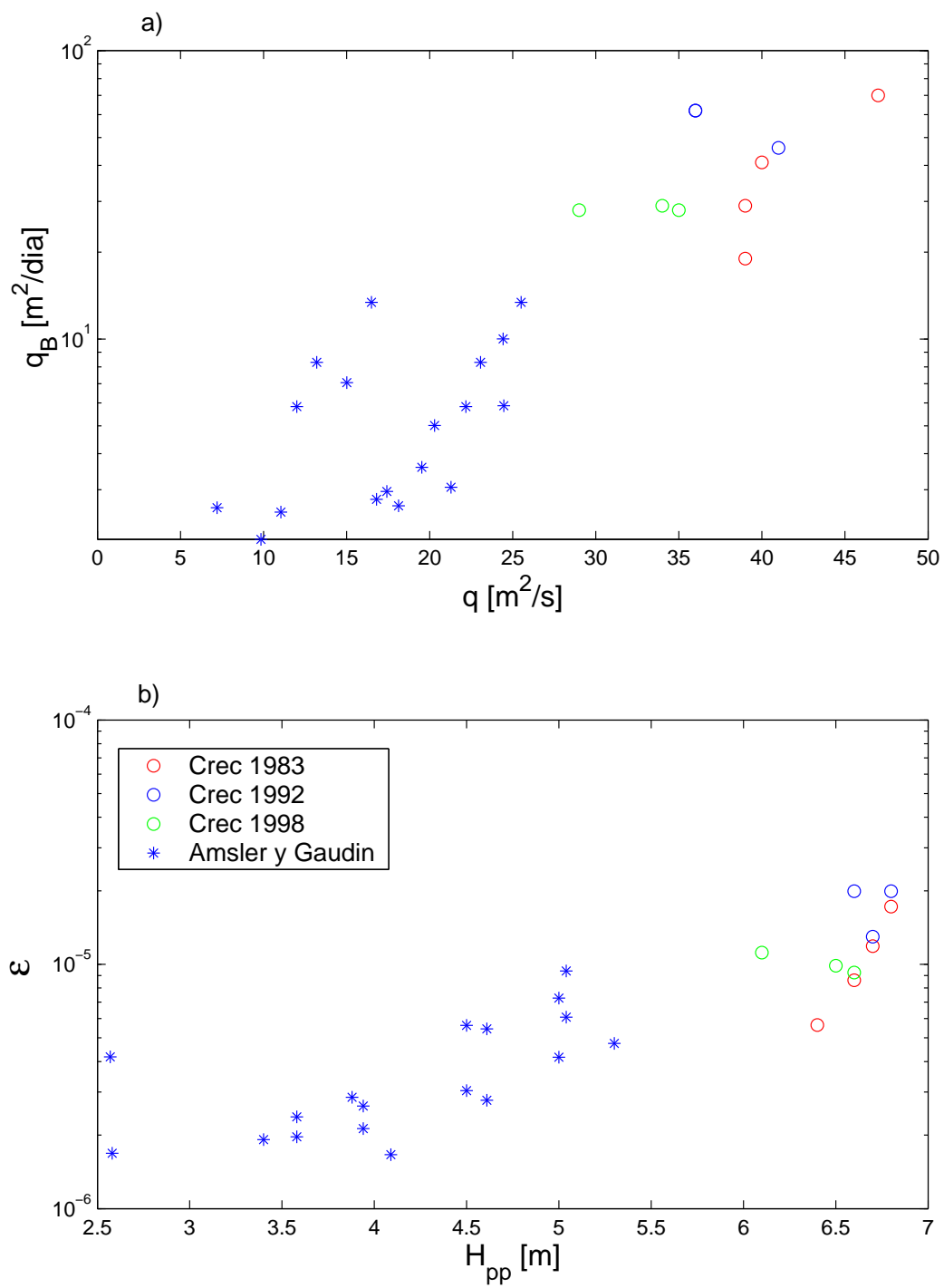


Figura 8.1: a) Caudales sólidos medios estimados para las crecidas de 1983, 1992 y 1998 y para aguas medias por Amsler y Gaudin (1994), b) Parámetro de transporte vs lectura hidrométrica en Puerto Paraná, para los mismos datos.

## Capítulo 9

# Anexo: Datos para la estimación de $q_B$ por el método SMD

### 9.1. Mediciones de cada duna registrada en los datos analizados

Día		02/07	08/07	16/07	21/07	26/07	28/07	30/07	31/07	Prom.
Hpp [m]		6.78	6.79	6.40	6.36	6.63	6.71	6.64	6.61	
$Q[m^3/s]$		30656	30731	27962	27697	29555	30136	29626	29412	
Duna I	$\lambda[m]$	300.0	276.0	176.0	131.0	141.0	151.0	175.0	187.0	<b>175.0</b>
	$\Lambda[m]$	4.6	5.6	5.4	4.5	4.9	4.3	4.3	3.9	<b>4.7</b>
	$\Delta s[m]$	—	213.0	62.0	33.0	76.0	56.0	30.0	17.0	
	$c_B[m/dia]$	—	35.5	7.8	6.6	15.2	28.0	15.0	21.0	<b>18.5</b>
	$h[m]$	—	25.9	24.8	24.8	23.9	23.8	23.5	23.7	<b>24.3</b>
Duna II	$\lambda[m]$	—	450.0	465.0	490.0	430.0	554.0	470.0	471.0	<b>416.0</b>
	$\Lambda[m]$	—	3.3	4.7	4.7	5.4	5.0	5.1	4.6	<b>4.7</b>
	$\Delta s[m]$	—	237.0	161.0.	70.0	66.0	35.0	29.0	14.0	
	$c_B[m/dia]$	—	39.5	20.1	14.0	133.2	17.5	14.5	14.0	<b>19.0</b>
	$h[m]$	—	26.0	24.4	24.9	23.9	24.2	24.1	23.9	<b>24.5</b>

Cuadro 9.1: Dimensiones y celeridades de las dunas identificadas en la progresiva transversal 1256 y durante la crecida extraordinaria de 1983.

Día		23/06/92	25/06/92	27/06/92	28/06/92	<b>Promedio</b>
Hpp [m]		6.87	6.83	6.67	6.60	
Q[m <sup>3</sup> /s]		31342	31035	29843	29340	
<i>PROGRESIVA 1200</i>						
Duna I	$\lambda$ [m]	219.0	231.0	253.0	258.0	<b>240.0</b>
	$\Lambda$ [m]	5.6	5.9	6.6	6.8	<b>6.2</b>
	$\Delta s$ [m]	—	67.0	43.0	20.0	—
	$c_B$ [m/dia]	—	33.3	21.3	20.4	<b>25.0</b>
	$h$ [m]	23.1	23.4	24.1	23.6	<b>23.6</b>
Duna II	$\lambda$ [m]	—	—	196.0	207.0	<b>202.0</b>
	$\Lambda$ [m]	—	—	4.3	4.0	<b>4.2</b>
	$\Delta s$ [m]	—	54.0	22.0	18.0	
	$c_B$ [m/dia]	—	26.8	10.8	18.4	<b>18.7</b>
	$h$ [m]	—	—	25.9	25.8	<b>25.9</b>

Cuadro 9.2: Dimensiones y celeridades de las dunas identificadas en la progresiva transversal 1200 durante la crecida extraordinaria de 1992.

Día		23/06/92	25/06/92	27/06/92	28/06/92	Promedio
Hpp [m]		6.87	6.83	6.67	6.60	
$Q[m^3/s]$		31342	31035	29843	29340	
<i>PROGRESIVA 1250</i>						
Duna I	$\lambda[m]$	287.0	256.0	—	274.0	<b>272.0</b>
	$\Lambda[m]$	4.3	5.3	—	5.4	<b>5.0</b>
	$\Delta s[m]$	—	51	—	58.0	
	$c_B[m/dia]$	—	25.5	—	19.4	<b>22.5</b>
	$h[m]$	23.9	23.0	—	22.8	<b>23.2</b>
Duna II	$\lambda[m]$	222.0	—	—	209.0	<b>216.0</b>
	$\Lambda[m]$	5.5	—	—	3.4	<b>4.5</b>
	$\Delta s[m]$	—	81	—	16	
	$c_B[m/dia]$	—	40.5	—	25.0	<b>32.8</b>
	$h[m]$	24.5	—	—	24.3	<b>24.4</b>

Cuadro 9.3: Dimensiones y celeridades de las dunas identificadas en la progresiva transversal 1250 durante la crecida extraordinaria de 1992.

Día		23/06/92	25/06/92	27/06/92	28/06/92	<b>Promedio</b>
Hpp [m]		6.87	6.83	6.67	6.60	
Q[m <sup>3</sup> /s]		31342	31035	29843	29340	
<i>PROGRESIVA 1300</i>						
Duna I	$\lambda$ [m]	274.0	296.0	285.0	297.0	<b>288.0</b>
	$\Lambda$ [m]	6.6	6.2	5.5	5.4	<b>5.9</b>
	$\Delta s$ [m]	—	56	29.0	21.0	—
	$c_B$ [m/dia]	—	28.8	14.5	20.5	<b>21.3</b>
	$h$ [m]	23.3	23.4	23.8	23.4	<b>23.5</b>
Duna II	$\lambda$ [m]	—	—	—	197.0	<b>197.0</b>
	$\Lambda$ [m]	—	—	—	4.9	<b>4.9</b>
	$\Delta s$ [m]	—	36.0	38.0	9.0	
	$c_B$ [m/dia]	—	18.0	19.0	9.2	<b>15.4</b>
	$h$ [m]	—	—	24.4	24.2	<b>24.3</b>

Cuadro 9.4: Dimensiones y celeridades de las dunas identificadas en la progresiva transversal 1300 durante la crecida extraordinaria de 1992.



Día		23/06/92	25/06/92	27/06/92	28/06/92	Promedio
Hpp [m]		6.87	6.83	6.67	6.60	
Q[m <sup>3</sup> /s]		31342	31035	29843	29340	
<i>PROGRESIVA 1350</i>						
Duna I	$\lambda$ [m]	326.0	325.0	299	304.0	<b>314.0</b>
	$\Lambda$ [m]	6.4	6.0	6.3	6.2	<b>6.2</b>
	$\Delta s$ [m]	—	52.0	38.0	20.0	
	$c_B$ [m/dia]	—	26.0	18.8	19.8	<b>21.5</b>
	$h$ [m]	21.7	21.6	23.6	22.4	<b>22.3</b>
Duna II	$\lambda$ [m]	—	—	—	197.0	<b>197.0</b>
	$\Lambda$ [m]	—	—	—	6.3	<b>6.3</b>
	$\Delta s$ [m]	—	52.0	58.0	13.0	16
	$c_B$ [m/dia]	—	26.0	29.0	12.5	<b>22.5</b>
	$h$ [m]	—	—	22.9	23.9	<b>23.4</b>

Cuadro 9.5: Dimensiones y celeridades de las dunas identificadas en la progresiva transversal 1350 durante la crecida extraordinaria de 1992.

Día		14/05/98	19/05/98	20/05/98	27/05/98	Promedio
Hpp [m]		6.71	6.59	6.50	6.12	
Q[m <sup>3</sup> /s]		30140	29270	28640	26180	
<i>PROGRESIVA 1200</i>						
Duna I	$\lambda$ [m]	169.0	157.0	167.0	—	<b>164.0</b>
	$\Lambda$ [m]	3.0	2.4	2.8	—	<b>2.7</b>
	$\Delta s$ [m]	—	97.0	18.0	—	
	$c_B$ [m/dia]	—	19.5	18.0	—	<b>18.8</b>
	$h$ [m]	21.1	20.1	19.8	—	<b>20.3</b>
Duna II	$\lambda$ [m]	99.0	122.0	113.0	—	<b>111.0</b>
	$\Lambda$ [m]	2.6	3.3	2.5	—	<b>2.8</b>
	$\Delta s$ [m]	—	104.0	7.0	—	
	$c_B$ [m/dia]	—	21.0	7.0	—	<b>14.0</b>
	$h$ [m]	23.5	23.2	22.7	—	<b>23.1</b>
Duna III	$\lambda$ [m]	158.0	171.0	160.0	—	<b>163.0</b>
	$\Lambda$ [m]	5.7	4.2	4.3	—	<b>4.7</b>
	$\Delta s$ [m]	—	81	16	—	
	$c_B$ [m/dia]	—	16.0	16.0	—	<b>16.0</b>
	$h$ [m]	23.5	23.2	22.9	—	<b>23.2</b>
Duna IV	$\lambda$ [m]	—	112.0	131.0	—	<b>122.0</b>
	$\Lambda$ [m]	—	3.4	3.4	—	<b>3.4</b>
	$\Delta s$ [m]	—	68.0	25.0	—	
	$c_B$ [m/dia]	—	14.0	25.0	—	<b>20.0</b>
	$h$ [m]	—	24.7	23.8	—	<b>24.3</b>

Cuadro 9.6: Dimensiones y celeridades de las dunas identificadas en la progresiva transversal 1200 durante la crecida extraordinaria de 1998.

Día		14/05/98	19/05/98	20/05/98	27/05/98	Promedio
Hpp [m]		6.71	6.59	6.50	6.12	
Q[m <sup>3</sup> /s]		30140	29270	28640	26180	
<i>PROGRESIVA 1250</i>						
Duna I	$\lambda$ [m]	134.0	171.0	110.0	—	<b>138.0</b>
	$\Lambda$ [m]	3.1	1.9	1.8	—	<b>2.3</b>
	$\Delta s$ [m]	—	63.0	25.0	—	—
	$c_B$ [m/dia]	—	12.6	25.0	—	<b>18.8</b>
	$h$ [m]	21.0	20.5	19.9	—	<b>20.5</b>
Duna II	$\lambda$ [m]	119.0	130.0	134.0	178.0	<b>140.0</b>
	$\Lambda$ [m]	3.1	2.1	2.3	2.5	<b>2.5</b>
	$\Delta s$ [m]	—	89.0	23.0	—	
	$c_B$ [m/dia]	—	18.4	20.0	—	<b>19.1</b>
	$h$ [m]	23.8	23.0	22.3	21.3	<b>22.6</b>
Duna III	$\lambda$ [m]	173.0	171.0	178.0	159	<b>170.0</b>
	$\Lambda$ [m]	3.4	3.3	2.8	3.0	<b>3.1</b>
	$\Delta s$ [m]	—	80.0	20.0	56	
	$c_B$ [m/dia]	—	16.0	20.0	8	<b>14.7</b>
	$h$ [m]	24.4	23.5	23.7	22.7	<b>23.6</b>
Duna IV	$\lambda$ [m]	—	128.0	132.0	137.0	<b>132.0</b>
	$\Lambda$ [m]	—	4.7	4.5	4.7	<b>4.6</b>
	$\Delta s$ [m]	—	95.0	12.0	77	
	$c_B$ [m/dia]	—	19.0	12.0	11	<b>14.0</b>
	$h$ [m]	—	25.0	24.6	23.0	<b>24.2</b>

Cuadro 9.7: Dimensiones y celeridades de las dunas identificadas en la progresiva transversal 1250 durante la crecida extraordinaria de 1998.

Día	Hpp [m]	Duna	Duna I					Duna II					
			$\lambda$ [m]	$\Lambda$ [m]	$\Delta s$ [m]	$c_{B_1}$ [ $\frac{m}{día}$ ]	$c_{B_{2/1}}$ [ $\frac{m}{día}$ ]	$\lambda$ [m]	$\Lambda$ [m]	$\Delta s$ [m]	$c_{B_1}$ [ $\frac{m}{día}$ ]	$c_{B_{2/1}}$ [ $\frac{m}{día}$ ]	
08/07	6.79	O(1)	276	5.6	213	35.5	—	450	3.3	237	39.5	—	
		O(2)	40	1.7	69	—	11.5						
16/07	6.40	O(1)	176	5.4	62	7.8	—	465	4.7	161	20.1	—	
		O(2)	49	1.5	23	—	3.8						37
21/07	6.36	O(1)	131	4.5	79	15.8	—	490	4.7	70	14.0	—	
		O(2)	42	1.6	44	—	8.8						29
26/07	6.63	O(1)	141	4.9	76	15.2	—	430	5.4	66	13.2	—	
		O(2)	37	1.5	16	—	16.2						29
28/07	6.71	O(1)	151	4.3	56	28.0	—	554	5	35	17.5	—	
		O(2)	69	1.9	2	—	1.0						34
30/07	6.64	O(1)	175	4.3	30	15.0	—	470	5.1	29	14.5	—	
		O(2)											33
31/07	6.61	O(1)	187	3.9	17	21.0	—	471	4.6	14	14.0	—	
		O(2)	35	1.0	6	—	6.0						32
<b>Prom</b>		O(2)	<b>45</b>	<b>1.5</b>			<b>—</b>	<b>9.9</b>	<b>33</b>	<b>1.2</b>		<b>—</b>	<b>11.2</b>
		O(1)	<b>177</b>	<b>4.7</b>			<b>17.9</b>	<b>—</b>	<b>416</b>	<b>4.1</b>		<b>19.0</b>	<b>—</b>

Cuadro 9.8: Dimensiones, celeridades y celeridades relativas de las dos grandes dunas y las dunas superimpuestas identificadas en los registros correspondientes a la crecida extraordinaria del año 1983.

Día	Hpp	Duna	Duna I					Duna II				
			$\lambda$	$\Lambda$	$\Delta s$	$c_{B_1}$	$c_{B_{2/1}}$	$\lambda$	$\Lambda$	$\Delta s$	$c_{B_1}$	$c_{B_{2/1}}$
			[m]	[m]	[m]	$[\frac{m}{día}]$	$[\frac{m}{día}]$	[m]	[m]	[m]	$[\frac{m}{día}]$	$[\frac{m}{día}]$
23/06	6.87	O(1)	219	5.6								
25/06	6.83	O(1)	231	5.9	67	33.3	—			54	26.8	—
		O(2)	32	2.0	16	—	7.8	35	1.8	19	—	9.5
27/06	6.67	O(1)	253	6.6	43	21.3	—	196	4.3	22	10.8	—
		O(2)	22	1.2	12	—	5.9	18	1.7	22	—	11.0
28/06	6.60	O(1)	258	6.8	20	20	—	207	4	18	18.0	—
		O(2)	24	1.3	41	—	40.7					
<b>Prom.</b>		O(2)	<b>38</b>	<b>1.5</b>		—	<b>18.0</b>	<b>27</b>	<b>1.5</b>		—	<b>10.3</b>
		O(1)	<b>240</b>	<b>6.2</b>		<b>25.0</b>	—	<b>201</b>	<b>4.2</b>		<b>19.0</b>	—

Cuadro 9.9: Dimensiones y celeridades de las dos grandes dunas identificadas a lo largo del perfil longitudinal correspondiente a la progresiva transversal 1200 relevada durante la crecida extraordinaria del año 1992.

Día	Hpp	Día	Duna I					Duna II				
			$\lambda$	$\Lambda$	$\Delta s$	$c_{B_1}$	$c_{B_{2/1}}$	$\lambda$	$\Lambda$	$\Delta l$	$c_{B_1}$	$c_{B_{2/1}}$
			[m]	[m]	[m]	$[\frac{m}{día}]$	$[\frac{m}{día}]$	[m]	[m]	[m]	$[\frac{m}{día}]$	$[\frac{m}{día}]$
25/06	6.83	O(1)	256	5.3	51	25.5	—	225	—	81	40.5	—
		O(2)	34	1.4	38	—	19.0	23	1.3	72	35.8	
28/06	6.67	O(1)	274	5.4	58	19.4	—	209	3.4	50	16.7	—
		O(2)	42	1.5	9	—	5	21	1.1	8	—	4.1
<b>Prom.</b>		O(2)	<b>38</b>	<b>1.5</b>		—	<b>12.0</b>	<b>22</b>	<b>1.2</b>		—	<b>20.0</b>
		O(1)	<b>269</b>	<b>5.6</b>		<b>25.0</b>	—	<b>211</b>	<b>4.8</b>		<b>26.0</b>	—

Cuadro 9.10: Dimensiones y celeridades de las dos grandes dunas identificadas a lo largo del perfil longitudinal correspondiente a la progresiva transversal 1250 relevada durante la crecida extraordinaria del año 1992.

Día	Hpp	Duna	Duna I					Duna II					
			$\lambda$	$\Lambda$	$\Delta s$	$c_{B_1}$	$c_{B_{2/1}}$	$\lambda$	$\Lambda$	$\Delta s$	$c_{B_1}$	$c_{B_{2/1}}$	
	[m]		[m]	[m]	[m]	$[\frac{m}{día}]$	$[\frac{m}{día}]$	[m]	[m]	[m]	$[\frac{m}{día}]$	$[\frac{m}{día}]$	
23/06	6.87	O(1)	274	6.6									
25/06	6.83	O(1)	296	6.2	56	28.8	—			36	18.0	—	
		O(2)	32	1.5	35	—	17.5	—	—	—	—	—	
27/06	6.67	O(1)	285	5.5	29	14.5	—		—	—	38	19	—
		O(2)	—	1.4	32	—	16	—	—	—	—	—	—
28/06	6.60	O(1)	297	5.4	21	20.5	—		197	4.9	9	9.2	—
		O(2)	—	1.3	44	—	44						
<b>Prom.</b>		O(2)		<b>1.4</b>		—	<b>30</b>					—	
		O(1)	<b>288</b>	<b>5.9</b>		<b>21.3</b>	—		<b>197</b>	<b>4.9</b>		<b>15.4</b>	—

Cuadro 9.11: Dimensiones y celeridades de las dos grandes dunas identificadas a lo largo del perfil longitudinal correspondiente a la progresiva transversal 1300 relevada durante la crecida extraordinaria del año 1992.

Día	Hpp	Duna	Duna I					Duna II					
			$\lambda$	$\Lambda$	$\Delta s$	$c_{B_1}$	$c_{B_{2/1}}$	$\lambda$	$\Lambda$	$\Delta s$	$c_{B_1}$	$c_{B_{2/1}}$	
	[m]		[m]	[m]	[m]	$[\frac{m}{día}]$	$[\frac{m}{día}]$	[m]	[m]	[m]	$[\frac{m}{día}]$	$[\frac{m}{día}]$	
23/06	6.87	O(1)	326	6.4									
25/06	6.83	O(1)	325	6.0	50	26.0	—			52	26.0	—	
		O(2)	32	1.4	34	—	17.0	—	—	—	—	—	
27/06	6.67	O(1)	299	6.3	38	18.8	—		—	—	58	29	—
		O(2)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
28/06	6.60	O(1)	304	6.2	20	19	—		197	6.3	13	15	—
		O(2)	—	1.0	54	—	54						
<b>Prom.</b>		O(2)	<b>32</b>	<b>1.2</b>		—	<b>30</b>					—	
		O(1)	<b>314</b>	<b>6.2</b>		—	—		<b>197</b>	<b>6.3</b>		<b>22.5</b>	—

Cuadro 9.12: Dimensiones y celeridades de las dos grandes dunas identificadas a lo largo del perfil longitudinal correspondiente a la progresiva transversal 1350 relevada durante la crecida extraordinaria del año 1992.

Día		14/05/98	19/05/98		20/05/98	Promedio <b>O2</b>	Promedio <b>O1</b>
Hpp[m]		6.71	6.59		6.50		
$Q[m^3/s]$		30140	29270		28640		
Orden		O1	O2	O1	O1		
Duna I	$\lambda[m]$	169.0	29.0	157.0	167.0	<b>29.0</b>	<b>164.0</b>
	$\Lambda[m]$	3.0	1.2	2.4	2.8	<b>0.9</b>	<b>1.2</b>
	$\Delta s[m]$		61.0	97.0	18.0		
	$c_{B_1}[m/dia]$		—	19.5	18.0	—	<b>18.8</b>
	$c_{B_{2/1}}[m/dia]$		—	12.3	—		<b>12.3</b>
Duna II	$\lambda[m]$	99.0	30.0	122.0	113.0	<b>30.0</b>	<b>111.0</b>
	$\Lambda[m]$	2.6	1.1	3.3	2.5	<b>1.1</b>	<b>2.8</b>
	$\Delta s[m]$		74.0	104.0	7		
	$c_{B_1}[m/dia]$		—	21.0	7.0	—	<b>14.0</b>
	$c_{B_{2/1}}[m/dia]$		14.8	—		<b>14.8</b>	—
Duna III	$\lambda[m]$	158.0	39	171.0	160.0	<b>39</b>	<b>163.0</b>
	$\Lambda[m]$	5.7	1.3	4.2	4.3	<b>1.3</b>	<b>4.7</b>
	$\Delta s[m]$		120	81.0	16.0	<b>120</b>	
	$c_{B_1}[m/dia]$		23.9	16.0	16.0	<b>23.9</b>	<b>16.0</b>
Duna IV	$\lambda[m]$			112.0	131.0		<b>122.0</b>
	$\Lambda[m]$			3.4	3.4		<b>3.4</b>
	$\Delta s[m]$			68.0	25		
	$c_{B_1}[m/dia]$			14.0	25.0		<b>20.0</b>

Cuadro 9.13: Dimensiones y celeridades de las dunas de primer y segundo orden identificadas en la progresiva transversal 1200 relevada durante la crecida extraordinaria del año 1998.

Día	14/05/98	19/05/98		20/05/98	27/05/98	Promedio	Promedio	
Hpp[m]	6.71	6.59		6.50	6.12	<b>O2</b>	<b>O1</b>	
Q[m]	30140	29270		28640	26180	<b>O2</b>	<b>O1</b>	
Orden	O1	O2	O1	O1	O1			
Duna I	$\lambda[m]$	134.0	15.0	171.0	110.0		<b>15.0</b>	<b>138.0</b>
	$\Lambda[m]$	3.1	0.9	1.9	1.8		<b>0.9</b>	<b>2.3</b>
	$\Delta s[m]$		30.0	63.0	25.0			
	$c_{B_1}[m/dia]$		—	12.6	25.0		—	<b>18.8</b>
	$c_{B_{2/1}}[m/dia]$		19.5	—			<b>19.5</b>	—
Duna II	$\lambda[m]$	119.0	19.0	130.0	134.0	178	<b>19.0</b>	<b>140.0</b>
	$\Lambda[m]$	3.1	1.2	2.1	2.3	2.5	<b>1.2</b>	<b>2.5</b>
	$\Delta s[m]$		64.0	89.0	23			
	$c_{B_1}[m/dia]$		—	18.4	20.0		—	<b>19.1</b>
	$c_{B_{2/1}}[m/dia]$		40.3	—			<b>40.3</b>	—
Duna III	$\lambda[m]$	173.0		171.0	178.0	159.0		<b>170.0</b>
	$\Lambda[m]$	3.4		3.3	2.8		<b>3.0</b>	<b>3.1</b>
	$\Delta s[m]$			80	20.0	56.0		
	$c_{B_1}[m/dia]$			16.0	20.0		<b>8.0</b>	<b>14.7</b>
Duna IV	$\lambda[m]$			128.0	132.0	137.0		<b>132.0</b>
	$\Lambda[m]$			4.7	4.5	4.7		<b>4.6</b>
	$\Delta s[m]$			95.0	12	77.0		
	$c_{B_1}[m/dia]$			19.0	12.0	11.0		<b>14.0</b>

Cuadro 9.14: Dimensiones y celeridades de las dunas de primer y segundo orden identificadas en la progresiva transversal 1250 relevada durante la crecida extraordinaria del año 1998.



Prog.	Día	Alt. Hidrom.	Duna I				Duna II			
			$\lambda$	$\Lambda$	$\Delta s$	$c_B$	$\lambda$	$\Lambda$	$\Delta s$	$c_B$
1538	27/10/92	4.02	—	3.3	—	—	—	—	—	—
	30/10/92	4.06	—	3.9	12	4	—	—	—	—
	11/11/92	4.42	—	3.5	50	4.2	—	—	—	—
	16/11/92	4.56	206	3.7	20	4	—	—	14	2.8
	19/11/92	4.64	204	3.8	16	5.2	—	—	8	2.7
	24/11/92	4.68	—	—	—	—	—	—	20	4.0
	01/12/92	4.66	—	—	—	—	—	—	22	3.1
	07/12/92	4.64	—	—	—	—	98	2.6	20	3.3
	<b>Promedio</b>			<b>205</b>	<b>3.6</b>		<b>4.4</b>	<b>98</b>	<b>2.6</b>	
1553	23/10/92	3.98	—	2.9	—	—	—	—	—	—
	27/10/92	4.02	—	—	12	3	—	—	—	—
	30/10/92	4.06	—	3.2	18	6	—	—	—	—
	11/11/92	4.42	198	3.3	50	4.2	—	—	—	—
	16/11/92	4.56	—	—	—	—	90	—	14	2.8
	19/11/92	4.64	—	—	—	—	—	—	10	3.3
	24/11/92	4.68	—	—	—	—	—	—	14	2.8
	01/12/92	4.66	—	—	—	—	—	2.6	20	2.9
	07/12/92	4.64	—	—	—	—	—	—	22	3.7
<b>Promedio</b>			<b>198</b>	<b>3.1</b>		<b>4.4</b>	<b>90</b>	<b>2.6</b>		<b>3.1</b>
1576	13/10/92	3.93	—	2.6	—	—	—	—	—	—
	23/10/92	3.98	90	3.0	30	3.0	—	—	—	—
	27/10/92	4.02	—	2.9	14	3.5	—	—	—	—
	30/10/92	4.06	108	2.8	16	5.3	—	—	—	—
	11/11/92	4.42	124	2.6	60	5	—	—	—	—
	16/11/92	4.56	134	2.9	20	4	79	1.4	—	—
	19/11/92	4.64	134	2.9	34	11.3	95	1.4	8	2.7
	24/11/92	4.68	—	—	—	—	93	1.4	16	3.2
	01/12/92	4.66	—	—	—	—	96	1.5	24	3.4
	07/12/92	4.64	—	—	—	—	98	1.5	16	2.7
	<b>Promedio</b>			<b>118</b>	<b>2.8</b>		<b>5.4</b>	<b>92</b>	<b>2.6</b>	

Cuadro 9.15: Dimensiones y celeridades de las dos dunas identificadas en los relevamientos de la trinchera de ensayo del año 1992

# Bibliografía

- [1] Aisiks E. (1984), La gran crecida del río Paraná de 1983. *Techint. Boletín informativo Nro. 232* Buenos Aires.
- [2] Amsler M. (1988), Transporte de Sedimento en el tramo medio del río Paraná. Tercer informe de carrera de Investigador, Período 1986-87, CONICET, Instituto Nacional de Limnología, Santo Tomé, Argentina.
- [3] Amsler M. y Gaudin H. (1994), La superposición de dunas y el transporte de la carga de fondo en el río Paraná. *Memorias del XVI Congreso Nacional del Agua.*
- [4] Amsler M.(1998), Transporte de sedimentos en el Tramo Medio del Río Paraná. *Tercer informe de Carrera del Investigador (Período 1986-1987), CONICET, Instituto Nacional de Limnología*, septiembre.
- [5] Amsler M. y Schreider M.(1998), Dunes Height Prediction at Floods in the Paraná River (Argentina) *Proceedings of the seventh international Symposium on river sedimentation. Hong Kong. China. 16-18 december*
- [6] Amsler M.; Schreider M.; Prendes H.; Huespe J. y Zanardi L.(1992), Diseño del sobreancho del área de dragado para la obra de protección del Túnel Subfluvial. *Comisión Administradora Ente Túnel Subfluvial Hernandarias. Informe Final. F.I.C.H., U.N.L. Santa Fe. Argentina.*
- [7] Amsler M.; Prendes H.; Romano C. y Huespe J. (2000), Características de grandes dunas observadas en el río Paraná. *Anales del XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica Tomo I, Córdoba, Argentina.*
- [8] Amsler M.; Prendes H.; Romano C.; Huespe J.; Montagnini M. (2003), Predicción de alturas de formas de fondo en le Paraná. *Anales Congreso Nacional del Agua Córdoba, Argentina.*

- [9] Amsler M.; Prendes H.; Montagnini D.; Szupiani R.; García M.; (2003), Prediction of dune height in large sand-bed rivers: the case of the Paraná river, Argentina. *3rd. IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics*. Barcelona, España. 1104-1113.
- [10] Amsler M. (2003), Some technical aspects related to the stability of the Underwater Tunnel Uranga - Silvestre Begnis. *International Perspectives in Water Resources in Argentina*, Paraná, 20-21 Mayo.
- [11] ASCE Task Committee on Flow and Transport over Dunes (2002), Forum: Flow and Transport over Dunes. *Journal of Hydraulic Engineering*, **128**, 726-728.
- [12] Bagnold R. A. (1973), The nature of saltation and of bed-load transport in water *Royal Society of London Proceedings, ser A*,**332**, 473-504
- [13] Bennett S. J.; Bridge J. S. and Best J. L. (1998), Fluid and Sediment dynamics of upper-stage plane beds. *J. Geophys. Res.***103C1**, 1239-1274.
- [14] Best J. (2004), The dynamics and morphology of river dunes: synthesis and future research directions. *Marine Sandwave and River Dune Dynamics*. Enschede, the Netherlands, I-IV.
- [15] Carrasco A. and Vionnet C. (2004), Separation of scales on a broad, shallow turbulent flow. *Journal of Hydraulic Research*, **42**, 630-638.
- [16] Cheong H. and Xue H. (1997), Turbulence Model for Water Flow over Two-Dimensional Bed Forms *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE,**123**(5), 402-409.
- [17] Chow Ven Te(1988), Maidment D. and Mays L. (1988), Applied Hydrology. McGraw-Hill College.
- [18] Coleman S. and Fenton J.(2000), Potential-flow instability theory and alluvial stream bed forms. *Journal of fluid mechanics*. **418**, 101-117.
- [19] Coleman S. and Menville B. (1994), Bed-form development. *Journal of hydraulic Engineering*. ASCE,**120**(4), 544-560.
- [20] Coleman S. E. and Melville B. (1996), Initiation of bedforms on a flat sand bed. *Journal of Hydraulic Engineering*,ASCE, **122**, 301-310.
- [21] Coleman S. E. and Eling B. (2000), Sand wavelets in laminar open channel flows. *Journal of Hydraulic Res.*, **38**, 331-338.

- [22] Dietrich W. and Whiting P. (1989), Boundary shear stress and sediment transport in river meanders of sand and gravel. *River Meandering*. American Geophysical Union. Water Resources Monograph. Syunsuke Ikeda and Gary Parker Editors, **12**, 1-50.
- [23] Drago E. and Amsler M. (1988), Suspended sediment at a cross section of the Middle Paraná river: concentration, granulometry and influence of the main tributaries. *Sediment budgets* (Proceedings of the Porto Alegre Symposium. IAHS, **174**, 381-396.
- [24] Englund F. and Fredsoe J. (1974), Transition from dunes to plane bed in alluvial streams. *Series Paper 4*, Institute of Hydrodynamic and Hydraulic Engineering, Technical University Denmark.
- [25] FICH (1998), Taller Regional sobre Tópicos Básicos y Aplicados de la Hidráulica Fluvial. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, UNL, Santa Fe, Argentina.
- [26] Fedele J. (2000), Dune Velocity in Sand Bed Rivers. *HYDRA 2000*, Thomasss Telford, London, **5**, 37-42.
- [27] Ferziger J. H. and Peric M. (1999), Computational Methods for Fluid Dynamis. Springer, Berlin, Germany.
- [28] FICH (1998), Taller Regional sobre Tópicos Básicos y Aplicados de la Hidráulica Fluvial. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, UNL, Santa Fe, Argentina.
- [29] Fredsoe J. (1981), Unsteady flow in straight alluvial streams. Part 2. Transition from dunes to plane bed. *Journal of Fluid Mechanics*, **102**.
- [30] García M. H. and G. Parker (1993), Experiments on the Entrainment of Sediment into Suspension by a Dense Bottom Current. *Journal of Geophysical Research (Oceans)*, **98**, 4793-4807.
- [31] Gaudin H. (2003), Base de datos hidrológico - sedimentológico del sistema fluvial Santa Fe - Paraná. Informe interno proyecto FLAGS, FICH, UNL.
- [32] Gomez B. and Phillips J. (1998), Deterministic uncertainty in bed load transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, **125**(3), 305-308.
- [33] Guy H. P.; Simons D. B. and Richardson E. V. (1966), Summary of alluvial channel data from flume experiments; 1956-1961. *USGS Prof. paper 462-I*, Washington, D.C.

- [34] Habersack H. (1998), Numerical sediment transport models - theoretical and practical aspects. *Modelling soil erosion, sediment transport and closely related hydrological processes, Proc. Int. Symposium held at Vienna, IAHS Publ.*, **249**, 299-308
- [35] Henderson F. M. (1966), Open Channel Flow. *Macmillan Publishing Co.*, Inc.
- [36] Holly F. and Rahuel J. (1990), New Numerical/physical framework for mobile-bed modelling. *Journal of hydraulic research*, **28**(5), 401-416.
- [37] Huespe J. (2005), Entrevista personal, Santa Fe, Argentina.
- [38] HYTSA Estudios y Proyectos (1987), Cruce Subfluvial del Gasoducto Mesopotmico. *Vol. D y E: Estudios hidráulicos*.
- [39] Julien P. (1995), Erosion and Sedimentation. *Cambridge University Press*.
- [40] Kennedy J.(1969), The formation of Sediment Ripples, Dunes and Antidunes. *Annual Rev. of Fluid Mechanics*, **1**, 147-168.
- [41] Kline S. J.; Reynolds W.C.; Schraub F. A. and Runstadler P. W. (1967), The structure of turbulent boundary layers. *Journal of Fluid Mechanics*, **30**, 741-773.
- [42] Kostachuk R. and Villard P. (1996), Flow and Sediment Transport Over Large Subaqueous Dunes: Fraser River Canadá. *Sedimentology*, **43**, 849-863.
- [43] Lelièvre and Navntoft E. (1980), Measuring Sediment load in the Paraná river. *Water and Dam Contr.*,21-24.
- [44] Lima D.; Campana N.; Amsler M.; Schreider M. and Gaudin H. (1990), Desplazamiento de Dunas y Carga de Fondo en un tramo del Río Paraná. *XIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, 1203-1214.
- [45] Lyn D.and Altinakar M.(2002), St. Venant-Exner Equations for Near-Critical and Transcritical Flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, **128**(6), 579-587.
- [46] Maddux, T. B; Nelson J. M. and McLean S. R (2003), Turbulent flow over three dimensional dunes: 1. Free surface and flow response. *Journal of Geophysics*, **108**, doi:10.1029/2003JF000017.
- [47] Marti C. (1998), Análisis de la estabilidad de un lecho erosionable con la aproximación de ondas largas. *Tesis de Magister*. FICH. UNL.

- [48] Marti C. y Vionnet C. (1998), Espectros de Dunas una comparación entre datos de campo y de laboratorio. Taller regional sobre tópicos básicos y aplicados de la hidráulica fluvial. Santa Fe, 123-128.
- [49] Matar M. (2002), Estructura del flujo medio y de la turbulencia inducida por formas de fondo superimpuestas a dunas bidimensionales. Magíster en Ing. Rec. Hídricos, FICH, UNL, Santa Fe, Argentina.
- [50] McLean S. and Dungan Smith J. (1986), A model for flow over two-dimensional bed forms. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, **112**(4), 300-317.
- [51] Mendoza C. and Shen H. (1990), Investigation of turbulent flow over dunes. *Journal of Hydraulic Engineering*. **116**(4), 459-477.
- [52] Montagnini D.; Zanardi L. y Schreider M. (1998), Erosión local en una tubería parcialmente enterrada. *Anales del XVII Congreso Nacional del Agua - Santa Fe, Argentina*, 397-399.
- [53] Molinas A. (1994), BRI-STARS Maintenance Support and Enhancement. National Cooperative Highway Research.
- [54] Morris P. H. and Williams D. J. (1996), Relative celerities of mobile bed flows with finite solid concentrations. *Journal of Hydr. Engr.*, ASCE **122**(6), 311-315.
- [55] Motor Columbus and Associates (1978), Navigation Studies of the Paraná and Paraguay Rivers. *Final Report*, Ente Binacional Yaciretá Paraguay-Argentina, Buenos Aires.
- [56] Nikora V. and Goring D. (2002), Fluctuations of Suspended Sediment Concentration and Turbulent Sediment Fluxes in an Open Channel Flow. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, **128**(2), 214-224.
- [57] Nikora V. and Hicks M. (1997), Scaling Relationships for Sand Wave Development in Unidirectional Flow. *Journal of Hydraulic Engineering*. **123**(12), 1152-1156.
- [58] Niño, y. and García. M. H. (1998), Using Lagrangian Particle Saltation Observations for Bed-load Sediment Transport Modeling. *Hydrological Processes*, **12**, 1197-1218.
- [59] Nordin C. and Algert J.(1966), Spectral Analysis of Sand Waves. *Journal of de Hydraulics Division*. **92**, HY5, 95-114.
- [60] Paoli C. y Schreider M. (2000), El Río Paraná en su tramo medio. Tomo I, UNL. Santa Fé, Argentina.

- [61] Paoli C. y Cacik P. (2000), El Río Paraná en su tramo medio. Tomo II, UNL. Santa Fé, Argentina.
- [62] Parker G. (1976), On the cause and characteristic scales of meandering and braiding in rivers. *Journal of Fluid Mechanics*. **76**, 457-480.
- [63] Parker G. (1998), Some of the still unanswered questions in fluvial mechanics. *Taller Regional sobre Tópicos Básicos y Aplicados de la Hidráulica Fluvial*, 139-141.
- [64] Parker G.; Paola Ch. and Lecair S. (2000), Probabilistic Exner Sediment Continuity Equation for Mixtures with no Active Layer. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, **126**(11), 818-826.
- [65] Parsons D.; Best J.; Lane S.; Kostaschuck R; Orfeo O. and Hardy R. (2004), The morphology and flow field of three-dimensional dunes, Río Paraná, Argentina: results from simultaneous multibeam echo sounding and acoustic Doppler profiling. *Marine Sandwave and River Dynamics*, Enschede, the Netherlands.
- [66] Partheniades E. (1965), Erosion and Deposition of Cohesive Sediments. *J. of Hyd. Div.*, ASCE **91**(1), 105-139.
- [67] Prendes H.; Huespe J.; Schreider M.; Amsler M. y Zanardi L.(1994), Pronóstico de evolución de una trinchera dragada en un cauce aluvial. Influencia de las distintas modalidades de transporte. *Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Santiago, Chile, 393-403.
- [68] 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*, **2**, 405-416.
- [69] Pujol A. y Manéndez A. (1987), Análisis unidimensional de escurrimiento en canales. EUDEBA.
- [70] Raudkivi A. (1966), Bed forms in alluvial channels. *Journal of Fluid Mechanics*. **26**(3), 507-514.
- [71] Schreider M. and Amsler M. (1992), Bedforms steepness in alluvial streams. *Journal of Hydraulic Research*. **30**, 725-743.
- [72] Sidorchuk A. (1999), Desplazamiento de formas de fondo sobre la barrera Sheshurovskaja en el río Vichegdá. *Recursos Hídricos*, **5**.

- [73] Sidorchuk A.(1990), Cálculo de la velocidad de transporte de formas de fondo y del caudal de material en suspensión. *Recursos Hídricos*, **5**.
- [74] Strasser M. (1999), Modelo hidrodinámico-sedimentológico unidimensional en redes del sistema fluvial Santa Fe - Paraná. Informe final Cientibeca'96, FICH, UNL, Santa Fe, Argentina.
- [75] Stoker J. J. (1957), *Water Waves*, Interscience Publishers Inc., New York.
- [76] Stuckrath T (1969), Movimiento de las ondulaciones del lecho del Río Paraná. *Mitteilungen des Franzius Institute. Universitat Hannover*. Nov. 1969, (Traducción al español por el Ing. M. H. Balderiote).
- [77] Tassi P. (2000), The representation of floodplain flow resistance in a 2D channel-floodplain modeling. *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> international Symposium on Environmental Hydraulics*, Temple, AZ, December 5-8.
- [78] Tassi P. (2001), Integración de Tecnologías para la Simulación Numérica del escurrimiento de un gran río de llanura. *Tesis de Maestría en Ingeniería de los Recursos Hídricos* Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral.
- [79] Tassi P. and Vionnet C. (2001), Testing the capabilities of the Sed2d Sediment Transport Rotine. *Proceedings of the ASCE Joint Conference on Water Resources Engineering and Water Resources Planning and Management (CD ROOM)*, Mimeapolis, Minnesota.
- [80] Tassi P. and Vionnet C.A.(2002), Benchmark solutions for the assessment of computer codes based on the shallow water equations. *Proc. of the First South-American Congress on Computational Mechanics VII Argentine Congress on Computational Mechanics*, Santa Fe-Paraná, Argentina, October 2002.
- [81] Tassi P. (2006), Numerical simulation of free bars formation with the discontinuous Galerkin Method. Tesis Doctoral CONICET/Alβan en elaboración.
- [82] TECHINT ORGANIZACION (1984), El fenómeno denominado El Niño y las inundaciones del Paraná. Boletín Informativo Nro. 235.
- [83] Tevez A.; Mattar M.; Toniolo H.; Fernández R. and López F. (1999), Mean Flow and Turbulence Structure Over Dunes with Superimposed Samller Bedforms. XXVII IAHR Biennial Congress. Graz, Australia, 412.



- [84] Trento A.; Amsler M. y Pujol A. (1990), Perfiles observados de velocidad en un tramo del Río Paraná - Análisis teórico. *Anales del XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, **3**, 1109-1121.
- [85] Trento A. (1992), Simulación Numérica de un escurrimiento turbulento sobre un tren de dunas en canal de laboratorio. *Anales del ENIEF, 8 Congreso sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones*. 405-414.
- [86] Toniolo H. (1999), Las divagaciones del thalweg del río Paraná. Tesis para el Grado de Magister en Ingeniería de los Recursos Hídricos. FICH. UNL.
- [87] Toniolo H.; Pujol A. y Schreider M. (1996), Tubo Pitot-transductor de presiones diferenciales: una combinación exitosa. *XVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, **6**, 205-215.
- [88] Urciuolo V.; Brassiolo F. and Ordas J. (1965), Túnel Subfluvial Paraná - Santa Fe, estudios realizados en canal de vidrio. *Publicación de la Fac. de Cs. Exactas Físicas y Naturales. U.N.C.*
- [89] USACE (1993). HEC-6, Scour and Deposition on Rivers and Reservoirs. Users Manual. U.S. Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineer Center, Davis, California.
- [90] van der Mark; Blom A.; Hulscher S.J.M.H.; Leclair S.F. and Mohrig D. (2005), On modeling the variability of bedform dimensions. *River, Coastal and Estuarine Morphodynamics: RCEM 2005* Parker and García (eds), 831-841.
- [91] van Rijn L. C. (1984), Sediment Transport, Part I: Bed Load Transport. *J. Hydraulic Engineering*, **110**, 14311457.
- [92] van Rijn L. C. (1984), Sediment Transport, Part II: Suspended Load Transport. *J. Hydraulic Engineering*, **110**, 16131641.
- [93] van Rijn L. (1984), Sediment Transport, Part III: Bed Forms and Alluvial Roughness. *J. Hydraulic Engineering*, **110**, 17331755.
- [94] van Rijn L. (1986), Mathematical Modeling of Suspended Sediment in NonUniform Flows *Journal of Hydraulic Engineering*, **112**, 433-455
- [95] van Rijn L. (1993), Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas. *Oldemarkt: Aqua publications*, The Netherlands.
- [96] Vanoni V. A. (1975), Sedimentation Engineering. *ASCE Task Committee on Sediment*, Eng, New York, 745 pp.

- [97] Vionnet C. (2004), Transporte de Sedimentos por formas de fondo de diversos tamaños. *Informe CENEHA 02-04* CENEHA, FICH, UNL, Santa Fe, Argentina.
- [98] Vreudenhill C. B. (1998), Numerical Methods for Shallow Water Flow. *Fluwer Academic Publishers*, The Netherlands.
- [99] Wu W.; Rodi W. and Wenka T. (2000), 3D Numerical Modeling of Flow and Sediment Transport in Open Channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, **126**, 4-15.
- [100] Yoon and Patel (1996), Numerical Model of Turbulent Flow over Sand Dune *J. Hydr. Engrg.*, **122**, Issue 1, 10-18.