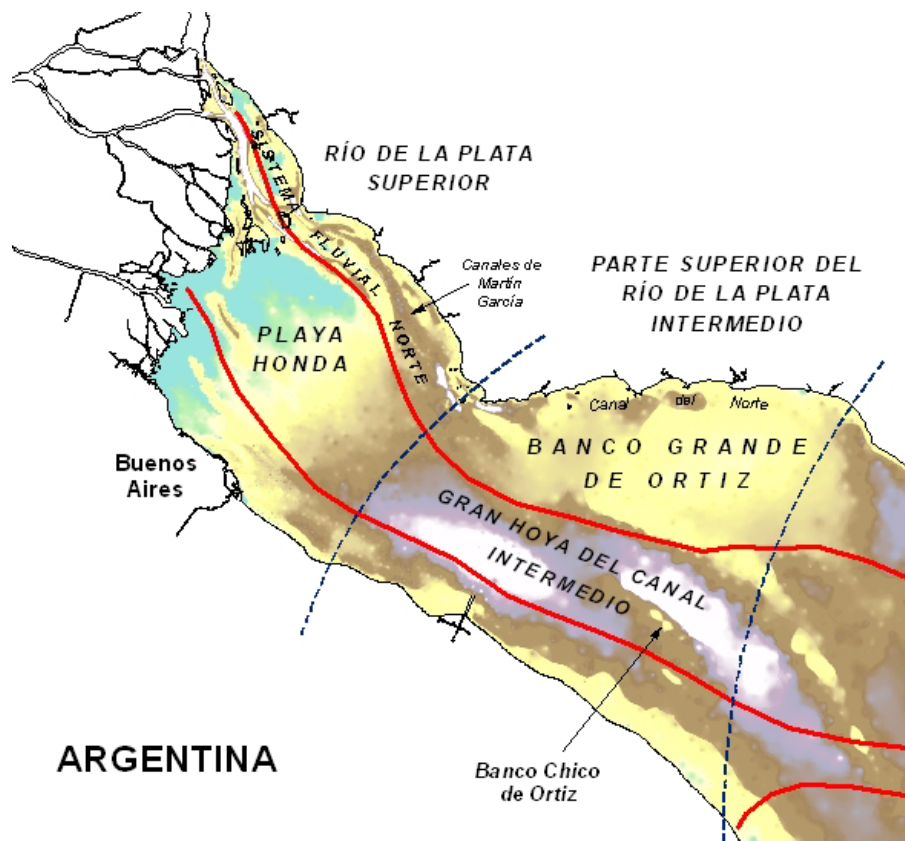




Modelación Hidro-Sedimentológica del Río de la Plata

MODELO CONCEPTUAL Y FORZANTES



AUTORIDADES DEL INA

PRESIDENTE

Dr. Raúl A. LOPARDO

GERENTE DE PROGRAMAS Y PROYECTOS

Ing. Jorge A. MAZA

DIRECTOR DEL LABORATORIO DE HIDRÁULICA

Ing. Julio C. DE LÍO

JEFE DEL PROGRAMA DE HIDRÁULICA COMPUTACIONAL

Dr. Ángel N. MENÉNDEZ

DIRECTOR DEL PROYECTO

Dr. Ángel N. MENÉNDEZ

EQUIPO DE TRABAJO

Ing. Mariano RE

Ing. Alejo SARUBBI

Ing. Pablo GARCÍA

INFORME PRODUCIDO POR

Dr. Ángel N. MENÉNDEZ

Ing. Mariano RE

Modelación Hidro-Sedimentológica del Río de la Plata

MODELO CONCEPTUAL Y FORZANTES

Informe

Ángel N. Menéndez y Mariano Re

RESUMEN

Se presenta un modelo conceptual del transporte de sedimentos en el Río de la Plata, basado en la interpretación del flujo a partir de un desarrollo en tres corredores, con muy poca mezcla entre ellos. Además, se desarrolla una metodología de cálculo de los aportes de sedimentos de los tributarios del Río de la Plata.

Descriptores temáticos: Modelación Hidrodinámica, Modelación Sedimentológica, Transporte de Sedimentos Finos.

Descriptores geográficos: Río de la Plata, Proyecto FREPLATA.

ÍNDICE

MODELO CONCEPTUAL Y FORZANTES	1
1 INTRODUCCIÓN	2
2 MODELO CONCEPTUAL	3
2.1 Introducción	3
2.2 Morfología del Rio de la Plata.	3
2.3 Texturas del sedimento de fondo.	4
2.4 Sedimento en suspensión	7
2.5 Frente del Delta del Paraná	11
2.6 Síntesis	12
3 FORZANTES SEDIMENTOLÓGICOS	14
3.1 Consideraciones generales	14
3.2 Caudales líquidos	14
3.3 Sedimentos finos	16
3.4 Sedimentos gruesos	22
4 CONCLUSIONES	26

1 INTRODUCCIÓN

El Proyecto PNUD/GEF/RLA/99/G31: "Protección Ambiental del Río de la Plata y su Frente Marítimo: Prevención y Control de la Contaminación y Restauración de Hábitats" ha encomendado al INA su participación en un grupo de trabajo binacional que tiene por finalidad la instrumentación de un modelo hidrodinámico y sedimentológico para el Río de la Plata, que permita mejorar los conocimientos sobre los aportes sedimentarios en su cauce y obtener la información necesaria para optimizar la gestión en la zona de estudio. El grupo está conformado por personal del Servicio de Hidrografía Naval – SHN (RA), del Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera – CIMA (RA), del Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Pesquero - INIDEP (RA), del Instituto Nacional del Agua - INA (RA), y del Servicio de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología de la Armada – SOHMA (ROU), contando además con la participación de una post doctorando francesa del Instituto Francés de Investigación para la Explotación del Mar – IFREMER (Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer).

En el Primer Informe (LHA 01-296-08, junio de 2008) se presentó el Plan de Trabajo del INA. En el Segundo Informe (LHA 02-296-08, agosto de 2008) se describió la dinámica general de los sedimentos. En este Tercer Informe se plantea un modelo conceptual de flujo de sedimentos en el Río de la Plata Interior, y se desarrolla la metodología para la determinación de las cargas sólidas de los tributarios.

2 MODELO CONCEPTUAL

2.1 Introducción

El modelo conceptual del transporte de sedimentos en el Río de la Plata Interior está basado en la interpretación del flujo a partir de un desarrollo en tres corredores de flujo, con muy poca mezcla entre ellos. La morfología de fondo del río provee evidencias en cuanto a los patrones de sedimentación. Las texturas de los sedimentos de fondo resultan consistentes con la hidrodinámica de los corredores de flujo y la concentración de sedimento en suspensión. Este modelo conceptual será críticamente utilizado como una referencia para el estudio de transporte de sedimentos en el Río de la Plata con el modelo numérico, pero a la vez será verificado y, eventualmente, corregido.

2.2 Morfología del Río de la Plata.

En la Figura 2.2.1 se presenta el Modelo Digital del Terreno (MDT) del fondo del Río de la Plata Interior (RPI), en donde se han identificado las unidades morfológicas (CARP, 1989).

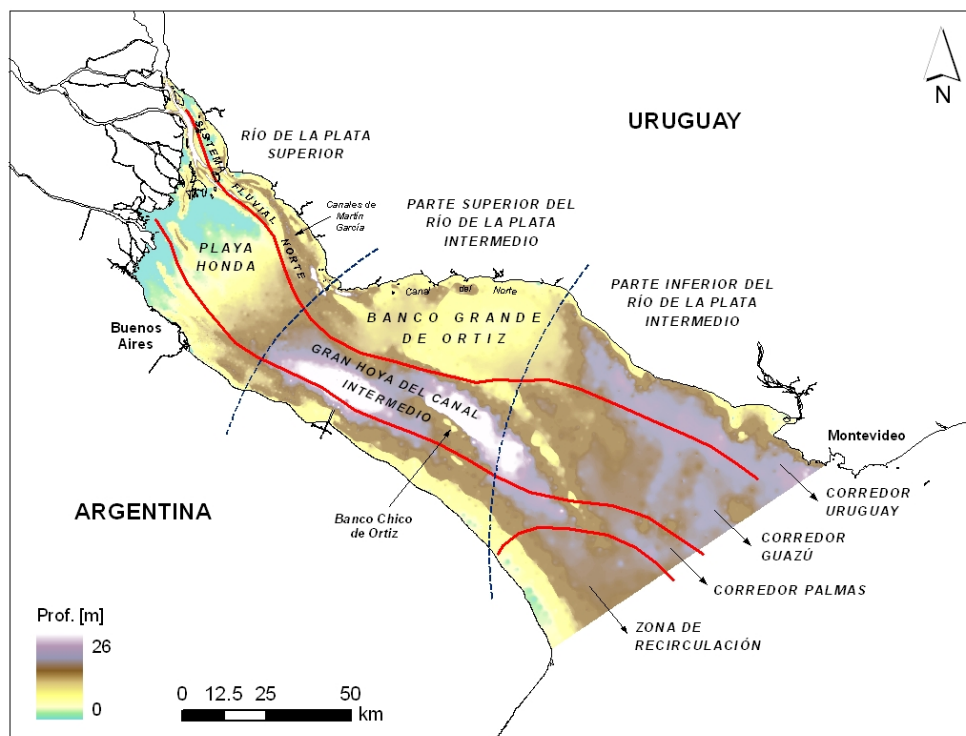


Figura 2.2.1. Morfología del Río de la Plata.

Desde aguas arriba hacia aguas abajo se distinguen tres zonas: el Río de la Plata Superior (RPS), el Río de la Plata Intermedio Interior (RPII) y el Río de la Plata Intermedio Exterior (RPIE). Además, se observan los tres corredores de flujo, que constituyen una representación del flujo medio del río, cada uno de ellos asociado a los principales tributarios: Paraná de las Palmas, Paraná Guazú y Uruguay, con una mezcla mínima entre ellos (Jaime *et al.*, 2001, Menéndez *et al.*, 2002). Se advierte, también, la existencia de una zona de recirculación sobre la costa argentina.

En el RPS, el banco Playa Honda es el sitio de deposición de sedimentos transportados en suspensión a través de los corredores Palmas y Guazú. La deposición es menor en el Sistema Fluvial Norte, asociado al corredor Uruguay, donde se mantienen profundidades relativamente altas en los canales de Martín García; estos efectos se deben al confinamiento entre el corredor Guazú y la estable costa uruguaya.

En la zona del RPII, la expansión en ancho del corredor Uruguay, luego del punto de referencia rocoso de Colonia, ha permitido la formación del Banco Grande de Ortiz, mientras el flujo principal procede por el Canal del Norte, adyacente a la costa uruguaya. En el caso del corredor Guazú, el flujo mantiene altas profundidades tanto a lo largo como a lo ancho (Hoya Grande del Canal Intermedio), salvo por el Banco Chico de Ortiz. A lo largo del corredor Palmas se presentan evidencias de sedimentación costera.

En el RPIE, la morfología del fondo parece tener influencia oceánica (lo que tiene que ver con las ondas de marea meteorológica, relacionadas con las Sudestadas). Se observan profundidades relativamente altas en los tres corredores, excepto en la zona del Banco Grande de Ortiz hacia el océano. En la zona de recirculación, adyacente a la costa argentina, se dan procesos importantes de sedimentación.

2.3 Texturas del sedimento de fondo.

La figura 2.3.1 presenta, junto con los corredores de flujo, la distribución de texturas de sedimento de fondo según Laborde y Nagy (1999), de acuerdo al *Triángulo de Texturas de Suelos de Shepard* (Shepard, 1954). Un mapa más detallado de las texturas de sedimento de fondo para el Río de la Plata Superior fue desarrollado por Urien (1966), como se muestra en la figura 2.3.2, donde también se representan los corredores de flujo. En la figura 2.3.3 se representa una zonificación del sedimento de fondo de acuerdo a su asociación genética (Parker *et al.*, 1985), junto con los corredores de flujo. Se advierte que en esta representación no existe una distinción entre las contribuciones de los ríos Uruguay y Paraná Guazú.

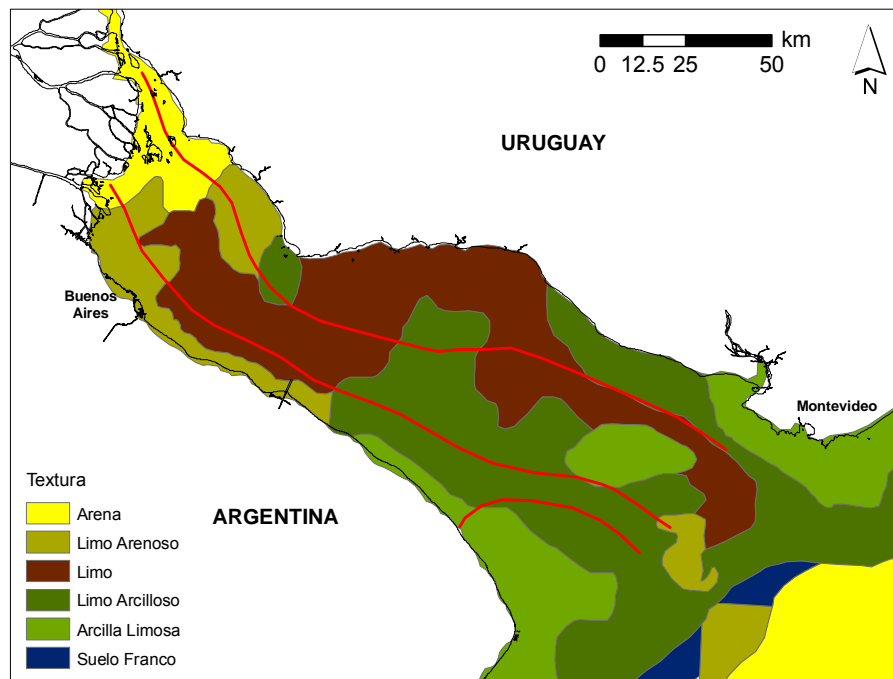


Figura 2.3.1. Distribución de texturas de sedimento de fondo en el Río de la Plata Interior según Laborde y Nagy (1999).

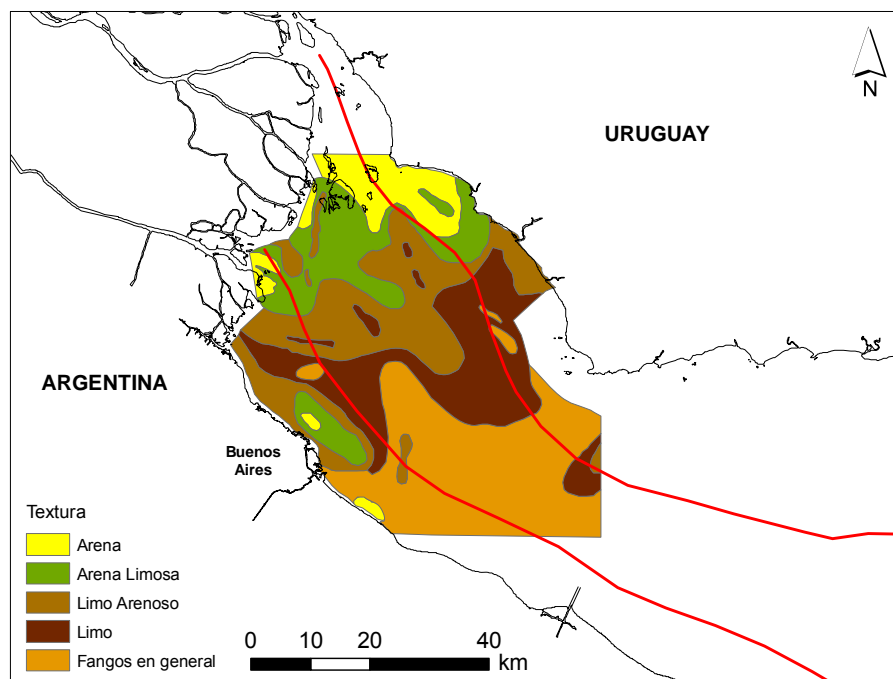


Figura 2.3.2. Distribución de texturas de sedimento de fondo en el Río de la Plata Superior según Urien (1966).

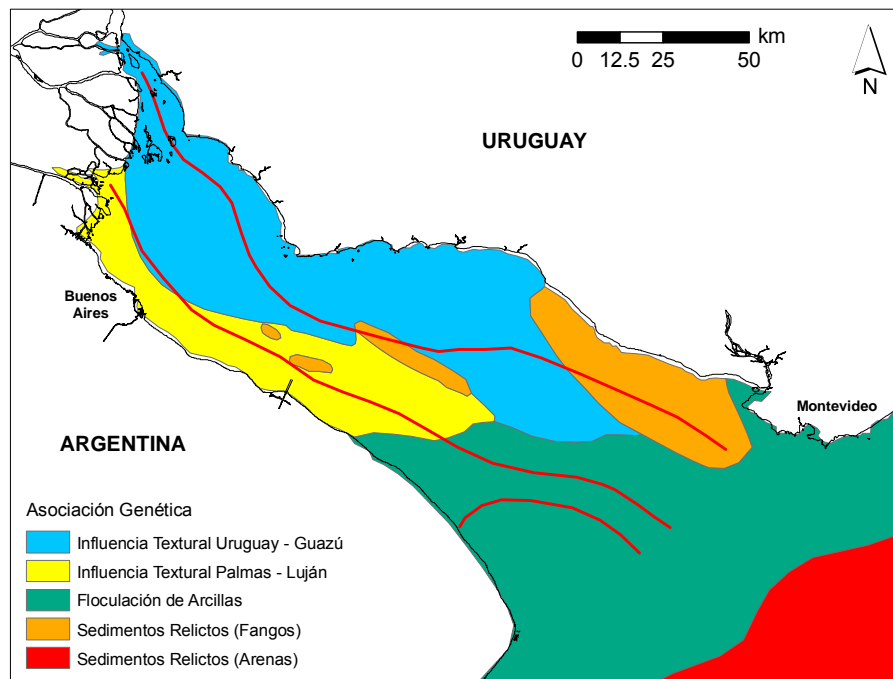


Figura 2.3.3. Asociación genética de sedimentos en el Río de la Plata Interior (Parker et al., 1985)

A partir de la base de datos originales de texturas de sedimentos de 11 fuentes diferentes, provista por el SOHMA (Servicio de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología de la Armada – Uruguay), se efectuó una categorización según la representación del *Triangulo de Texturas de Suelo del USDA*, la que se muestra en la figura 2.3.4.

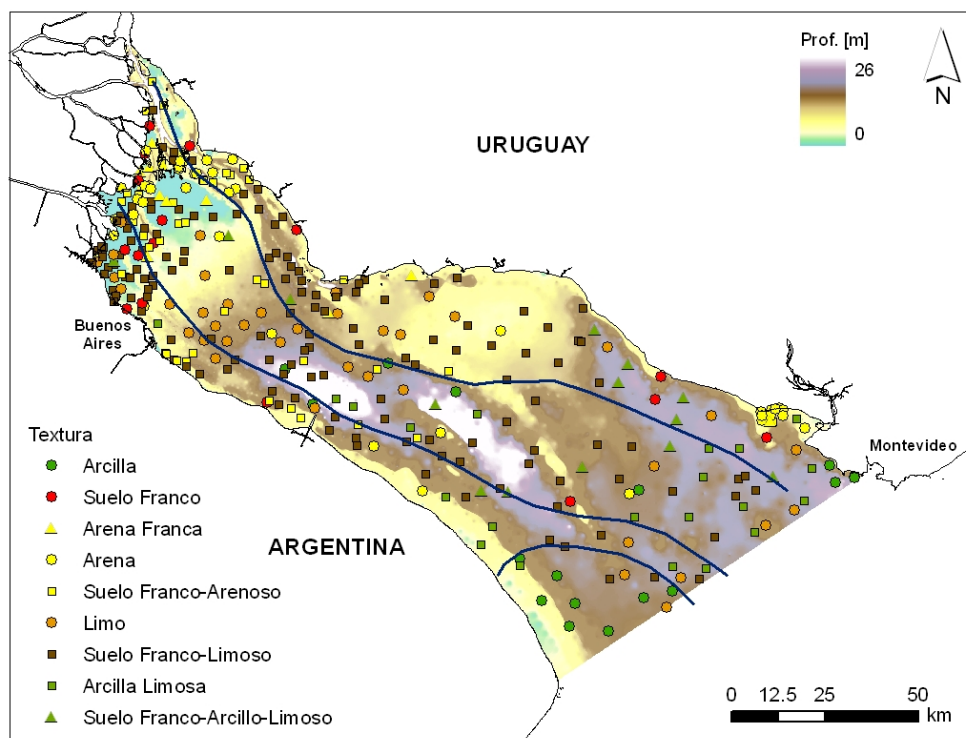


Figura 2.3.4. Categorización de muestras puntuales de suelo, unidades morfológicas y corredores de flujo en el RPI.

Cruzando esta información con la de los corredores de flujo (figura 2.3.4), y teniendo en cuenta los antecedentes explicitados, se construyó una distribución conceptual de sedimentos (figura 2.3.5), que indica zonas con texturas dominantes. Se observa que:

- Las Arenas y los Suelos Franco-Arenosos dominan las zonas de los extremos superiores de los corredores Guazú y Uruguay.
- Los Limos y los Suelos Franco-Limosos siguen como textura dominante hacia aguas abajo a través del Río de la Plata Superior, extendiéndose más allá del mismo a lo largo de los corredores Palmas y Uruguay.
- Los Suelos Franco-Limosos y las Arcillas Limosas predominan a continuación en los corredores Guazú y Palmas, cubriendo el resto de ellos.
- Los Suelos Franco-Arcillo-Limosos predominan prácticamente en el resto del corredor Uruguay.
- Las Arcillas predominan en la zona de recirculación y, como un parche, en la zona costera uruguaya, cerca de Montevideo.

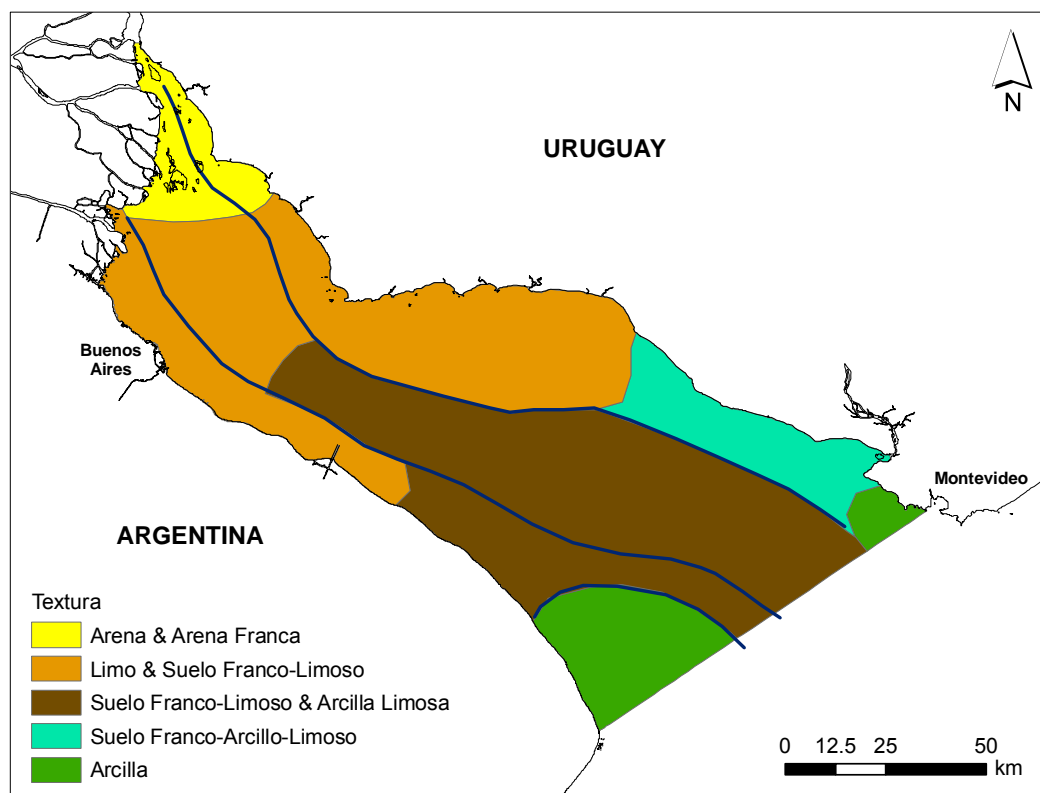


Figura 2.3.5. Distribución conceptual de sedimentos.

2.4 Sedimento en suspensión

Las cargas de fondo de los ríos Uruguay y Paraná prácticamente no alcanzan el Río de la Plata. Sí lo hace la carga en suspensión de los mismos, incluyendo tanto las arenas finas como la carga de lavado. La carga de lavado del río Paraná está compuesta aproximadamente por ($C_s =$) 300 mg/l de limos y ($C_c =$) 100 mg/l de arcillas, tal como surge

de mediciones en Paso Alvear, en el Km. 406 del río Paraná (figura 2.4.1) presentadas en Menéndez (2001). La carga de lavado del río Uruguay es mucho menor, del orden de los 100 mg/l.

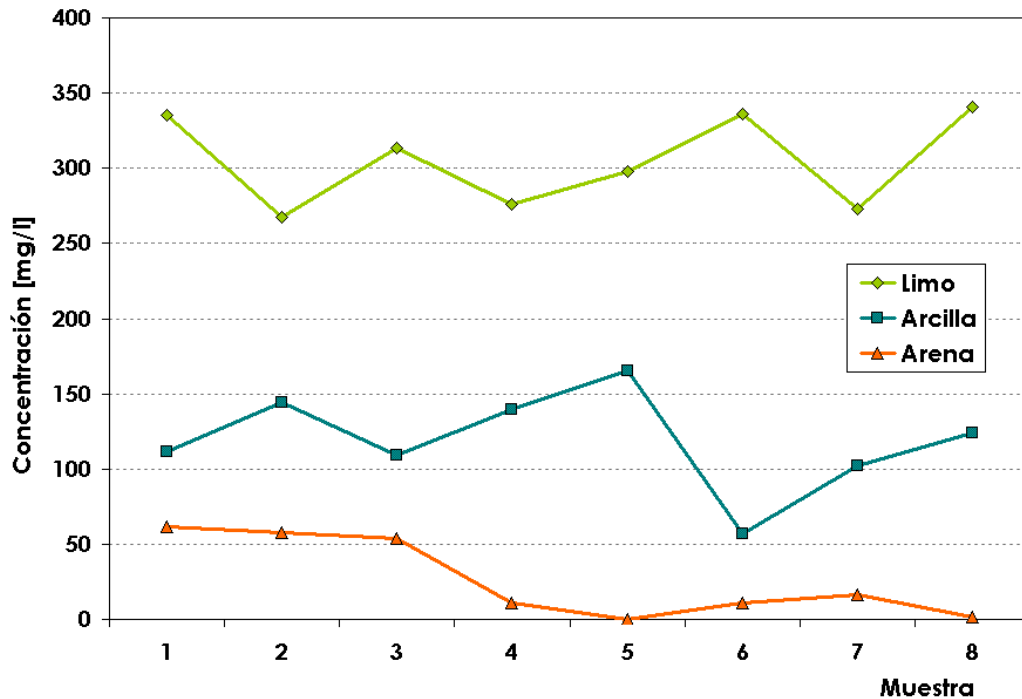


Figura 2.4.1. Concentraciones de carga de lavado en Paso Alvear

Las fracciones principales de arena fina y limos gruesos transportadas por el Paraná Guazú y el Paraná de las Palmas se depositan luego de su desembocadura en el Río de la Plata, provocando el continuo avance del Frente del Delta del Paraná.

Una porción de los limos que constituyen la carga suspendida de los corredores Palmas y Guazú, se depositan en el Banco Playa Honda, lo que provoca el crecimiento continuo del mismo. El proceso de sedimentación está claramente indicado por el decrecimiento en la concentración de sedimento en suspensión hacia aguas abajo desde el Frente del Delta, como se muestra en la figura 2.4.2 (Menéndez, 2001).

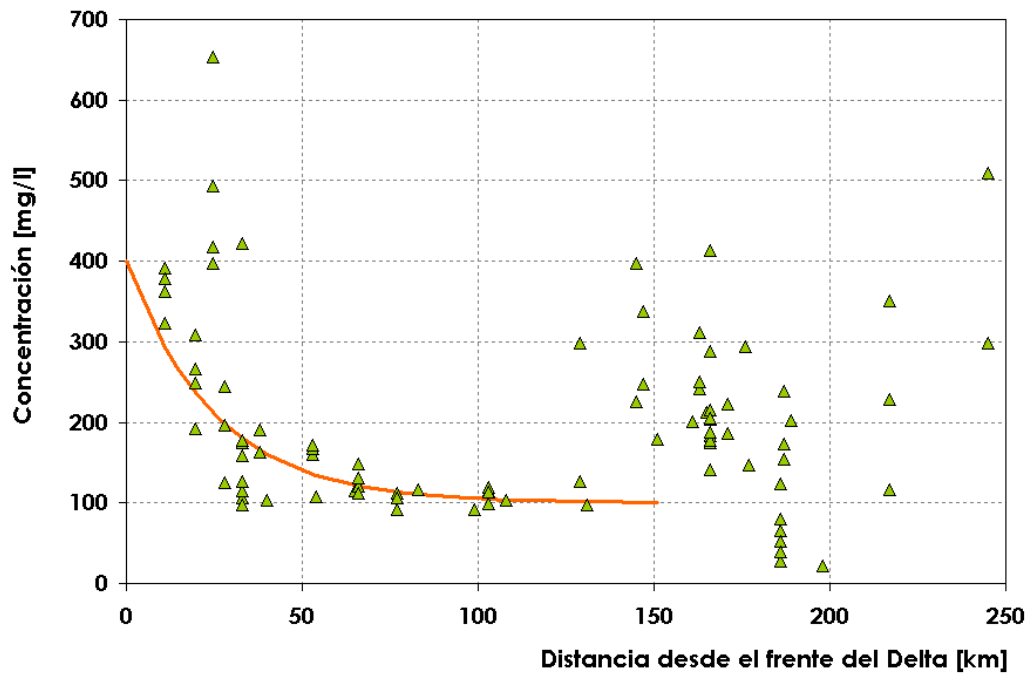


Figura 2.4.2. Concentración de sedimento en suspensión hacia aguas abajo desde el Frente del Delta del Paraná.

La curva de ajuste que se indica en la figura 2.4.2 tiene la siguiente expresión:

$$C(x) = C_c + C_s e^{-x/L} \quad (1)$$

donde x es la coordenada espacial a lo largo del canal de navegación, que prácticamente se encuentra incluido dentro del corredor Palmas ($x = 0$ es el Frente del Delta), y $L = 25$ km.

La ecuación (1) es la solución de la ecuación de advección-deposición:

$$U \frac{dC}{dx} = -\frac{w_s}{H} PC \quad (2)$$

donde U es la intensidad de la corriente de deriva, w_s la velocidad de caída del sedimento, H la profundidad de agua, y P el factor de probabilidad de deposición debido a Krone (van Rijn 1993):

$$P = \begin{cases} 1 - \frac{u_*}{u_{*d}} & \text{si } u_* < u_{*d} \\ 0 & \text{si } u_* \geq u_{*d} \end{cases} \quad (3)$$

siendo u^* la velocidad media de corte debido a la marea, y u_{*d} su valor crítico de deposición.

La profundidad media en el Río de la Plata Superior es de aproximadamente 4 m, y la velocidad de deriva de 0,10 m/s (Menéndez, 2001). Teniendo en cuenta que el coeficiente

de rugosidad de Manning es de 0,015 (Jaime y Menéndez, 1999), la velocidad de corte (basada en la velocidad de deriva) vale $u^* = 7,1$ mm/s. La velocidad de corte crítica de deposición ha sido estimada en estudios previos como $u^*_d = 8$ mm/s para limos (Harrison y Owen, 1971); ésta es mucho menor en el caso de las arcillas, indicando que no existe deposición.

Como $L = UH / (Pw_s)$, resulta que $w_s = 0,075$ mm/s para limos, lo que corresponde a un diámetro medio $d_{50} = 9$ μm , consistente con las observaciones, como se muestra en la figura 2.4.3 (Menéndez, 2001). Se advierte que, a unos 120 km del frente del Delta, aparece un incremento en la concentración de sedimento en suspensión (figura 2.4.2), indicando la presencia de una fuente de sedimentos (erosión).

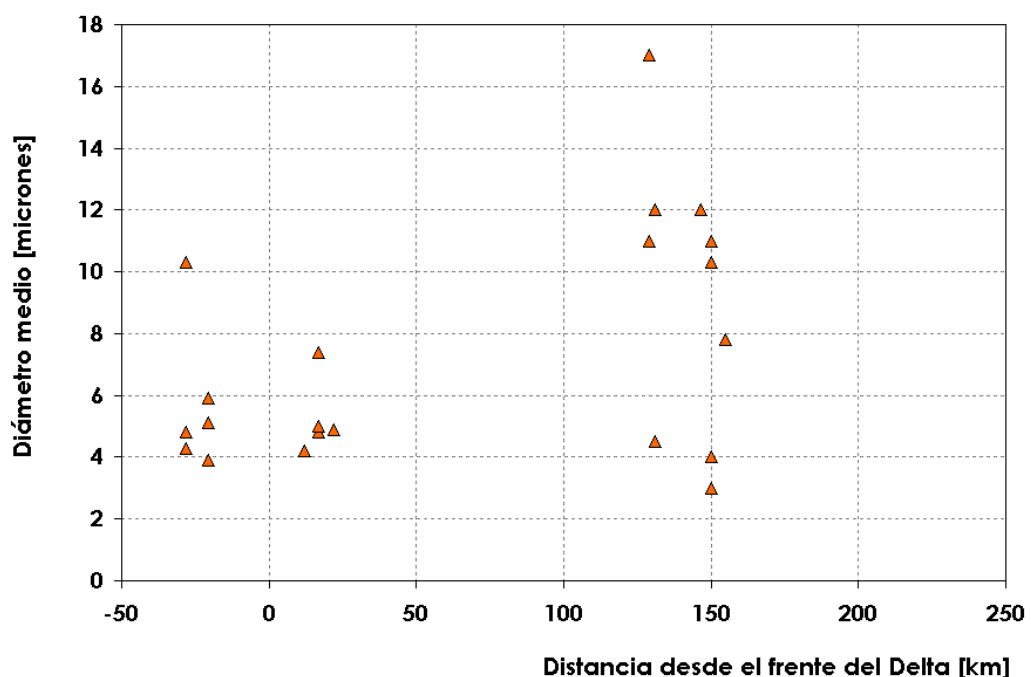


Figura 2.4.3. Diámetro medio del sedimento hacia aguas abajo, desde el Frente del Delta del Paraná

La tasa de sedimentación en el Banco de Playa Honda puede ser obtenida de la siguiente manera:

$$S(x) = \frac{w_s}{(1-p)} PC(x) \quad (4)$$

donde p es la porosidad de los depósitos de limos, la cual vale aproximadamente 0,5 (Menéndez, 2001). Esta tasa se representa en la figura 2.4.4. Se observa que del orden de los 10 cm/año cerca del frente del Delta.

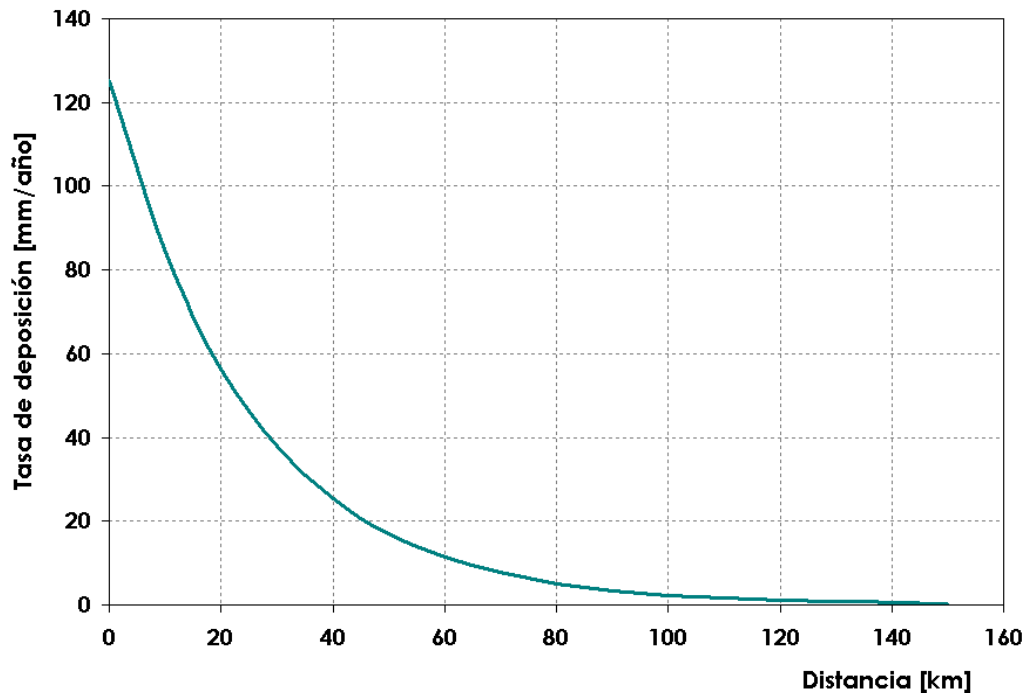


Figura 2.4.4. Tasa de sedimentación hacia aguas abajo, desde el Frente del Delta del Paraná

2.5 Frente del Delta del Paraná

La figura 2.5.1 muestra el avance del Frente del Delta del Paraná durante los últimos dos siglos. La tasa de avance medio está dentro del rango 50-75 m/año al sur, bajo la influencia del corredor Palmas, y 25 m/año al norte, dentro del corredor Guazú (Menéndez y Sarubbi, 2007). El crecimiento del Delta está dado por la deposición de la fracción gruesa de las respectivas cargas de sedimentos en suspensión, constituidas por arenas finas y limos gruesos. Esta fracción constituye aproximadamente el 5% del sedimento en suspensión (Sarubbi, 2007).

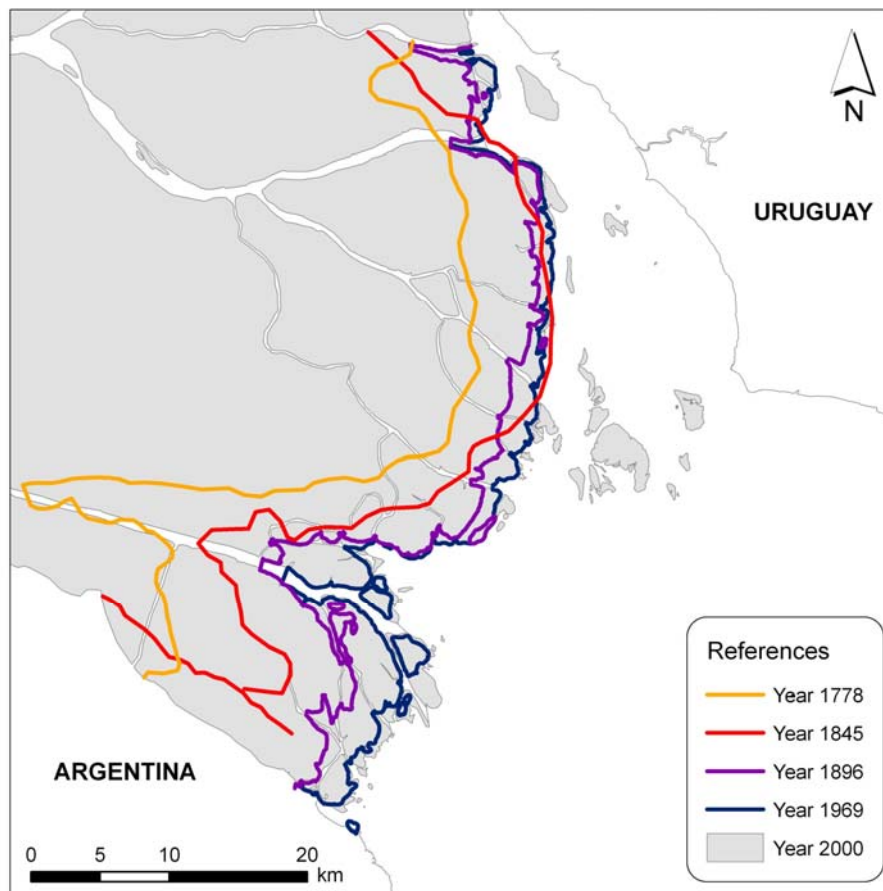


Figura 2.5.1. Avance del Frente del Delta del Paraná

2.6 Síntesis

Como síntesis de las consideraciones anteriores, surge la siguiente descripción conceptual referente al transporte de sedimentos en el Río de la Plata Superior:

A lo largo del corredor Palmas:

- (i) La fracción gruesa de la carga en suspensión (arenas finas y limos gruesos), proveniente del Paraná de las Palmas, se deposita apenas desemboca en el Río de la Plata, generando el avance del sub-frente sur del Frente del Delta del Paraná, a una tasa media en el rango de 50-75 m/año.
- (ii) Una relativamente alta tasa de deposición se produce apenas aguas abajo del Frente del Delta, haciendo crecer el Banco Playa Honda.
- (iii) La textura de sedimentos predominante en el fondo de esta zona es la de Limos y Suelos Franco-Limosos.
- (iv) La deposición disminuye exponencialmente con la distancia, debido al decrecimiento de las concentraciones de limos. A partir de unos 100 km desde el frente del Delta, la composición de la carga en suspensión está dominada por las arcillas.

- (v) En esta última zona, donde se siente la influencia oceánica, predominan los Suelos Franco-Limosos y Franco-Arcillosos son predominantes en las texturas de sedimento de fondo.

A largo del corredor Guazú:

- (i) La fracción gruesa de la carga en suspensión, provista por el Paraná Guazú, colabora con el avance del sub-frente norte del Frente del Delta del Paraná, a una tasa media de aproximadamente 25 m/año.
- (ii) La mayor parte de la arena fina en suspensión se deposita aguas abajo del Frente del Delta del Paraná, mostrando una zona con texturas de sedimento de fondo predominantes del tipo Arenas y Suelos Franco-Arenosos.
- (iii) Como en el corredor Palmas, se da una alta tasa de deposición, permitiendo el crecimiento del Banco Playa Honda, donde predominan texturas de sedimentos de fondo del tipo Limos y los Suelos Franco-Limosos.
- (iv) Una vez en el Río de la Plata Intermedio Superior, los Suelos Franco-Limosos y las Arcillas Limosas son predominantes como texturas de sedimentos de fondo, manteniéndose naturalmente profundidades relativamente altas, indicando bajas tasas de deposición.

A lo largo del corredor Uruguay:

- (i) La mayor parte de las arenas finas en suspensión se depositan luego de la desembocadura del río Uruguay, permitiendo una predominancia de Arenas y Suelos Franco-Arenosos como texturas de sedimento de fondo;
- (ii) Las altas velocidades de escurrimiento, alcanzadas por el confinamiento de este corredor entre la costa uruguaya y el corredor Guazú, resultan en tasas de deposición más bajas a lo largo del Sistema Fluvial Norte, donde existen relativamente altas profundidades mantenidas a lo largo de los Canales de Martin García;
- (iii) La expansión en ancho del corredor Uruguay, luego de Colonia, ha permitido la formación del Banco Grande de Ortiz;
- (iv) La zona con Limos y los Suelos Franco-Limosos como texturas de fondo predominantes se extienden hacia aguas abajo, hasta el final del Banco Grande de Ortiz;
- (v) Más allá de esta última sección, donde la influencia oceánica se siente, los Suelos Franco-Arcillo-Limosos predominan como texturas de sedimento de fondo.

En la zona de recirculación

- (i) Las texturas de Arcillas dominan esta zona, y una pequeña zona en la costa uruguaya, en las cercanías de Montevideo.

3 FORZANTES SEDIMENTOLÓGICOS

3.1 Consideraciones generales

El principal forzante del transporte de sedimentos del Río de la Plata es la carga sedimentológica del Río Paraná.

La carga de sedimentos transportada por el río Paraguay, proveniente principalmente del río Pilcomayo, a partir de la confluencia con el río Bermejo se ve incrementada notablemente, siendo este, finalmente, el más importante aporte de carga de lavado al río Paraná. Los aportes del río Bermejo se dan durante el período Diciembre – Mayo, existiendo una relación bien definida entre su caudal y la concentración de sedimentos.

Hasta aproximadamente 1970 también existía una relación definida entre carga de sedimentos y caudal en el Alto Paraná, que actualmente no se da. El aporte medio de carga de lavado del Alto Paraná es actualmente muy bajo, observándose una disminución a la quinta parte del suministro que se observaba en la década de 1960. Amsler (2006) identificó como posibles causas de esta disminución, el efecto de “atrape” de los grandes embalses construidos en la alta cuenca desde fines de esa década, y los cambios en el uso del suelo.

En el tramo medio del río Paraná, las máximas concentraciones de sedimentos están originadas por los aportes del río Bermejo. Estas se registran con un cierto retardo con respecto a los máximos caudales líquidos provenientes del Alto Paraná (Drago y Amsler, 1988).

El río Paraná Inferior transporta una carga total de aproximadamente 160 millones de toneladas anuales de sedimentos, repartida en función del tamaño de sus partículas: 45 millones t/año (25%) de arcillas, 90 millones t/año (60%) de limos y 25 millones t/año (15%) de arenas (Menéndez y Sarubbi, 2007). De sus brazos principales, se considera que el Paraná Guazú es la continuación del mismo, dado que el Paraná de las Palmas no es un curso aluvial.

3.2 Caudales líquidos

Se utilizó la serie de caudales del Paraná Medio, observados en la estación Túnel (Santa Fe), para obtener la partición de caudales líquidos entre los dos brazos principales del río: Paraná de las Palmas y Paraná Guazú. A partir de los datos observados (Bombardelli *et al.*, 1995), que se presentan en la Tabla 3.1.1, se construyó una relación lineal entre el caudal del Parana y el de su brazo principal, el Guazú (Figuras 3.1.1 y 3.1.2).

Tabla 3.1.1. Repartición de caudales entre Parana Guazu y Parana de las Palmas.

Fecha	Parana Guazu		Parana de las Palmas	
	Q [m3/s]	%	Q [m3/s]	%
Marzo 1920	11865	67	5732	33
Julio 1965	18200	76	5700	24
Enero 1983	19000	76	6100	24
Julio 1992	29268	76	9000	24
Abril 1983	30847	80	7791	20

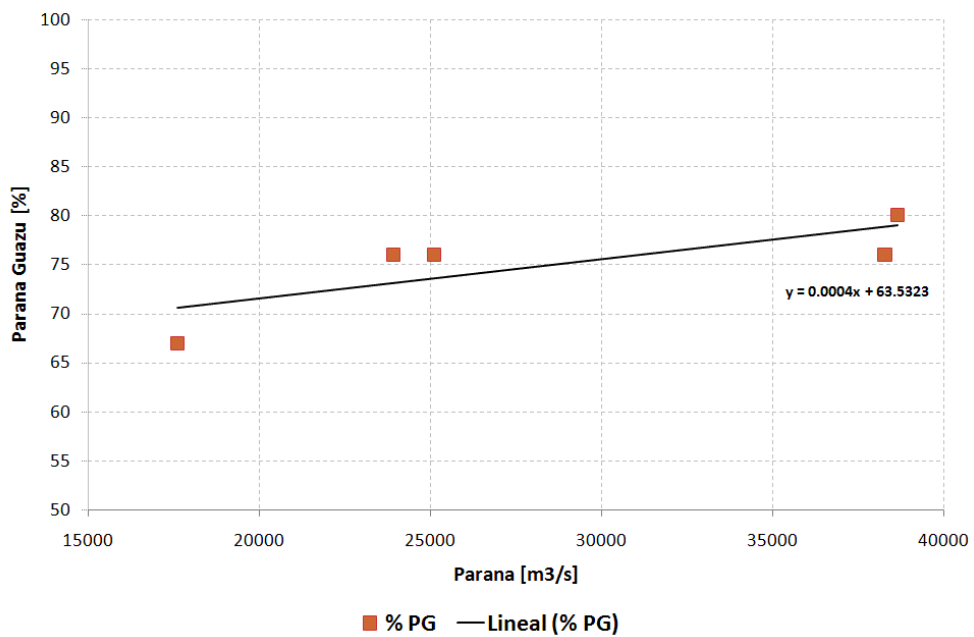


Figura 3.1.1. Relación de caudales entre el Parana y su brazo Parana Guazu (en porcentaje).

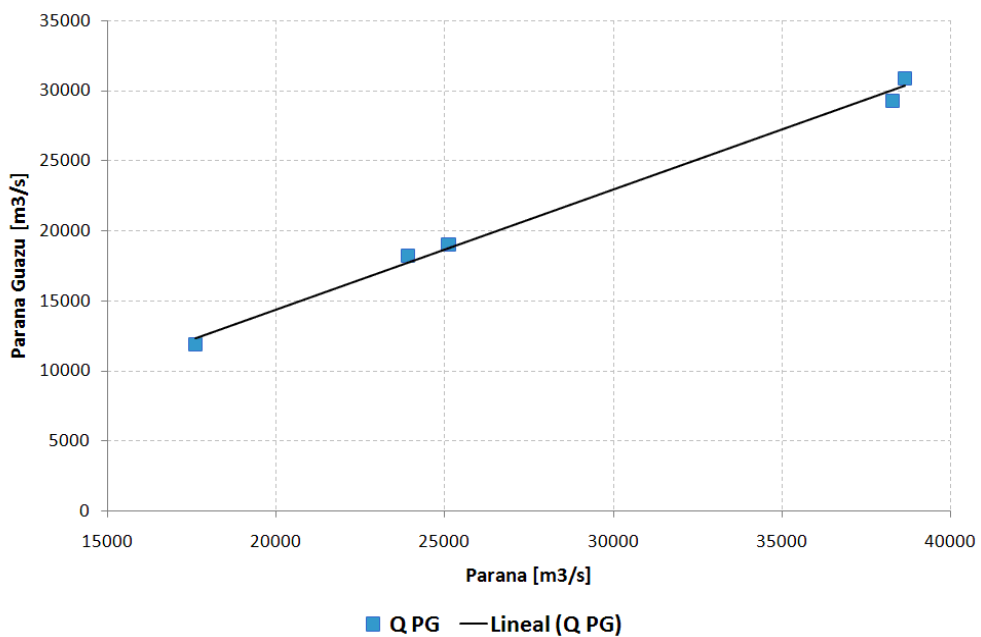


Figura 3.1.2. Relación de caudales entre el Parana y su brazo Parana Guazu (en caudales).

Con la relación de caudales líquidos del Paraná Guazú y el Paraná de las Palmas tomada en términos de porcentajes, se construyeron las series respectivas, mostrándose en la Figura 3.1.3 el período 2002-2004.

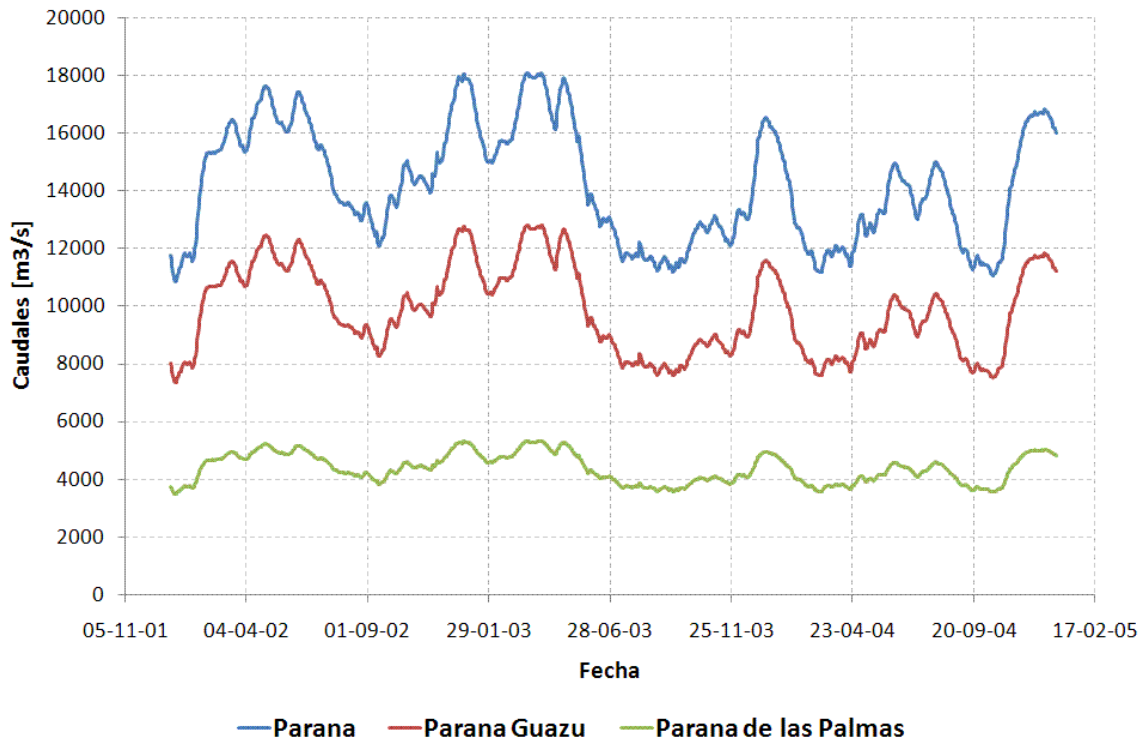


Figura 3.1.3. Caudales período 2002-2004

3.3 Sedimentos finos

Trabajos previos (Drago y Amsler, 1988; Alarcón *et al.* 2003, Amsler y Drago, 2007) demostraron claramente el rol dominante del río Bermejo en el suministro de carga de lavado al río Paraná, aguas abajo de la confluencia con el río Paraguay, y el aporte mucho menor de cargas de lavado procedentes del Alto Paraná (efecto agudizado por la retención en la cadena de presas brasileñas). Por lo tanto, para determinar la carga de sedimentos finos que llega al Río de la Plata se plantea una estrategia partiendo del transporte de este tipo de sedimentos por el río Bermejo, y despreciando, en primera aproximación, los aportes provenientes del Alto Paraná.

Se dispone de una relación caudal sólido (Q_s) – caudal líquido (Q) sobre el río Bermejo, en la estación El Colorado, Formosa (Figura 3.2.1)¹, construida a partir de 127 datos del período 1993-2008 (Figura 3.2.2), a saber

¹ Provista por el Sistema Nacional de Información Hídrica, SNIH, de la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación.

$$Q_s \text{ [kg / s]} = 0,0076Q \text{ [m}^3 \text{ / s]}^{2,0008} \quad (5)$$

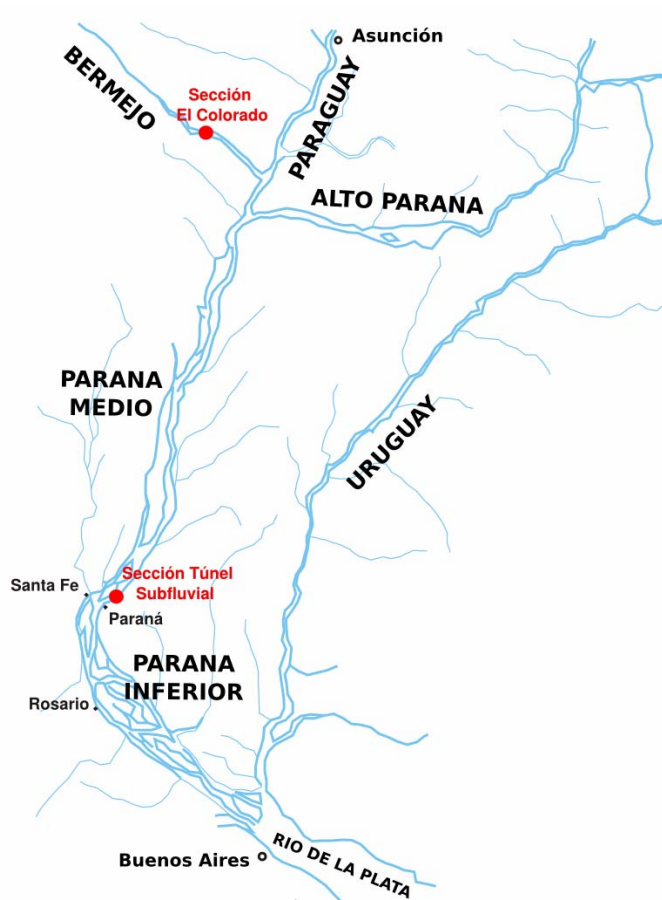


Figura 3.2.1. Ubicación de las estaciones El Colorado (Formosa) y Túnel Subfluvial (Santa Fe).

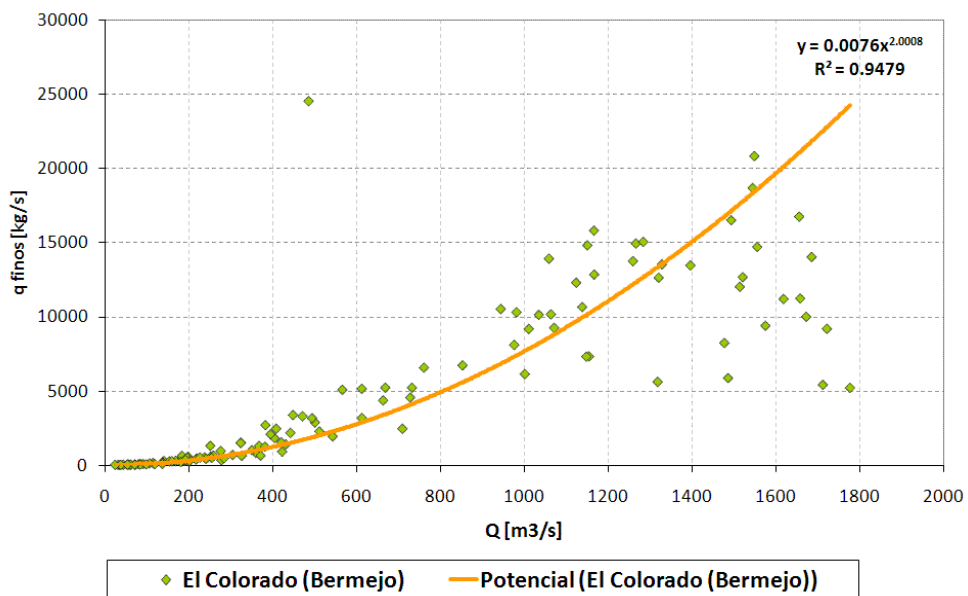


Figura 3.2.2. Relación caudal líquido-caudal sólido en El Colorado (Formosa).

Se utilizó la serie de aforos líquidos diarios en la estación El Colorado, que se extiende desde el 22 de Noviembre de 1968 hasta el 31 de Agosto de 2007 (aunque con algunos baches de información)², para obtener la serie de caudales sólidos del río Bermejo que se muestra en la Figura 3.2.3.

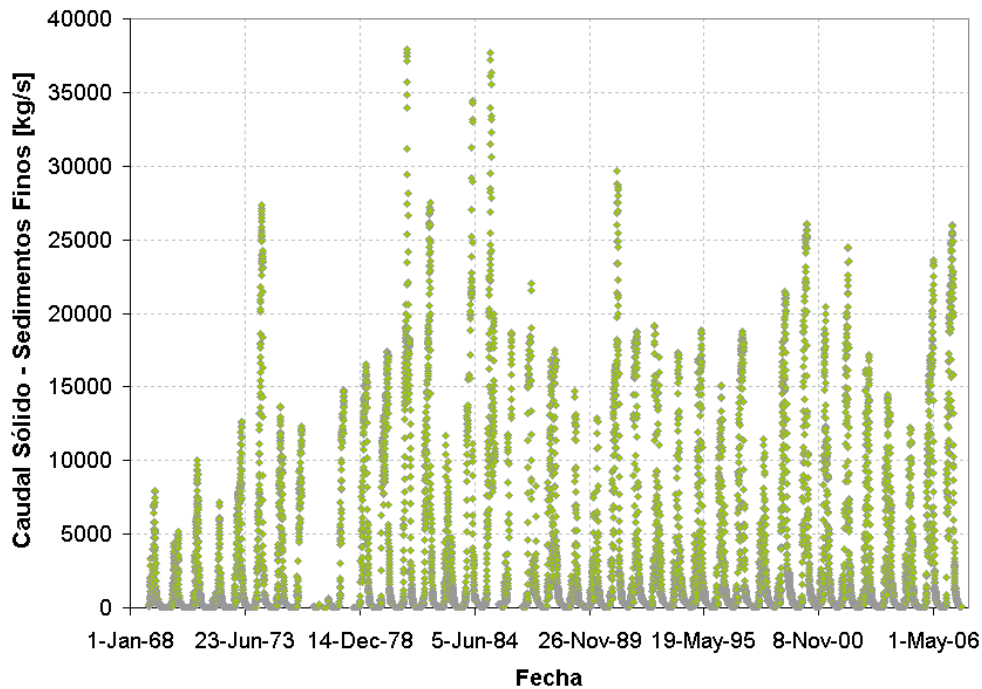


Figura 3.2.3. Serie diaria de caudales sólidos finos en El Colorado (Formosa).

También se dispuso de la serie de caudales líquidos diarios del río Paraná Medio en la estación Túnel (Figura 3.2.1)³. Suponiendo que la serie de caudales sólidos del río Bermejo, obtenida más arriba, es representativa del caudal sólido de finos en el Paraná Medio, ésta se puede combinar con la serie de caudales líquidos de la estación Túnel para obtener la serie de concentraciones diarias de sedimentos finos del Paraná Medio, tal como se muestra en la Figura 3.2.4.

² Provista por el Sistema Nacional de Información Hídrica, SNIH, de la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación.

³ Provista por el Sistema Nacional de Información Hídrica, SNIH, de la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación.

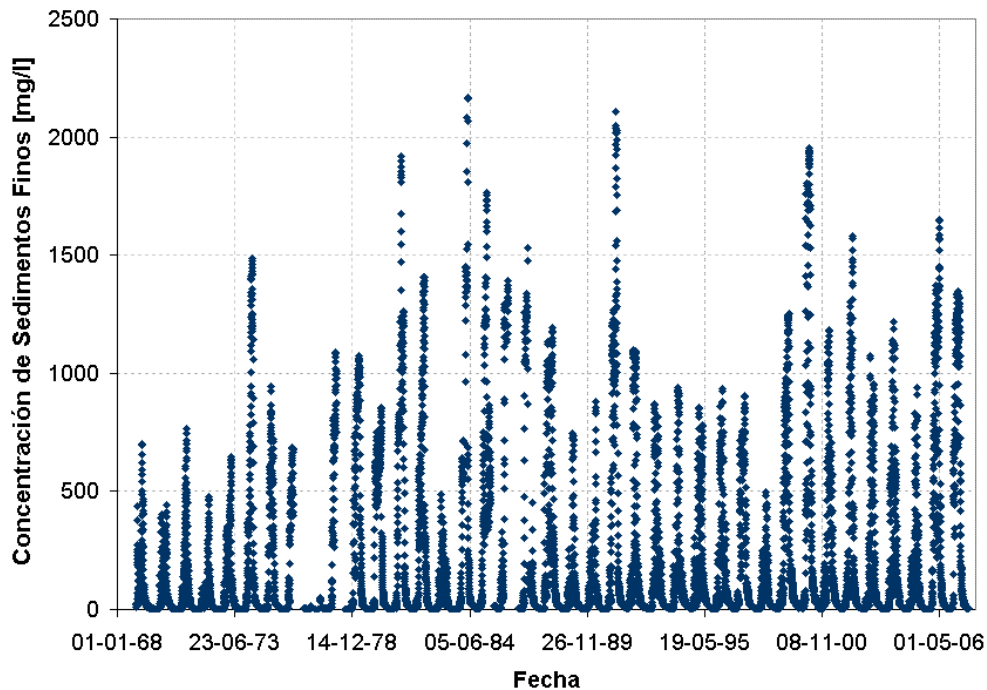


Figura 3.2.4. Series de concentración de finos en Túnel Subfluvial (Santa Fe), aportes del río Bermejo, 1968-2007.

Ahora bien, con esta metodología la concentración en la sección Túnel Subfluvial prácticamente cae a cero para el período de bajos aportes del río Bermejo, cuando en rigor eso no sucede (ver más abajo). Por lo tanto, resulta necesario establecer una concentración base para el Paraná Medio. Por lo tanto, a partir de los valores de transporte anual de carga de lavado obtenidas por Alarcón *et al.* (2003) para el período 1991-1998 en las estaciones Itatí (Alto Paraná) y Puerto Pilcomayo (Paraguay), se obtuvo un caudal sólido medio de finos proveniente de estas dos fuentes. En la Figura 3.2.5 se muestran los valores anuales de transporte de carga de lavado para ambas estaciones; el valor medio resultó de 309 kg/s.

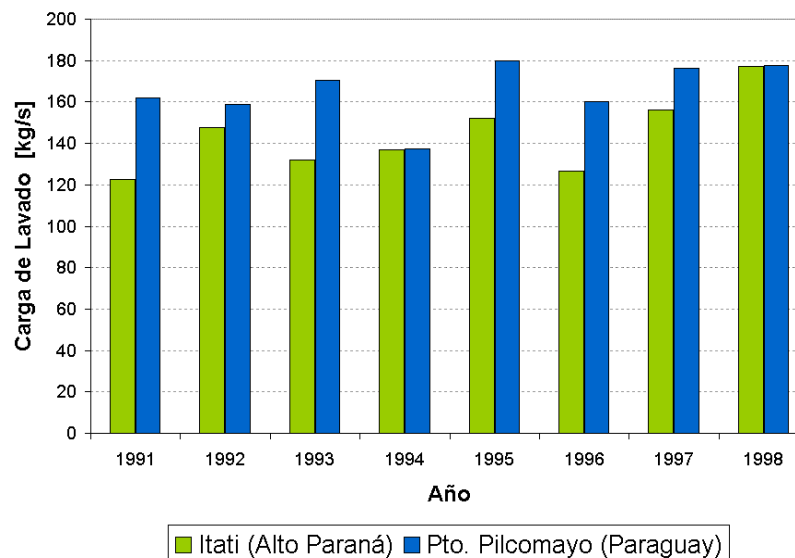


Figura 3.2.5. Transporte anual de carga de lavado en los ríos Alto Paraná y Paraguay, 1991-1998, Alarcón *et al.* (2003).

Para validar esta metodología se cuenta con 143 aforos sólidos en la sección Túnel Subfluvial correspondientes al período 1993-2007⁴. En la Figura 3.2.6 se efectúa la comparación entre la serie calculada y los aforos para ese período, mientras que en la Figura 3.2.7 sólo se muestra la ventana de tiempos utilizada para la modelación (2002-2004). El acuerdo general se considera satisfactorio.

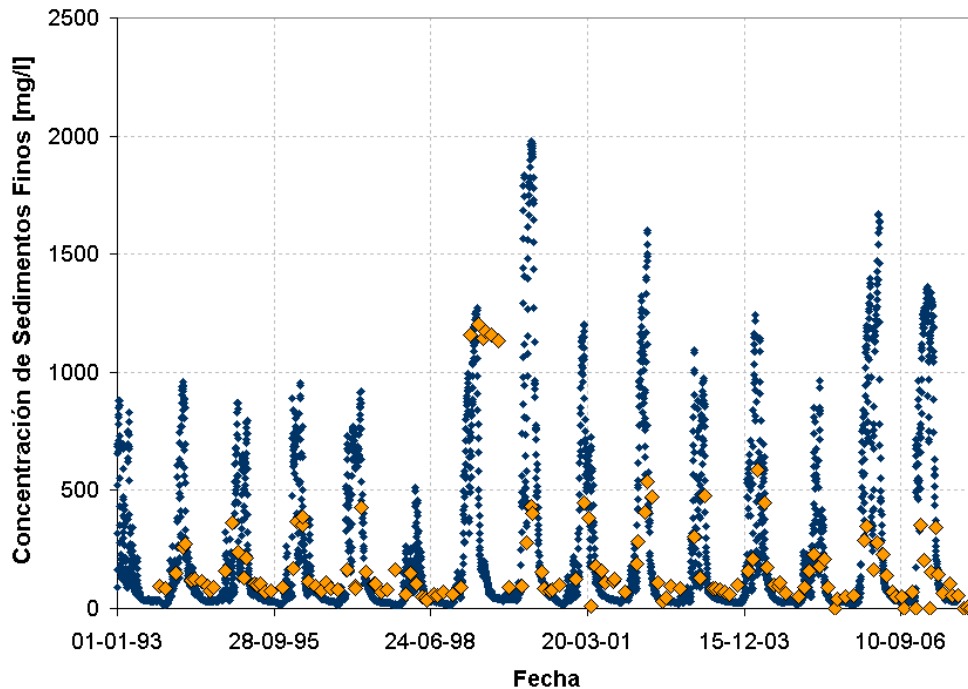


Figura 3.2.6. Series de concentración de finos en Túnel Subfluvial (Santa Fe), 1993-2007.

Ahora bien, es posible mejorar el acuerdo si se considera el tiempo de retardo para que el sedimento se desplace desde la estación El Colorado hasta la estación Túnel. Para esto, se consideró una velocidad media del flujo de 1 m/s y una distancia entre ambas de aproximadamente 800 km, con lo que resulta un tiempo de retardo de 222 horas (9,25 días). En la Figura 3.2.8 se muestran los resultados corregidos por retardo para la ventana de tiempo 2002-2004. Comparando con la Figura 3.2.6 se observa que, efectivamente, el acuerdo general mejora.

⁴ Provisos por el Sistema Nacional de Información Hídrica, SNIH, de la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación.

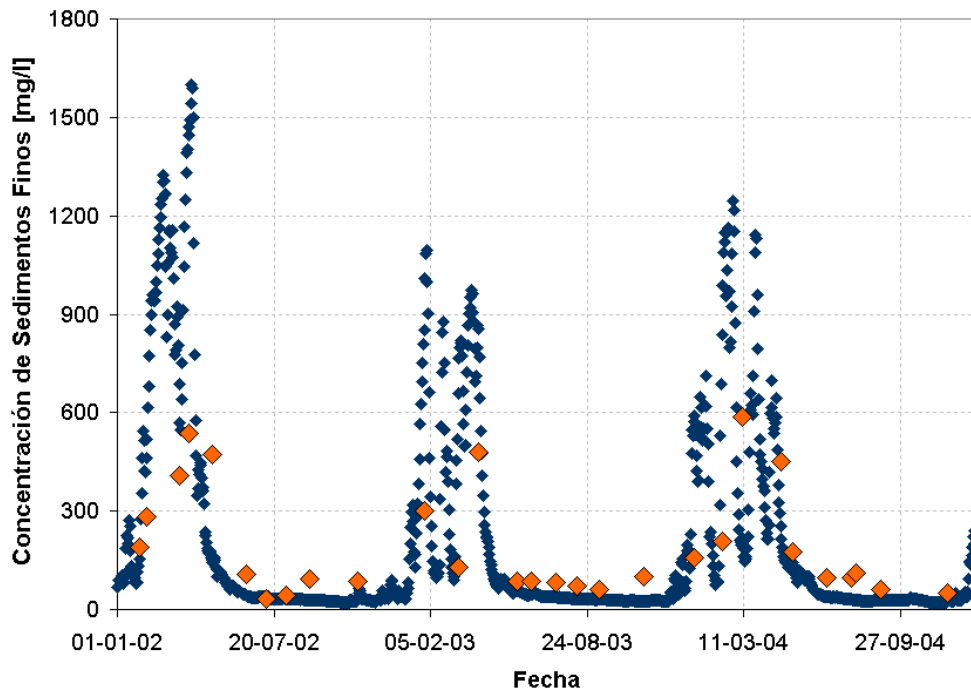


Figura 3.2.7. Series de concentración de finos en Túnel Subfluvial (Santa Fe), 2002-2004.

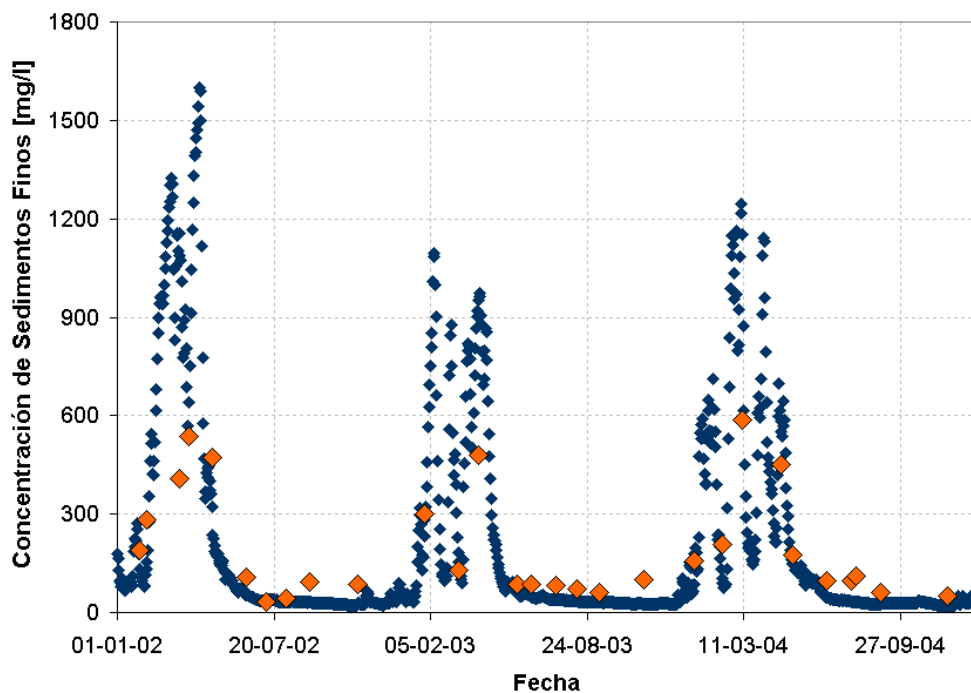


Figura 3.2.8. Series de concentración de finos en Túnel Subfluvial (Santa Fe), 2002-2004, con tiempo de retardo.

Se supone que, habiendo una mezcla total del sedimento suspendido en toda la sección del río Paraná en Santa Fe (Bertoldi de Pomar, 1984), la serie de concentraciones de material fino obtenida se puede utilizar tanto para el río Paraná de las Palmas como para el Paraná Guazú.

3.4 Sedimentos gruesos

El río Paraná Guazú, como continuador natural del Paraná Inferior, es quien transporta la mayor parte de las arenas proveniente de este último. Se consideró, entonces, que el transporte de material grueso hacia el Río de la Plata sólo se da a través del Paraná Guazú.

Dado que la formulación de Engelund-Hansen, (Engelund y Hansen, 1967) es la adecuada para lograr una predicción confiable del transporte total de material de fondo (arena) en el río Paraná, ésta se aplicó a seis secciones del Paraná Guazú ubicadas aguas abajo de la bifurcación del Paraná Inferior. Esta formulación calcula el transporte sólido volumétrico total por unidad de ancho en la dirección longitudinal en función de parámetros hidrodinámicos y sedimentológicos locales:

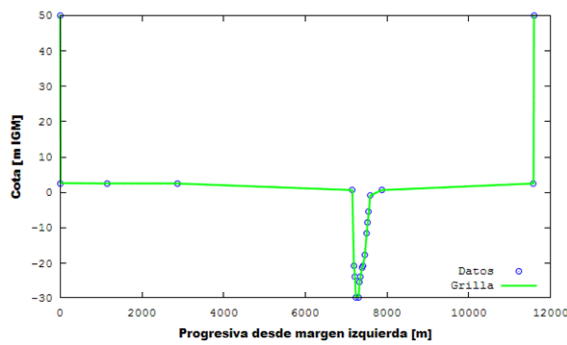
$$q_T = \frac{0.05 \cdot u^2 \cdot h^{3/2} \cdot S_f^{3/2}}{(s-1)^2 \cdot g^{1/2} \cdot d_{50}} \quad (6)$$

donde s es la gravedad específica del sedimento, g es la aceleración de la gravedad, d_{50} es diámetro para el cual el 50% de los sedimentos presentes en el fondo es más fino, y S_f es la pendiente de fricción.

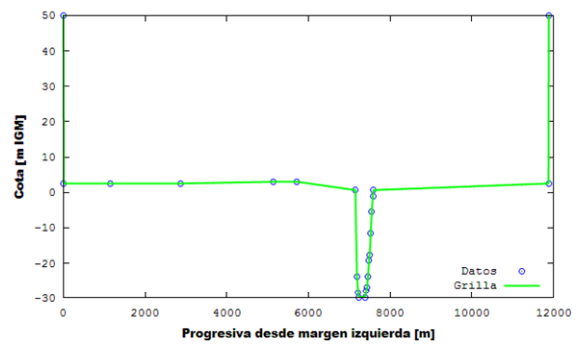
Las seis secciones elegidas del Paraná Guazú (Figura 3.3.1) se ubican aguas abajo de la bifurcación con el Paraná de las Palmas. Para cada una de ellas se calculó, en base a la serie de caudales diarios obtenidos para ese brazo (Sección 3.2), la serie de caudales sólidos de arena. Se adoptó un valor de 200 μm para el diámetro medio de las arenas (d_{50}), a partir de los datos presentados en Menéndez (2002). La pendiente superficial se utilizó como variable de calibración, partiendo del valor del 0.000015 resultado de la modelación matemática de ese tramo de río (Bombardelli *et al.*, 1995). Los resultados fueron obtenidos con un valor medio de 0.000040, excepto para las situaciones de grandes crecidas (1992, 0.0000425, y 1998, 0.0000450).. Se tomó como representativa del Guazú a la serie obtenida como promedio entre esas seis series temporales.



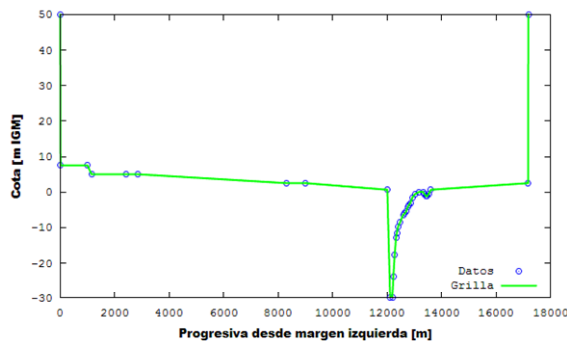
Figura 3.3.1. Ubicación de las secciones en el río Paraná Guazú.



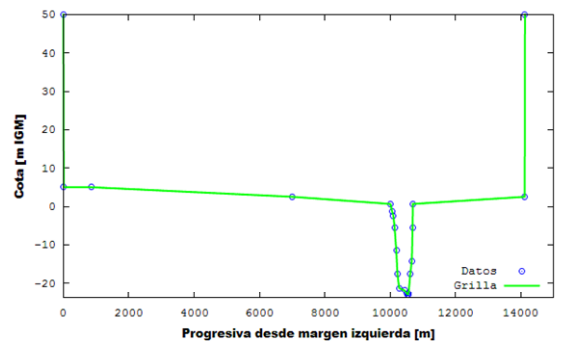
a) Sección 20



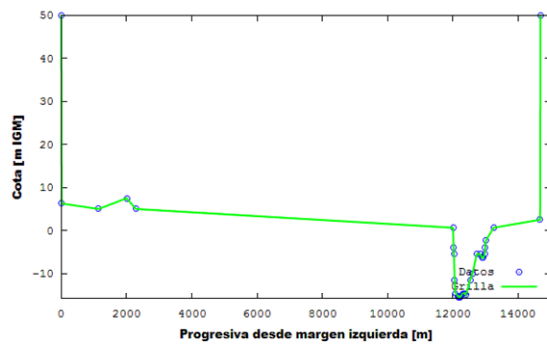
b) Sección 21



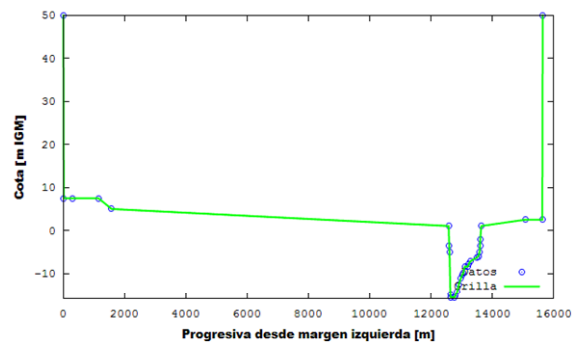
c) Sección 22



d) Sección 23



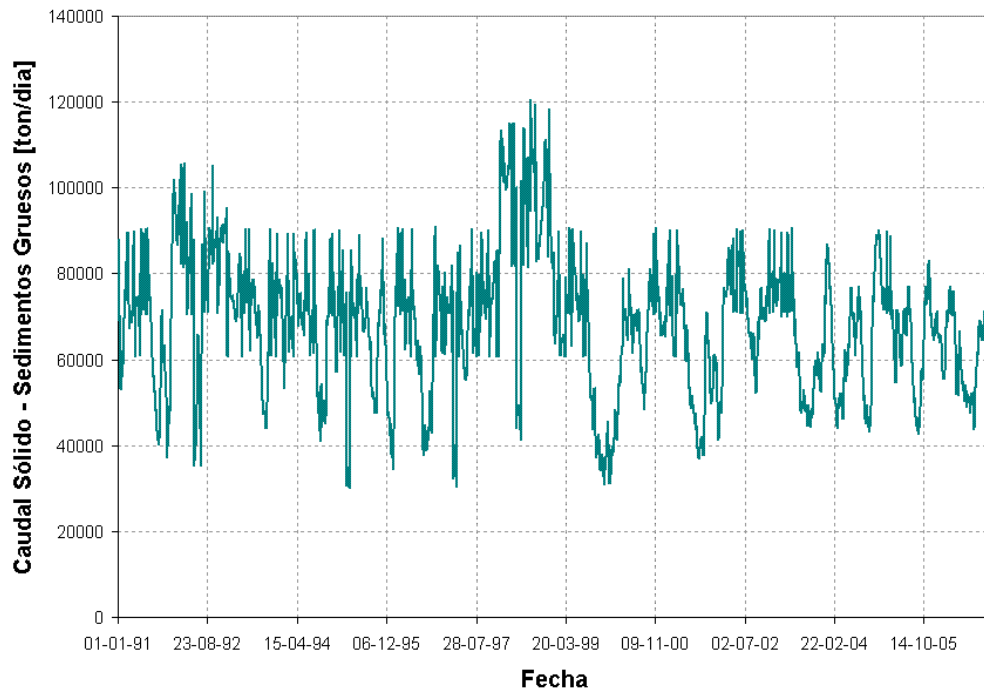
e) Sección 24



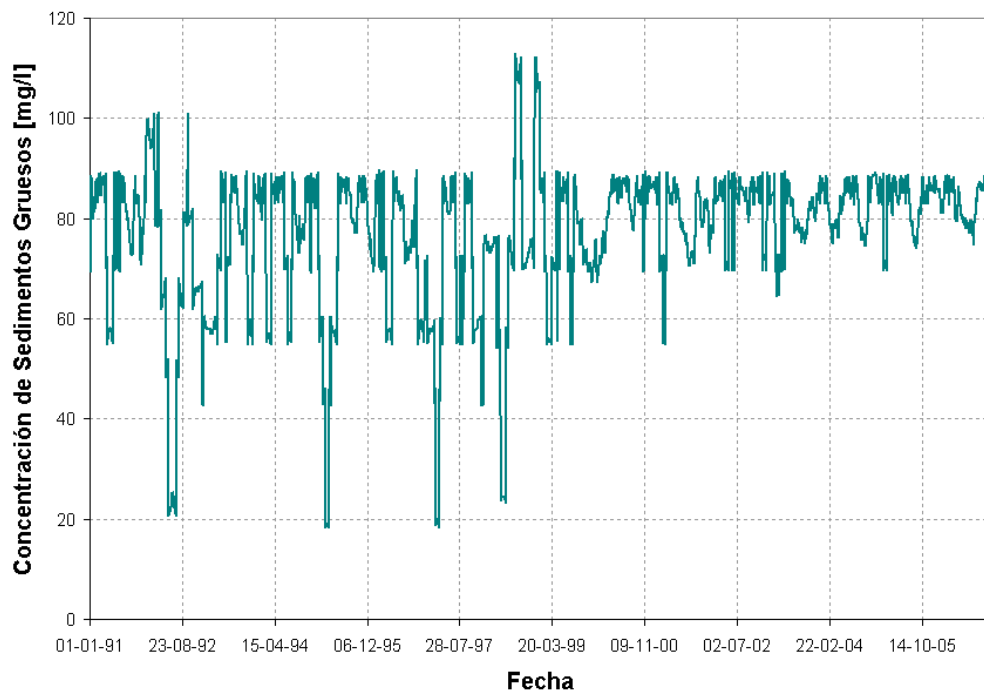
f) Sección 25

Figura 3.3.2. Secciones del río Paraná Guazú.

La Figura 3.3.3 presenta las series diarias de temporales calculadas de transporte total de material de fondo en el Paraná Guazú.



a) Flujo másico de arenas



b) Concentración de arenas

Figura 3.3.3. Transporte de arenas en el río Paraná Guazú.

En la Figura 3.3.4 se muestra, a modo de verificación, la serie anual de transporte total de material de fondo en el Paraná Guazú obtenida con la presente metodología, comparada con los valores obtenidos por Alarcón *et al.* (2003) para un tramo del Paraná Medio, observándose una buena consistencia entre los resultados.

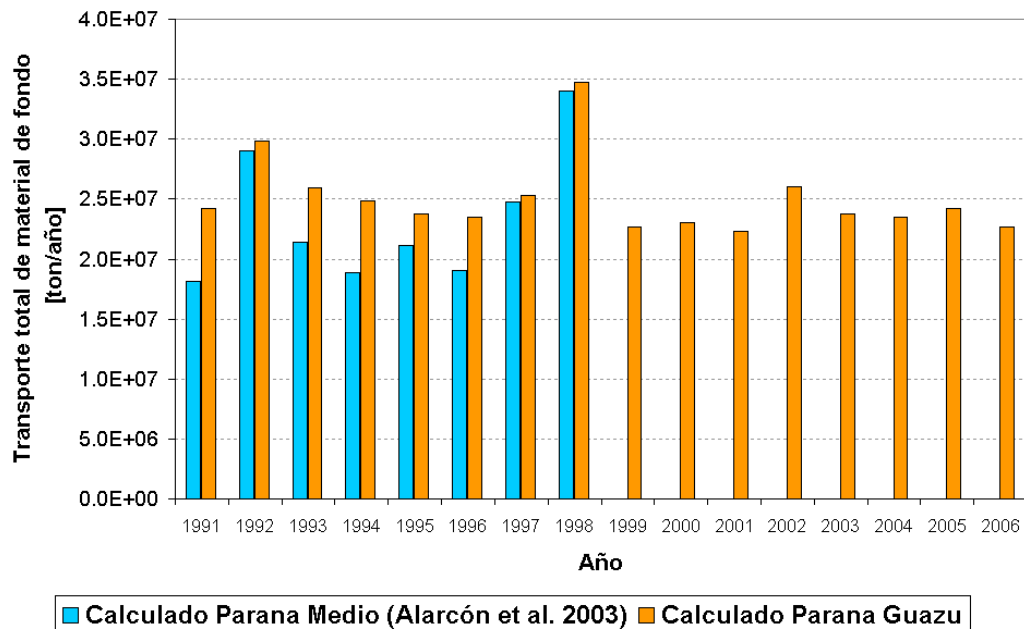


Figura 3.3.4. Transporte anual de sedimentos gruesos.

4 CONCLUSIONES

Las siguientes son las principales conclusiones de este trabajo:

- El modelo conceptual del Río de la Plata Interior presentado en este trabajo se basa en la interpretación del flujo desarrollado a través de sus tres corredores de, con muy poca mezcla entre ambos.
- La morfología del fondo del río provee evidencias de los patrones de sedimentación. Las texturas de sedimentos de fondo predominantes son consistentes con la hidrodinámica de los corredores de flujo y la concentración de sedimentos en suspensión.
- Las metodologías desarrolladas para la obtención de series temporales diarias de descarga sólida para material fino y grueso en los ríos Paraná de las Palmas y Paraná Guazú, se consideran adecuadas y lo suficientemente precisas para representar los aportes al Río de la Plata. Además, se basan en datos continuamente accesibles, lo que las torna de suma utilidad para estudios de gestión de recursos.

REFERENCIAS

- Alarcón, J.J., Szupiany, R., Montagnini, M.D., Gaudin, H., Prendes, H.H. y Amsler, M.L., 2003, *Evaluación del Transporte de Sedimentos en el Tramo Medio del río Paraná*, Primer Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos, Ezeiza, Noviembre.
- Amsler M.L., 2006. *Evolución de la carga de lavado en el Alto Paraná (1968-2004). Incidencia sobre las sedimentaciones en la planicie aluvial del Parana Medio*. Tercer Congreso Iberoamericano sobre Control de la Erosión y los Sedimentos, Buenos Aires, Agosto.
- Bertoldi de Pomar, H., 1984. *Estudios limnológicos en una sección del tramo medio del río Parana*, V: Caracteres texturales de los sedimentos de fondo. Rev. Asoc. Cienc. Nat. Litoral, 15, 57-78.
- Bombardelli, F.A., Menéndez, A.N., Brea, J.D., Lapetina, M.R. y Uriburu Quirno, M., 1995. *Estudio hidrodinámico del Delta del río Parana mediante modelación matemática*. Informe LHA-INCyTH 137-03-95.
- CARP, 1989. *Estudio para la Evaluación de la Contaminación en el Río de la Plata*.
- Drago E.C.E. y Amsler M.L., 1988. *Suspended sediment at a cross section of the Middle Paraná River: concentration, granulometry and influence of the main tributaries*. Sediment budgets, IAHS Publ. N°174, pp 381–396.
- Engelund, F. y Hansen, E., 1967. *A monograph on sediment transport in alluvial streams*. Teknisk Vorlag. Copenhagen, Denmark.
- Jaime, P. y Menéndez, A.N., 1999. *Modelo hidrodinámico Río de la Plata 2000*. Informe LHA-INA 183-01-99.
- Jaime, P., Menéndez, A.N. y Natale, O.E., 2001. *Balance y Dinámica de Nutrientes Principales en el Río de la Plata Interior*. Informe INA 10.4-01.
- Harrison, A.J.M. y Owen, M.W., 1971. *Siltation of fine sediments in estuaries*. IAHR XIV Congress.
- López Laborde, J. y Nagy, G.J., 1999. *Hydrography and sediment transport characteristics of the Río de la Plata: a review*. En: Perillo, G.M.E.; Piccolo, M.C. y Pino, M. (Eds.), *Estuaries of South America: Their geomorphology and dynamics*, Springer, 133 – 160.
- Menéndez, A.N., 2001. *Description and modeling of the hydrosedimentologic mechanisms in the Rio de la Plata River*, VII International Seminar on Recent Advances in Fluid Mechanics, Physics of Fluids and Associated Complex Systems, Buenos Aires, Argentina, October.

- Menéndez, A.N., Jaime, P. y Natale, O.E., 2002, *Nutrients Balance in the Río de la Plata River using Mathematical Modelling*, 5th International Conference HydroInformatics 2002, Cardiff, UK, July.
- Parker, G., Marcolini, S., Cavallotto, J.L., López, M.C., de León, A., Maza, M.T., Ayup, R.N. and López Laborde, J., 1985, *Distribución de sedimentos en la superficie del fondo del Río de la Plata*, SHN - SOHMA, Informe Técnico N° 3, Tarea 1.2.
- Menéndez, A.N., Sarubbi, A., 2007. *A Model to Predict the Paraná Delta Front Advancement*, Workshop on Morphodynamic Processes in Large Lowland Rivers, Santa Fe, November.
- Sarubbi, A., 2007. Análisis del avance del Frente del Delta del río Paraná, Tesis de Grado, Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería.
- Shepard, F.P., 1954. *Nomenclature based on sand-silt-clay ratios*, Jour. Sed. Petrol. 24 (3): 151-158.
- Urien, C.M., 1966. *Distribución de los sedimentos en el Río de la Plata Superior*, Boletín SHN, Vol. III, No 3, 197-203.
- van Rijn, L.C., 1993, *Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas*. Aqua Publications.