

# **METODOLOGÍA PARA LA GENERACIÓN DE SERIES TEMPORALES DE DESCARGA SÓLIDA DE LOS RÍOS PARANÁ DE LAS PALMAS Y PARANÁ GUAZÚ**

**Mariano Re\*, Angel N. Menéndez\* y Mario L. Amsler\*\***

\* Instituto Nacional del Agua (INA) & Facultad de Ingeniería (FIUBA) – \*\* Instituto Nacional de Limnología (INALI)

E-mail: [mre@fi.uba.ar](mailto:mre@fi.uba.ar)

## **RESUMEN**

En este trabajo se presenta y valida una metodología para generar series de tiempo de descargas sólidas en los dos ingresos más significativos del río Paraná al Río de la Plata: el Paraná de las Palmas y el Paraná Guazú, discriminada en sus componentes de sedimentos finos y gruesos. 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 desde el río Bermejo, el suministro principal de carga de lavado al río Paraná. La carga de sedimentos gruesos (arenas) se planteó para el río Paraná Guazú, continuador natural del Paraná Inferior, a partir de la formulación de Engelund-Hansen.

## **ABSTRACT**

This paper presents and validates a methodology to generate time series of solid discharges in the two most significant discharges of the Parana river to the Rio de la Plata river: the Paraná de las Palmas and Paraná Guazu, discriminated in fine and coarse sediments. To determine the fine sediment load that reaches the Rio de la Plata river it was developed a strategy based on the transport of this type of sediment from the Bermejo river, the main supply of wash load in the Paraná river. The coarse sediment load (sands) was calculated for the Parana Guazu river, as a natural continuation of the Lower Paraná, with the Engelund-Hansen formulation.

## **INTRODUCCIÓN**

En el marco de un estudio de modelación de la dinámica sedimentológica del Río de la Plata (dentro del proyecto FREPLATA), que apunta a mejorar y completar los conocimientos actuales de la misma en vistas al desarrollo de políticas de gestión del recurso, se planteó la necesidad de construir series temporales de carga de sedimentos en los principales tributarios, a saber, los ríos Paraná y Uruguay.

En este trabajo se presenta y valida una metodología para generar series de tiempo de descargas sólidas en los dos ingresos más significativos del río Paraná al Río de la Plata: el Paraná de las Palmas y el Paraná Guazú (Figura 1), discriminada en sus componentes de sedimentos finos y gruesos.

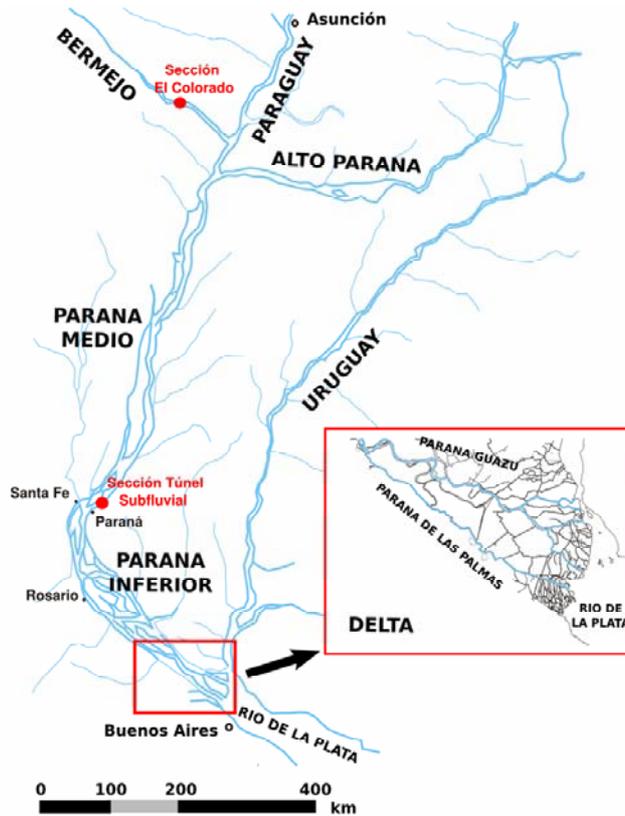


Figura 1.- Ubicación

## TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

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

La carga de sedimentos transportada por el río Paraguay se ve notablemente incrementada a partir de la confluencia con el río Bermejo, convirtiéndose así en la contribución más importante 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 sedimentos en suspensión de aproximadamente 145 millones de toneladas anuales, repartida en la siguiente proporción, en

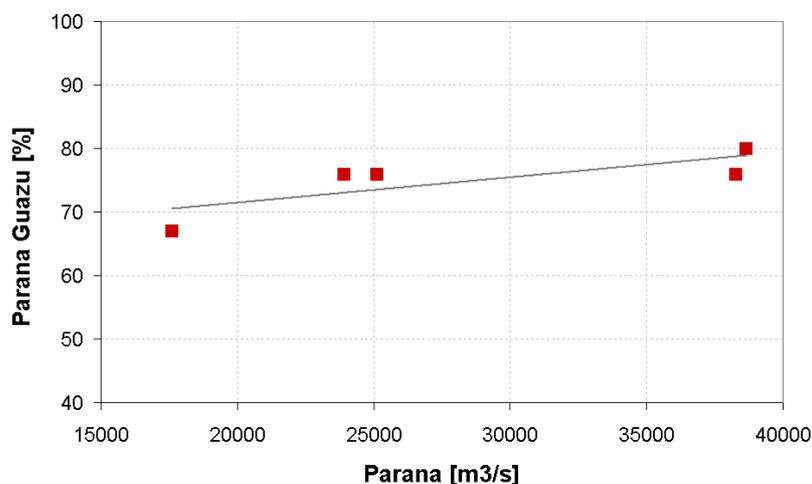
función del tamaño de las partículas: 45 millones t/año (31%) de arcillas, 90 millones t/año (62%) de limos y 10 millones t/año (7%) de arenas (Menéndez y Sarubbi, 2007). De sus dos brazos principales, se considera que el Paraná Guazú es la continuación del mismo, dado que el Paraná de las Palmas no es un curso aluvial.

## CAUDALES LÍQUIDOS

Se utilizó la serie de caudales del Paraná Medio, observados en la estación Túnel Subfluvial (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 1, se construyó una relación lineal entre el caudal del Paraná y el de su brazo principal, el Guazú (Figura 2).

**Tabla 1.-** Repartición de caudales entre Paraná Guazú y Paraná de las Palmas.

Fecha	Paraná Guazú		Paraná de las Palmas	
	Q [m <sup>3</sup> /s]	[%]	Q [m <sup>3</sup> /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 2.-** Relación de caudales entre el Paraná y su brazo Paraná Guazú.

Con la relación de caudales líquidos del Paraná Guazú y el Paraná de las Palmas, tomada en términos de porcentajes, se construyó cada una de las series. En la Figura 3, a modo de ilustración, se muestra el período 2002-2004.

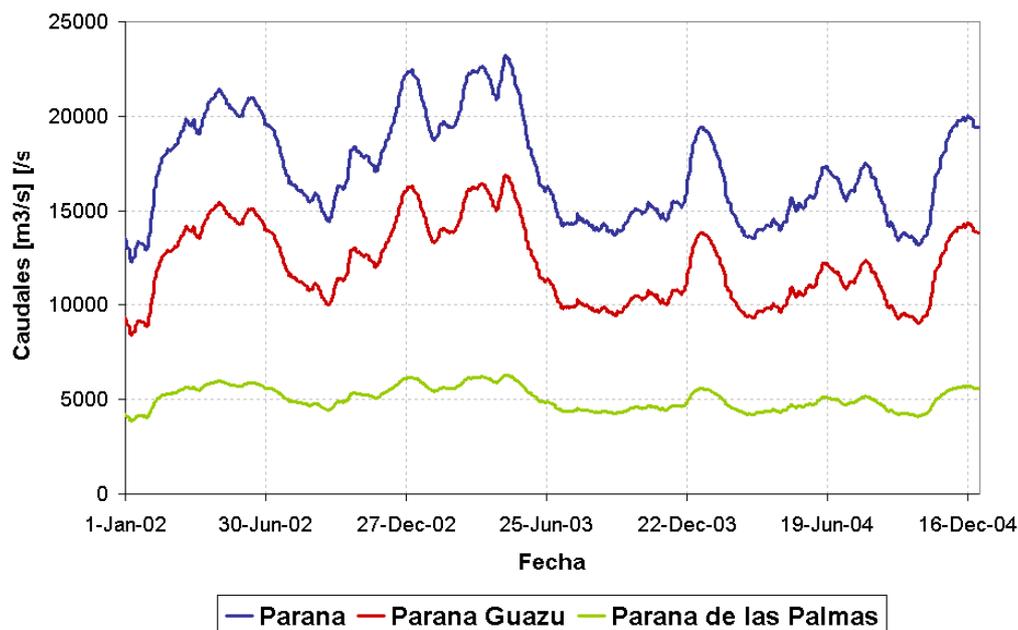


Figura 3.- Caudales período 2002-2004.

## 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 carga 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 ( $Q_s$ ) versus caudal líquido ( $Q$ ) sobre el río Bermejo, en la estación El Colorado, Formosa, construida a partir de 127 datos del período 1993-2008 (Figura 4)<sup>1</sup>. Los valores aforados se agruparon siguiendo dos tendencias, con valor de cambio en los 200 m<sup>3</sup>/s. La calidad de ajuste es muy buena, consistente con lo obtenido por Alarcón *et al.* (2003), a pesar de la dispersión agregada en los caudales altos de los aforos realizados durante los últimos años.

Se utilizó la serie de caudales 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)<sup>2</sup>, para obtener la serie de caudales sólidos del río Bermejo.

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

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

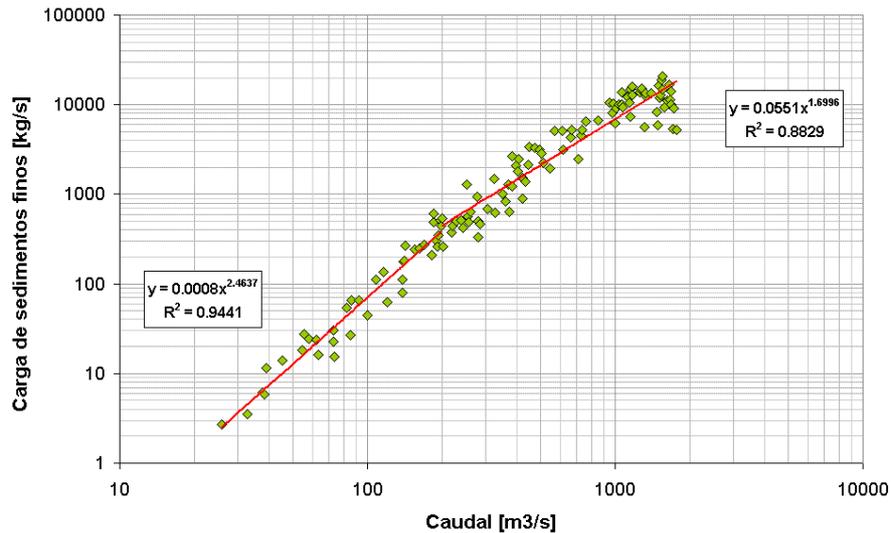


Figura 4.- Relación caudal líquido-caudal sólido en El Colorado (Formosa), río Bermejo.

También se dispuso de la serie de caudales líquidos diarios del río Paraná Medio en la estación Túnel Subfluvial (Santa Fe). 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 Subfluvial para lograr la serie de concentraciones diarias de sedimentos finos del Paraná Medio.

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 (Junio - Noviembre), 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 5 se muestran los valores anuales de transporte de carga de lavado para ambas estaciones; el valor medio resultó de 309 kg/s.

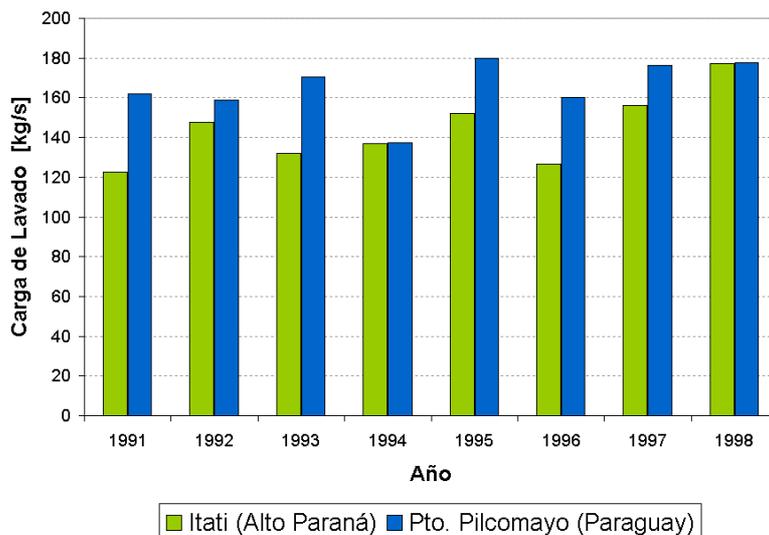


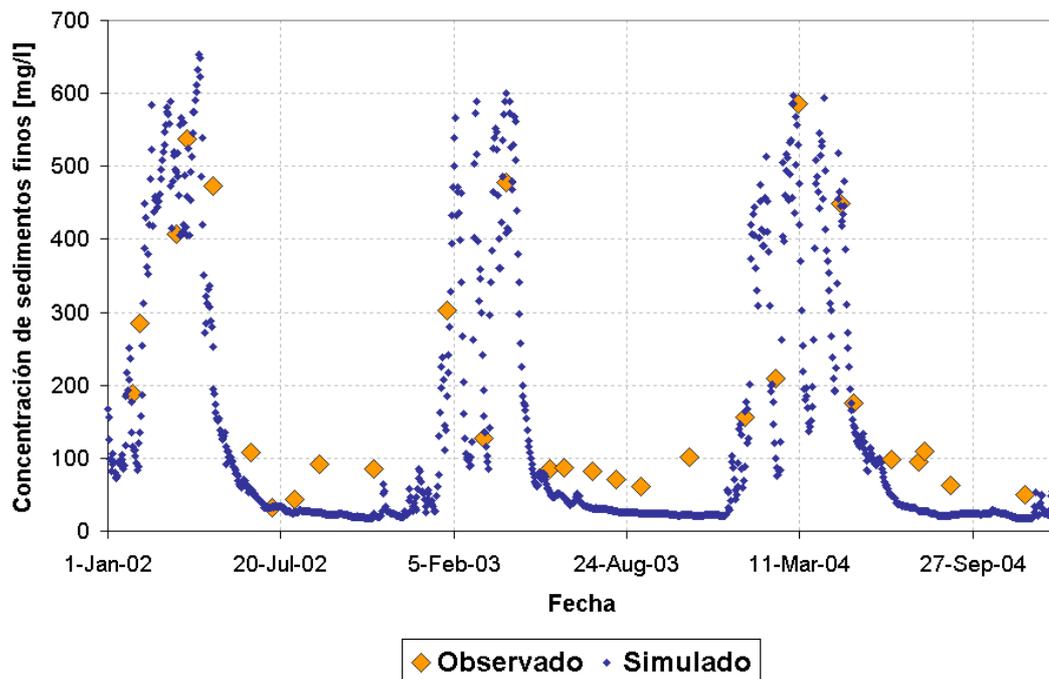
Figura 5.- Transporte anual de carga de lavado en los ríos Alto Paraná y Paraguay, 1991-1998, Alarcón *et al.* (2003).

Para validar esta metodología se cuenta con 143 aforos sólidos en la sección Túnel Subfluvial correspondientes al período 1993-2007. En general, el acuerdo se considera satisfactorio.

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 Subfluvial. 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).

Una corrección adicional a realizar, tiene que ver con la porción de carga de lavado que se deposita en la planicie aluvial entre El Colorado y Santa Fe-Paraná, que es un valor no menor de 10 millones de toneladas por año en promedio. Para tener en cuenta esta situación se planteó una reducción de carga sólida sólo para los picos de concentración, suponiendo que sólo en esos casos hay depositación. Por lo tanto, se realiza una reducción anual de 10 millones de toneladas concentrada en los intervalos de tiempo en los que la concentración supera un valor umbral. Esta concentración umbral se utilizó como variable de ajuste, lográndose el mejor acuerdo para un valor de 600 mg/l.

En la Figura 6 se muestran los resultados corregidos por retardo y con el descuento por pérdida en planicie de inundación para la ventana de tiempo 2002-2004. Se observa una consistente subestimación de las concentraciones calculadas respecto de las medidas para los períodos de mínimos aportes, diferencia que aún no ha podido ser explicada.



**Figura 6.-** Series de concentración de finos en Túnel Subfluvial (Santa Fe), 2002-2004.

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.

## 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, se la aplicó a un tramo del Paraná. Esta formulación calcula el transporte sólido volumétrico total por unidad de ancho en la dirección longitudinal en función de parámetros hidrodinámicos y sedimentológicos locales:

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

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.

La influencia del Río de la Plata en la hidrodinámica del Paraná Guazú resulta importante. En la Figura 7 se presentan caudales aforados en la sección Brazo Largo del Paraná Guazú<sup>3</sup>, observándose la variabilidad de los caudales para distintos niveles observados.

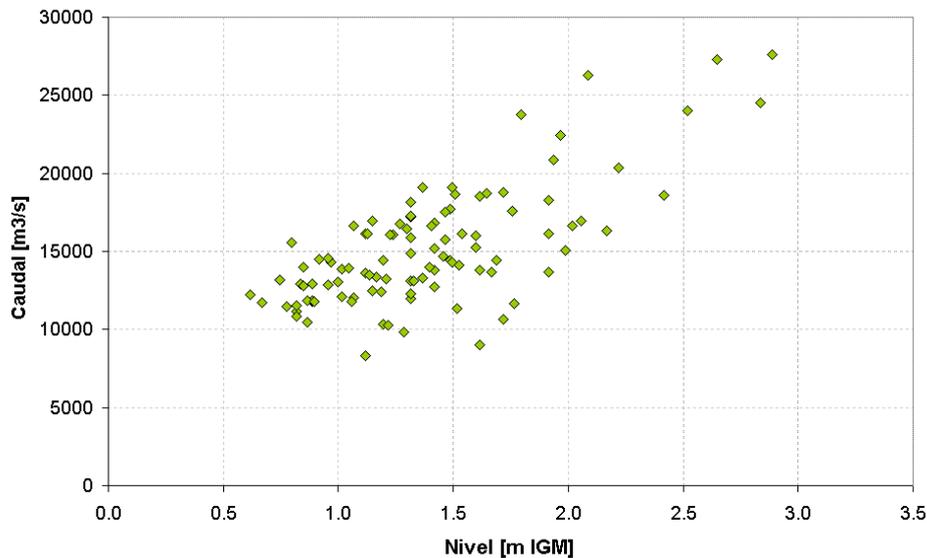


Figura 7.- Ubicación de las secciones en el río Paraná Guazú.

La obtención de los parámetros necesarios para el cálculo del transporte de sedimentos gruesos en el Paraná Guazú fue realizada a partir de la simulación hidrodinámica unidimensional del tramo del comprendido entre la bifurcación con el Palmas y su desembocadura en el Río de la Plata (Figura 8). Este modelo se basó en el propuesto por Bombardelli *et al.* (1995), utilizándose los mismos parámetros de calibración y el software

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

HEC-RAS. La simulación fue realizada para todo el año 2008, forzándose el sistema con los caudales aguas arriba, y con el nivel condicionante en la desembocadura obtenido con el modelo hidrodinámico bidimensional del Río de la Plata, RPP-2D (Re y Menéndez, 2007). Como validación, en la Figura 9, se muestra la comparación de caudales simulados versus los aforados.



Figura 8.- Dominio del modelo 1D y secciones del río Paraná Guazú.

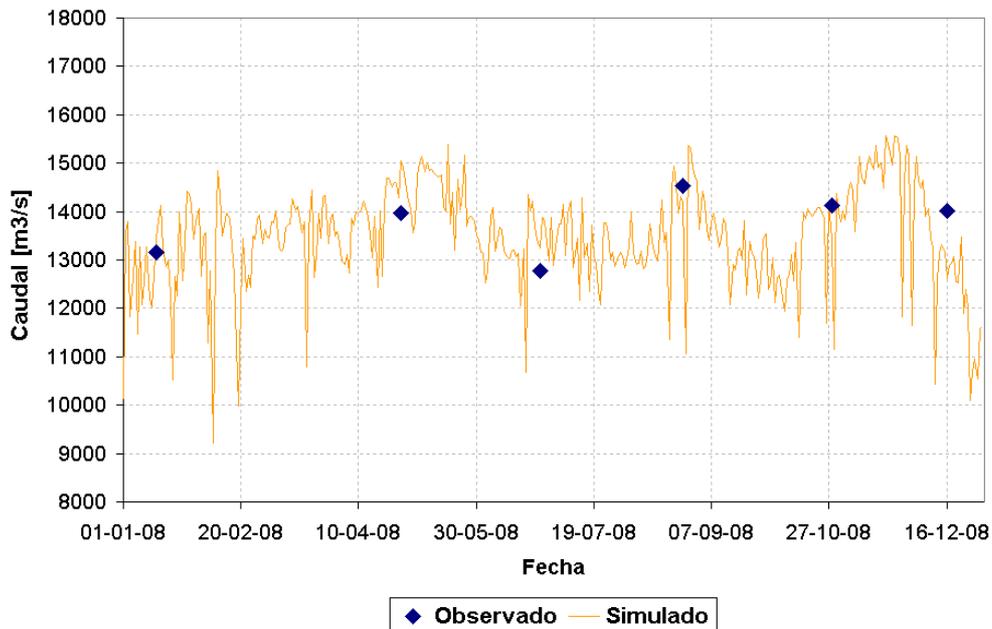


Figura 9.- Caudales simulados y observados en el río Paraná Guazú (sección Brazo Largo).

El tramo elegido del Paraná Guazú, comprende seis secciones transversales (Figura 8) que se localizan aguas abajo de la bifurcación con el Paraná de las Palmas. Esta elección se basó en la posibilidad de disminuir el efecto de la onda de marea sobre las variables a resolver.

Para cada una de las secciones se obtuvo de la modelación, la serie diaria de pendientes de fricción ( $S_f$ ), velocidades medias ( $u$ ) y profundidad media ( $h$ ). La pendiente superficial media del tramo simulada resultó ser de 1.5 cm/km, valor consistente con lo obtenido por Bombardelli *et al.* (1995).

El valor de diámetro medio de las arenas ( $d_{50}$ ), 200  $\mu\text{m}$ , fue adoptado a partir de los datos presentados en Menéndez (2002). Aplicando la Ecuación 1 y multiplicando por el ancho medio de cada sección se obtuvo la serie diaria de transporte de sedimentos gruesos del tramo. En la Figura 10, se muestra el resultado de la serie representativa del año 2008, calculada como promedio de los resultados de las seis secciones.

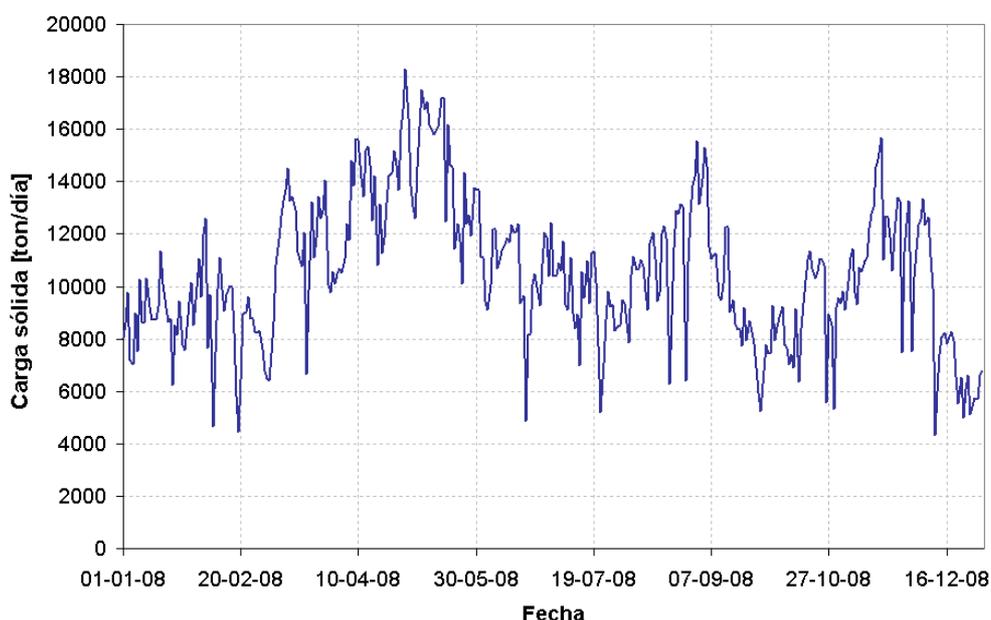


Figura 10.- Carga media de arenas en el Paraná Guazú.

La carga total de arenas calculada para el río Parana Guazú resultó de 3.85 millones de toneladas, aproximándose al valor medio de 10 millones de toneladas, estimado por Menéndez y Sarubbi (2007). Este valor obtenido podría ser explicado por los bajos caudales sucedidos durante el período de análisis.

Dada la baja correlación, entre la descarga líquida y la carga sólida transportada, no se pueden extrapolar estos resultados a otros períodos debiéndose simular cada situación particular.

## CONCLUSIONES

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 como para representar los aportes al Río de la Plata y utilizarlas como forzantes de simulaciones hidrosedimentológicas.

Estas metodologías están basadas en datos continuamente accesibles, que permiten una continua validación o eventual corrección. Además, la accesibilidad de los datos las torna de suma utilidad para estudios de gestión de recursos.

*Agradecimiento.* Este trabajo se realizó como parte de las actividades del Proyecto FREPLATA (FFEM-IFREMER), al cual se reconoce el apoyo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**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*.

**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 Paraná Medio". *III Congreso Iberoamericano sobre Control de la Erosión y los Sedimentos, International Erosion Control Association, Buenos Aires, Argentina*.

**Amsler M.L., Drago E.C.E.** (2009): "A review of suspended sediment budget at the confluence of the Paraná and Paraguay Rivers", *Hydrolog Process*, (en prensa).

**Bertoldi de Pomar, H.** (1984): "Estudios limnológicos en una sección transversal del tramo medio del río Paraná. III: Componentes sólidos transportados en suspensión", *Rev. Asoc. de Ciencias Naturales del Litoral*, Vol. 15, Fascículo 1: 25-46.

**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*.

**Drago, E.C. 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* (381-396). Proc. of the Porto Alegre Symposium, December 1988, IAHS Publ. N° 174.

**Engelund, F. y Hansen, E.** (1967): "A monograph on sediment transport in alluvial streams", *Teknisk Vorlag, Copenhagen, Dinamarca*.

**Menéndez, A.N.**, (2002): "A Methodology to Scale Turbidity Plumes", *2nd International Conference New Trends in Water and Environmental Engineering for Safety and Life: Eco-compatible Solutions for Aquatic Environments, Capri (Italy), June 24-28*.

**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*.

**Re, M., Menéndez, A.N.** (2007), "Impacto del cambio climático en las costas del Río de la Plata", *Revista Internacional de Desastres Naturales*, 7 (1).