



## MODELACIÓN SEDIMENTOLÓGICA EN SISTEMA CAUCE-PLANICIE DEL RÍO PARANÁ INFERIOR

Marina L. Garcia<sup>(1)</sup>, Pedro A. Basile<sup>(1)</sup> y Gerardo A. Riccardi<sup>(1)y(2)</sup>

(1) Dto. de Hidráulica (Escuela de Ingeniería Civil) y Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales;

(2) Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Rosario

Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura – Universidad Nacional de Rosario (FCEIA - UNR)

Riobamba 245 bis – S2000EKE Rosario – Tel: +54 341 4808541

E-mail: mgarcia@fceia.unr.edu.ar

### RESUMEN

En este trabajo se presenta la modelación de procesos de sedimentación en planicies de inundación de grandes ríos aluviales de llanura. Se describe la implementación y aplicación del modelo hidro-sedimentológico CTSS8-FLUSED, físicamente basado y espacialmente distribuido, que permite simular numéricamente la hidrodinámica y los procesos de transporte y deposición de sedimentos finos mediante esquemas de celdas amorfas interconectadas. La aplicación se realiza acoplando el módulo sedimentológico FLUSED al modelo hidrodinámico CTSS8, previamente calibrado, validado y aplicado en el tramo Diamante - Ramallo del sistema cauce-planicie del río Paraná Inferior. El modelo es apropiado para la simulación dinámica a gran escala espacial y temporal, especialmente de flujos con variaciones temporales lentas de caudales y alturas. Los procesos sedimentológicos que se analizan son sobre períodos de largo plazo, es decir, para las décadas del '80, '90 y '00, determinando deposiciones promedio del sedimento transportado en suspensión como carga de lavado. Se cuantifica, además, el impacto a nivel sedimentológico que induce la Conexión Física Rosario-Victoria en el valle de inundación.

### ABSTRACT

In this paper the modeling of sedimentation processes in floodplains of large lowland alluvial rivers is presented. The implementation and application of the physically-based and spatially-distributed hydro-sedimentological model CTSS8-FLUSED is described. The model simulates water flow dynamics, sediment transport and deposition processes of fine sediments by means of interconnected irregular cells scheme. The application is performed by coupling the FLUSED module with the CTSS8 hydrodynamic model, previously calibrated, validated and applied in the Diamante-Ramallo reach of the Lower Paraná River. The model is suitable for simulating water and sediment dynamics at large space and time scales, especially for flows with slow temporal variations. Sedimentological processes are analyzed on long-term periods, that is, for the decades of '80, '90 and '00, determining average suspended sediment depositions. Moreover, the sedimentological impact induced by the Rosario-Victoria road embankment is also assessed.

### INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas presentes en los grandes ríos de llanura, de conformación cauce principal-planicie aluvial, tienen anegamientos periódicos durante las crecidas, las cuales son cruciales para mantener la biodiversidad e integridad ecológica de estas áreas. La interferencia humana en estos ambientes puede cambiar la magnitud, frecuencia y duración de los anegamientos. Como consecuencia, pueden ser modificados los intercambios de agua, sedimentos, nutrientes

y biota entre cursos de agua y la llanura de inundación (Thoms et al., 2005).

Por otra parte, las llanuras aluviales producen la atenuación de las crecidas al conducir flujo de desborde desde el cauce principal, por lo que interesa tener un adecuado conocimiento de la hidrodinámica presente en estos sistemas. Además, debido a la deposición a largo plazo y los procesos de consolidación, las llanuras de inundación pueden convertirse en sumideros de sedimentos y contaminantes asociados a estas partículas (Walling et al., 1996).

Estas cuestiones han promovido el desarrollo y la aplicación de diferentes modelos computacionales para estudiar la hidrodinámica de sistemas cauce-planicie de inundación y los procesos de sedimentación en las llanuras aluviales. En las últimas décadas, se han implementado modelos numéricos 1D, 2D y 3D para simular los procesos hidráulicos de sistemas cauce-planicie (Horrit y Bates, 2002; Nicholas et al., 2006; Werner et al., 2005; Bates et al., 2006; Wilson et al., 2006), el transporte de sedimentos suspendidos y procesos deposicionales (Stewart et al., 1999; Hardy et al., 2000; Asselman y van Wijngaarden, 2002; Nicholas, 2003; Nicholas et al., 2006; Yang et al., 2012). En general, los modelos 1D y 2D se han aplicado para reproducir hidrogramas observados, para obtener mapas de áreas anegadas y para estimar tasas de sedimentación en tramos de ríos de 5 a 60 km de longitud, con planicies de inundación de menos de 3 km de ancho y que no cuentan con una importante red hidrográfica interior a la llanura aluvial. Asimismo, los modelos 3D se han aplicado en tramos de ríos del orden de un kilómetro.

Alternativamente, los modelos cuasi-bidimensionales logran un buen compromiso entre el costo computacional y la representación de los procesos físicos involucrados. Estos modelos capturan las características fundamentales del flujo de agua y la dinámica de los sedimentos finos suspendidos. Los mismos pueden ser aplicados para estudiar dicha dinámica a gran escala espacial y a largo plazo, con un bajo costo computacional.

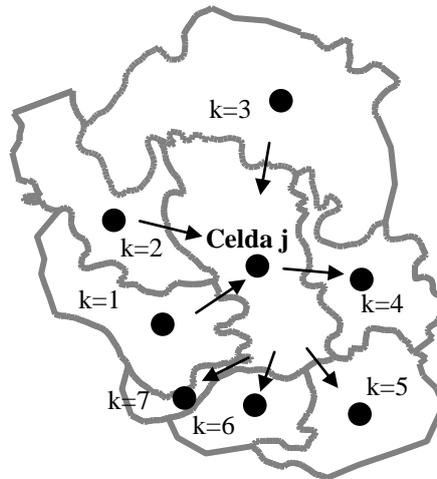
En este trabajo se presenta la aplicación de un modelo hidro-sedimentológico cuasi-2D, sobre un tramo de 208 km del río Paraná Inferior, entre las ciudades de Diamante y Ramallo. Hasta el momento han sido escasos los estudios de sedimentación de finos en esta amplia zona, la mayoría de ellos se dan sobre el tramo medio del río (Drago y Amsler, 1988; Paoli et al., 2000; Alarcón et al., 2003; Amsler et al., 2007) y también sobre su tramo final, en la desembocadura (Sarubbi, 2007; Re et al., 2009). Además, en el área que nos atañe, el transporte de sedimentos más estudiado es el que se desarrolla en el cauce principal (Paoli et al., 2000; Basile y Riccardi, 1998, 2002; Latosinski, 2012), o sobre un limitada área entorno a la transecta Rosario-Victoria (Serman & Asociados S. A., 2000), quedando poco explorados los procesos que involucran integralmente el cauce principal y su valle de inundación.

Al modelo hidrodinámico CTSS8 (Riccardi, 2001) se le acopla el módulo sedimentológico FLUSED (Basile et al., 2007), para simular el transporte y deposición de sedimentos finos. Se ha planteado el ingreso de caudales sólidos, desde registros de las principales fuentes de aporte, propagado hasta el ingreso al tramo en estudio. El objetivo principal es la determinación de deposiciones promedio del sedimento suspendido, sobre períodos de largo plazo (en este caso décadas). Para lo cual se desarrolla el módulo sedimentológico, que es acoplado al modelo hidrodinámico cuasi-2D, ya implementado sobre el dominio en estudio. Se determina además la retención de sólidos que genera todo el tramo, y se cuantifica el porcentaje que atrapa la planicie de inundación específicamente, evaluando su rol almacenador.

Las simulaciones se realizan sobre las décadas del '80, '90 y la del 2000, con ambas configuraciones: sin y con la obra de la conexión física (CF) Rosario-Victoria. Se analizan los resultados de las deposiciones, y las diferencias que subyacen a raíz de la implementación del terraplén vial, desde el año 2000. De esta manera, se han podido cuantificar las deposiciones y retención de sólidos, a través de un análisis integral de una zona de aproximadamente 8100 km<sup>2</sup> del sistema cauce-planicie del río Paraná Inferior.

## MÓDULO DE SIMULACIONES SEDIMENTOLÓGICAS

Sobre la base de los resultados obtenidos de la aplicación del modelo hidrológico-hidráulico cuasi-2D CTSS8 (Riccardi, 2001), se aplica el módulo sedimentológico cuasibidimensional FLUSED (Basile et al., 2007), físicamente basado y espacialmente distribuido, que permite simular numéricamente los procesos de transporte y deposición del material fino, para obtener tasas de deposición sobre las planicies. El modelo es apropiado para la simulación dinámica a gran escala espacial y temporal, especialmente para flujos con variaciones temporales lentas de caudales y alturas, como el caso en estudio. La distribución espacial de los parámetros del modelo y de las variables hidrodinámicas se realiza a través de la subdivisión del dominio en celdas amorfas, de tipo Río (donde predomina el flujo encauzado) y Valle (de las áreas tributarias a los cursos de agua). En la Figura 1 se visualiza la representación de las variables en la grilla de discretización con celdas amorfas.



**Figura1.-** Representación de variables en la grilla de celdas amorfas.

El módulo sedimentológico FLUSED, acoplado al modelo CTSS8, simula el transporte de sedimentos finos y los procesos de deposición mediante la resolución de la ecuación de continuidad sólida cuasi-2D. La ecuación de continuidad para la j-ésima se expresa como:

$$A_{s,j} \frac{\partial(h C_s)_j}{\partial t} = (A_s \phi_s)_j + \sum_{k=1}^N (Q C_s)_{j,k} \quad (1)$$

El flujo vertical de sedimentos (tasa de deposición),  $\phi_s$ , se expresa como:

$$\phi_s = P_d w_s C_s \quad (2)$$

La probabilidad  $P_d$  de deposición de las partículas viene dada por el criterio de Krone (1962), y se expresa mediante:

$$P_d = \begin{cases} 1 - \left( \frac{U}{U_{cd}} \right)^2 & ; \quad U < U_{cd} \\ 0 & ; \quad U \geq U_{cd} \end{cases} \quad (3)$$

Las ecuaciones se resuelven mediante un esquema numérico de diferencias finitas. Las concentraciones de sedimentos suspendidos, el flujo vertical y horizontal de sedimentos son determinados por un algoritmo implícito. Además, se calculan en cada celda las deposiciones medias y totales acumuladas (en peso y volumen), así como también los incrementos en las cotas de fondo de las celdas. Las condiciones iniciales vienen dadas por los niveles de agua y caudales en cada celda del dominio, de los resultados de las simulaciones hidrodinámicas, y las concentraciones de sedimentos suspendidos. Se especifica también el transporte de sedimentos en suspensión entrante en el extremo de aguas arriba, y los parámetros sedimentológicos necesarios.

## ÁREA EN ESTUDIO

El modelo se aplicó sobre 208 km del río Paraná, Argentina, desde Diamante (km 533 de la vía navegable) a Ramallo (km 325 de la vía navegable), y comprende al cauce principal y llanura de inundación, cubriendo un área de aproximadamente 8100 km<sup>2</sup>. El ancho del valle aluvial en esta zona varía entre 30 y 60 km, mientras que el ancho del cauce principal varía de 0,5 a 3 km. El caudal medio anual en Rosario (km 416 de la vía navegable) es de 17000 m<sup>3</sup>/s aproximadamente. La relación entre caudales máximos y mínimos llegó a ser de 9, valor bajo, característico de los grandes ríos. El mayor caudal de agua en todo el sistema se dio durante la crecida extraordinaria de 1983, que fue de aproximadamente 60000 m<sup>3</sup>/s, con casi 30000 m<sup>3</sup>/s sobre el cauce principal, con la planicie completamente inundada (profundidad media de 4 m de agua).

El cauce principal, en el extremo aguas arriba del área estudiada, comienza recostado sobre la margen izquierda, y cruza completamente la planicie, hasta recostarse sobre la margen derecha, aguas abajo de Pto. Gaboto. El sistema presenta un cauce principal bien definido, con uno o dos brazos importantes, y la planicie de inundación lateral, generalmente separada por albardones costeros (presentes hasta aguas abajo de Rosario). La llanura de inundación tiene un relieve complejo, producto de la evolución geomorfológica, que a través de mecanismos naturales (cambios del nivel del mar y climáticos), dentro de la llanura aluvial, dieron origen a distintas geoformas. Éstas definen la dinámica general de escurrimiento dentro de la planicie aluvial. Sobre la superficie de la misma existe una red de canales bien desarrollados, de distintas jerarquías, espejos de agua en espiras de meandros, lagunas, bajos permanentes y temporarios, y se presentan diferentes tipos de vegetación.

El lecho del río está formado por arena con  $d_{50}$  que varía entre 0,26 mm a 0,32 mm, y la desviación estándar geométrica varía entre 1,46 a 1,85. Se presentan albardones naturales a lo largo del curso principal. Los sedimentos en el valle aluvial están dispuestos en una capa de

aproximadamente 30 m de arena, con incrustaciones dispersas de arcilla y limo. Las capas superiores del suelo de la llanura de inundación e islas, de 1 a 3 m de espesor, están formadas por sedimentos muy finos, en el rango de limos y arcillas.

La fuente dominante del material fino que predomina en el río Paraná Medio e Inferior es la cuenca alta del río Bermejo, que tributa al río Paraguay, y en las cercanías de Confluencia, hace su descarga en el Paraná. El transporte de sedimentos promedio total anual que ingresa al sistema, es de aproximadamente  $150 \times 10^6$  t/año, de los cuales aproximadamente el 83% de los sedimentos es compuesta por limo y arcilla transportadas en suspensión como carga de lavado (Amsler y Drago, 1999). Estas partículas sólidas que ingresan con el flujo en el sistema cauce-planicie, son las principales determinantes de los cambios (deposiciones) en las cotas de fondo de la llanura aluvial. El agua que fluye sobre la misma, que ingresa a través de los cursos secundarios o desde el desborde del cauce principal, baja su velocidad y así se presentan condiciones factibles para que las partículas de la carga de lavado sedimenten en estos ambientes, especialmente en áreas lagunares donde se reducen aún más las velocidades.

Las máximas concentraciones de sedimentos suspendidos del río Paraná, se registran con cierto retardo con respecto a los máximos caudales líquidos provenientes del Alto Paraná (Drago y Amsler, 1988), siendo éste cuantificado en aproximadamente 10 días (hasta la sección del túnel subfluvial, en el tramo Medio) según lo evaluado de datos de aforos en Alarcón et al. (2003). Las máximas concentraciones de sedimentos suspendidos ocurren generalmente entre marzo y abril, y aquí el contenido de arcilla de la carga de lavado se incrementa notablemente (Amsler et al., 2007). Las concentraciones de sedimentos suspendidos representativas de la carga sólida del río Paraná tienen significativa complejidad, pudiéndose encontrar distintos trabajos al respecto (Bertoldi de Pomar, 1984; DH-FCEIA, 1997; Serman & asociados S. A., 1999; Sarubbi, 2007), donde se informan de los resultados de muestreos realizados, siendo los mismos fraccionados. En líneas generales, las concentraciones de sedimentos suspendidos varían, estacionalmente, entre 50 o 60 mg/l hasta valores de 500 o 600 mg/l en los picos de caudales sólidos. Los valores medios anuales están dentro del intervalo de los 150 a 250 mg/l aproximadamente. Además, las concentraciones dependen del lugar considerado, ya que sobre el cauce principal los valores típicos son los indicados, sobre los que se han efectuado la mayoría de las mediciones, y sobre la planicie los valores son menores, de magnitudes inferiores a 100 mg/l, donde las mediciones realizadas fueron muy aisladas.

## **IMPLEMENTACIÓN DEL MÓDULO FLUSED**

El modelo conformado sobre el área de aplicación, calibrado y validado oportunamente (García et al., 2012), tiene 1413 celdas Río y 140 celdas Valle, con 4248 vinculaciones entre ellas. Se cuenta con dos configuraciones del mismo: sin CF y con CF. Para realizar las corridas sedimentológicas, se consideran los resultados de las simulaciones hidrodinámicas de las décadas del '80, '90 y la del 2000, sin y con la obra vial (García et al., 2012).

En cuanto a la entrada de sedimentos sobre el cauce principal en Diamante (borde aguas arriba del modelo), se determina un concentrograma de sólidos suspendidos, elaborado en función de caudales sólidos observados en la zona de Confluencia, y propagados hasta la frontera del modelo. Todos los registros de caudales líquidos y sólidos aquí considerados fueron obtenidos de la página de la SubSecretaría de Recursos Hídricos de la Nación.

Para ello se tuvieron en cuenta los aportes sólidos que convergen al comenzar el Paraná Medio: desde el río Bermejo, el Alto Paraná y el río Paraguay. Para el aporte desde el río Bermejo se considera la relación entre caudales sólidos y líquidos de este río, que se presenta en Re et al. (2009), para la estación El Colorado (Formosa):

$$Q_s = \begin{cases} 0,0008 * Q_l^{2,4637}; & Q_l < 200 m^3/s \\ 0,0551 * Q_l^{1,6996}; & Q_l \geq 200 m^3/s \end{cases} \quad (4)$$

Los caudales líquidos considerados del río Bermejo tuvieron en cuenta un desfase temporal de 10 días, que sería el traslado hasta el borde aguas arriba del modelo en Diamante. Los aportes desde el Alto Paraná y desde el río Paraguay fueron estimados desde los transportes anuales promedio de la carga de lavado que se presentan en Alarcón et al. (2003). Allí se indica que el Gw promedio para la estación Itatí (Alto Paraná) es de 4539086 t/año, y para Puerto Pilcomayo (río Paraguay) es de 5214194 t/año. Para estimar la carga de sedimentos finos proveniente de cada aporte se consideró valores genéricos globales (4500000 t/año desde el Alto Paraná, y 5000000 t/año desde el río Paraguay) que se distribuyeron uniformemente en el año.

Así, se sumaron temporalmente los tres aportes de sólidos finos, a los cuales se les consideró una pérdida del 17% aproximadamente por el atrape de sólidos que se produciría en la planicie del Paraná Medio (estimación realizada en base a valores que se obtienen de Alarcón et al., 2003). Así, con los caudales sólidos calculados en Diamante, y a través de los caudales líquidos, se elabora el concentrograma de la carga de lavado para las décadas del '80; '90 y 2000. Los mismos se ajustan teniendo en cuenta valores mínimos de 76,9 mg/l (Alarcón et al., 2003) y máximos de 800 mg/l (en base a los mayores valores que surgen de los afloros de sólidos finos en la sección del Túnel Subfluvial). El transporte de sedimentos medio anual para todo el período evaluado resulta de  $107,7 \times 10^6$  t/año.

Para la entrada de sedimentos en Coronda, al ser escasos los datos, se elaboró un concentrograma sintético teniendo en cuenta el período típico de mayores aportes sólidos (febrero-mayo), registros máximos de 195 mg/l, y que la cantidad total anual de sólidos se estipula dentro del entorno de  $4,7 \times 10^6$  a  $8,6 \times 10^6$  t/año, presentados en Amsler et al. (2007) para dicha zona. Se toma en cuenta una concentración mínima de 60 mg/l en los períodos de bajos aportes sólidos. La concentración promedio que surge del concentrograma planteado es de 91,4 mg/l. El transporte de sedimentos medio anual sobre el río Coronda, para todo el período evaluado, resulta de  $8,96 \times 10^6$  t/año.

Para definir los parámetros sedimentológicos ( $w_s$  y  $U_{cd}$ ) se realizó un análisis de sensibilidad de los mismos, donde se consideraron rangos plausibles a partir de mediciones realizadas en la planicie de inundación (Mangini et al., 2005). Para  $U_{cd}$  los valores considerados variaron entre: 0,1 – 0,15 – 0,20 m/s, y para  $w_s$  entre:  $1 \times 10^{-6}$  -  $1 \times 10^{-5}$  -  $1 \times 10^{-4}$  -  $4 \times 10^{-4}$  -  $1 \times 10^{-3}$  m/s. Del análisis realizado, los resultados prácticamente no indicaban variaciones con las distintas  $U_{cd}$ , por lo que se considera finalmente el valor medio de 0,15 m/s. Para  $w_s$ , los resultados indicaban deposiciones excesivas con la velocidad mayor, y muy escasas con la velocidad menor, dando valores factibles los tres valores centrales, por lo que se adopta este rango de los mismos ( $1 \times 10^{-5}$  -  $1 \times 10^{-4}$  -  $4 \times 10^{-4}$  m/s), las cuales, usando la ley de Stokes para calcular un

diámetro equivalente del sedimento, cubren desde arcilla gruesa a limo fino, incluyendo flóculos. Para la porosidad de los sedimentos se consideró 0,40 (simulaciones a largo plazo, 10 años), acorde al nivel de compactación.

## EVALUACIÓN DE RESULTADOS

Se aplicó el módulo sedimentológico para las décadas del '80 y '90 sin considerar la CF, y para el período 2000-Agosto2010 con ambas configuraciones. Las simulaciones sedimentológicas fueron realizadas utilizando un intervalo temporal de cálculo de 24 horas, hasta cumplir con el tiempo de modelación total establecido. El tiempo real que insumieron las simulaciones, en promedio para cada período de diez años, fue entre 10 a 12 minutos, según la corrida, trabajando en un equipo Intel Core 2 Quad con CPU 2,4 GHz y 2 Gb de RAM.

Los ingresos sólidos anuales promedio fueron variables entre  $108,7 \times 10^6$  a  $133,4 \times 10^6$  t/año, acordes a los estimados para el tramo en estudio. Los resultados de las deposiciones (se informan rangos de valores, debido a las distintas  $w_s$  consideradas) se presentan en la Tabla 1.

**Tabla 1.-** Resumen de resultados de las simulaciones sedimentológicas, períodos de largo plazo

Resultados	1980-89 sin CF	1990-99 sin CF	2000-Ago10 con CF
Sólidos suspendidos ingresantes [ $\times 10^6$ t]	1333,7	1087,3	1159,1
Depósitos anuales $\Phi$ [ $\times 10^6$ t] en el Dominio	260,5 – 466,3	217,2 – 381,8	150,1 – 268,3
Retención de sólidos en el Dominio [%]	19,5 – 35,0	19,9 – 35,1	12,9 – 23,2
Depósitos anuales $\Phi$ [ $\times 10^6$ t] en la Planicie	149,6 – 177,6	133,6 – 155,1	67,8 – 80,8
Retención de sólidos en la Planicie [%]	11,2 – 13,3	12,3 – 14,3	5,8 – 6,9
Aumento en cotas de fondo [mm] sobre la Planicie	14,7 – 93,4	13,1 – 80,1	6,6 – 62,2

De los resultados de los períodos analizados, se puede indicar que la deposición promedio anual sobre todo el tramo en estudio (sistema cauce-planicie) puede variar desde  $14,1 \times 10^6$  a  $46,6 \times 10^6$  t/año, pudiendo retener el mismo entre 13% a 35% de los sedimentos que ingresan. Sobre la planicie de inundación pueden depositarse desde  $6,4 \times 10^6$  a  $17,8 \times 10^6$  toneladas anuales promedio, siendo la retención del valle variable entre 6% a 14% aproximadamente. Estos sólidos depositados generan incrementos en las cotas de fondo del valle, que pueden variar desde 0,6 mm a 9,3 mm anualmente.

En la Figura 2 se presenta la visualización de la distribución espacial de las deposiciones, a modo de ejemplo para la década del '80. Los sedimentos depositados en el dominio en estudio se muestran en la Figura 2a, y en la Figura 2b los incrementos en las cotas de fondo promedio, ponderados sobre las áreas anegadas. Los mayores depósitos se observan en las celdas correspondientes a las lagunas (Grande, del Pescado, Coronda), donde las velocidades han disminuido considerablemente, y donde se ensancha la planicie de inundación. Sobre el cauce principal prácticamente no se contabilizan deposiciones.

a)

b)

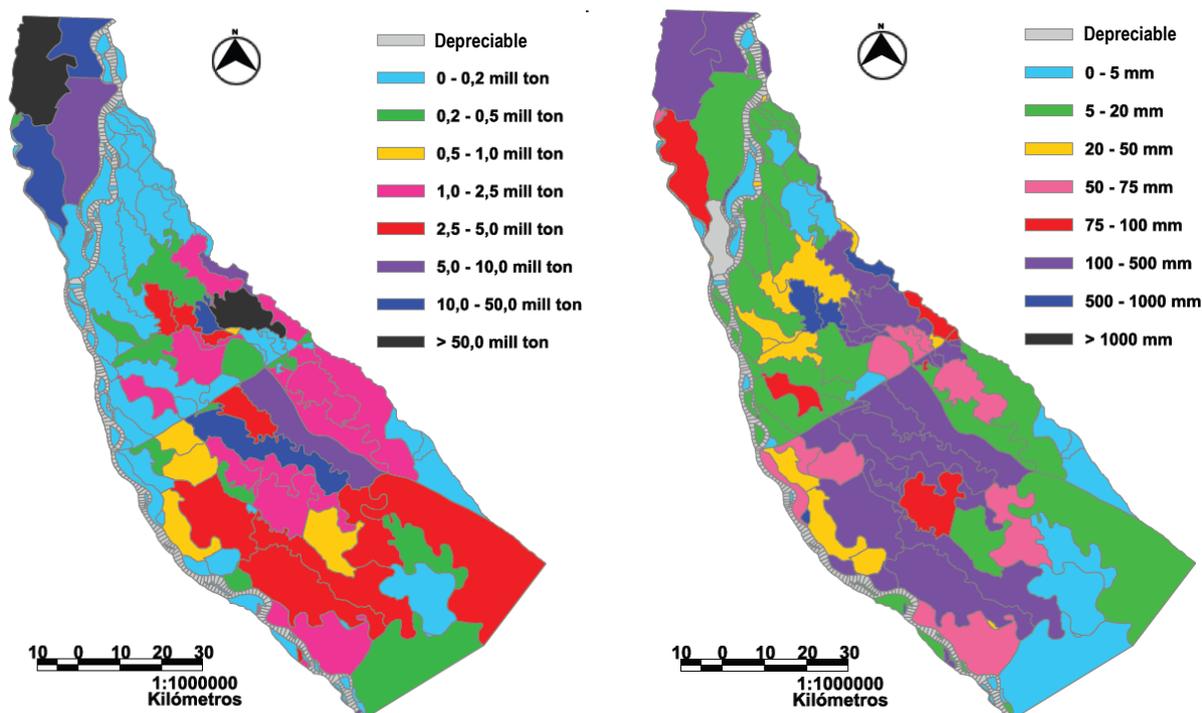


Figura 2.- Distribución espacial de depósitos para la década del '80 ( $w_s = 0,0001$  m/s): a) depósitos totales  $\Phi$  en las celdas del dominio, b) variaciones de la cota de fondo  $dz^*$ , ponderadas con áreas anegadas.

La presencia de la CF Rosario-Victoria, por el terraplén vial y las luces libres presentes a través de los puentes, hace que se produzca una redistribución del flujo de agua interno en la planicie de inundación. Ante las crecidas que se presentan en el río, se genera mayor elevación del tirante aguas arriba de ésta, y se incrementan los tiempos de residencia del agua sobre el valle aluvial. Esto hace que se produzcan cambios en los procesos de sedimentación que tiene lugar, por lo cual se evalúa la magnitud de los mismos a través de la comparación de los resultados sedimentológicos sobre la configuración sin y con la obra vial. Las variaciones en las depósitos se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2.- Resumen de cambios en los resultados sedimentológicos, período 2000-Agosto2010

Resultados	Diferencias en resultados con CF-sin CF	Incremento [%]
Depósitos anuales $\Phi$ [ $\times 10^6$ t] en el Dominio	2,12 - 2,81	0,80 - 1,68
Retención de sólidos en el Dominio [%]	0,18 - 0,24	
Depósitos anuales $\Phi$ [ $\times 10^6$ t] en la Planicie	0,10 - 1,40	0,12 - 1,84
Retención de sólidos en la Planicie [%]	0,01 - 0,12	
Aumento en cotas de fondo [mm] sobre la Planicie	0,01 - 15,82	0,1 - 34,1

Se observa en los resultados que los incrementos no son significativos, los porcentajes son menores al 2% (tanto en los depósitos totales, como en los de la planicie). Sobre la elevación de las cotas de la planicie es donde se puede notar cambios con la presencia de la CF, ya que los resultados indican que puede producirse un incremento anual promedio de hasta 1,48 mm.

En la Figura 3 se presenta la comparación de la distribución espacial de los depósitos totales en las celdas del modelo, sin y con la presencia de la CF Rosario-Victoria. Se puede apreciar que

las diferencias son leves, los depósitos son más distribuidos sobre los sectores aguas arriba y abajo del terraplén vial cuando no está la obra, pero al considerarla, hay mayores deposiciones aguas arriba, sobre el sector de la Laguna Grande y sobre el suroeste de la planicie, aguas abajo, cerca del cauce principal, y son menores aguas abajo de la CF en la parte este del viaducto, debido a la concentración mayor del flujo que se presenta con la obra. Las variaciones de las cotas de fondo se comportan de manera similar a las deposiciones, habiendo mayores elevaciones sobre el este de la planicie aguas arriba de la CF y menor al oeste, a causa de la redistribución que debe hacer el flujo para encauzarse hacia los puentes existentes.

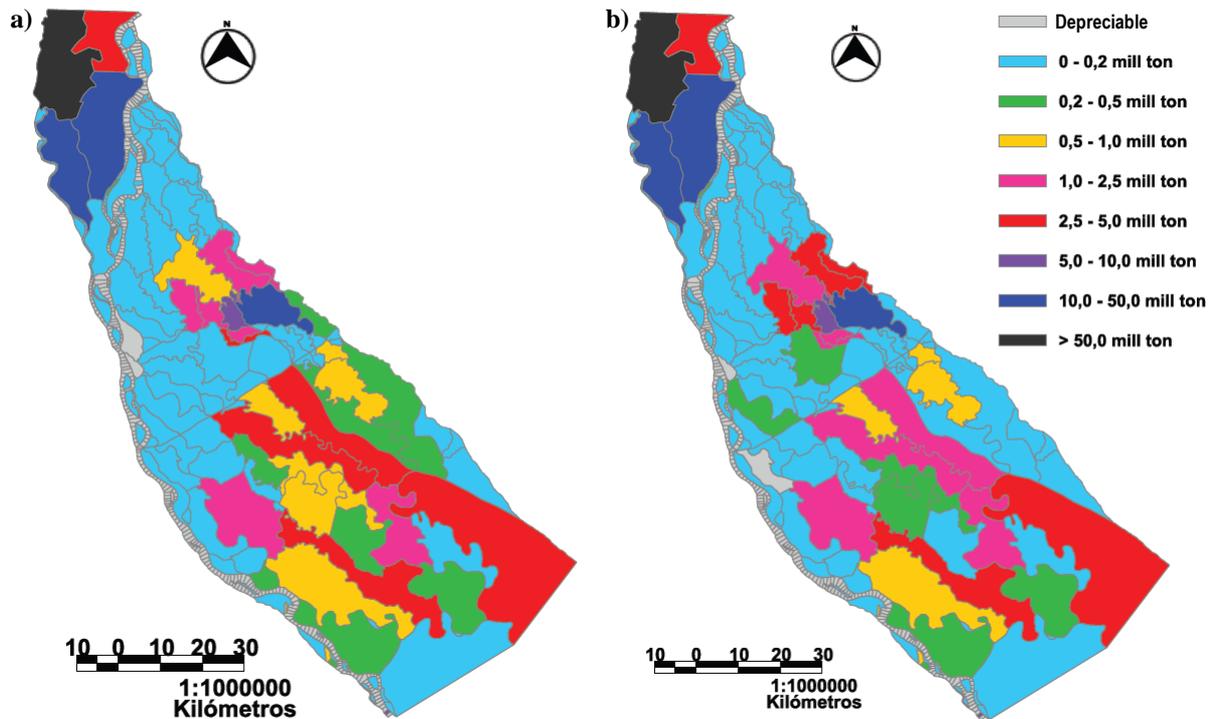


Figura 3.- Distribución espacial de depósitos totales  $\Phi$  en las celdas del dominio, década del 2000 ( $w_s = 0,0001$  m/s): a) sin CF Rosario-Victoria, b) con CF Rosario-Victoria.

## CONCLUSIONES

Se ha implementado y aplicado un modelo sedimentológico que simula el transporte y deposición de los sedimentos finos suspendidos, en un extenso tramo del río Paraná (Diamante-Ramallo). Se ha planteado el ingreso principal de caudales sólidos desde registros de las fuentes de aporte preponderantes, propagado hasta el ingreso al tramo en estudio. Se han podido cuantificar las deposiciones, en un rango de  $14 \times 10^6$  a  $47 \times 10^6$  t/año aproximadamente, y la retención de sólidos, entre 13% a 35%, que quedan en los 208 km del Paraná Inferior. Este hecho constituye un avance en el conocimiento de la zona, ya que hasta el momento no habían sido analizadas integralmente las deposiciones en este vasto tramo.

El valle de inundación, dentro del sistema cauce-planicie, tiene un rol preponderante como almacenadora, ya que sobre ella se evaluaron deposiciones en el entorno de  $6 \times 10^6$  a  $18 \times 10^6$  t/año aproximadamente (alrededor del 40% de los sedimentos que retiene el tramo), y produce un atrape de sólidos que puede variar desde el 6% al 14% de la totalidad que ingresa en el dominio estudiado.

Asimismo, se pudieron determinar los incrementos en las deposiciones que provoca la presencia de la CF Rosario-Victoria, que al generar mayores áreas anegadas y mayor tiempo de permanencia del agua, producen mayores deposiciones. Se observa de los resultados que los valores de mayor consideración son los incrementos en las cotas de fondo del valle, que puede tener un aumento de hasta 34%, dentro del período evaluado. Dentro de la planicie se produce una redistribución de los depósitos que no resulta significativa, con aumentos leves aguas arriba de la CF, en especial sobre el sector este, y aguas abajo aumento de los depósitos hacia el oeste.

*Agradecimiento.* Este trabajo fue desarrollado en el marco de una beca doctoral de CONICET y proyectos de investigación PID UNR 19-I161, 19-I269 y 19-I270 de la Universidad Nacional de Rosario, Argentina.

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_{sj}$ :	área superficial de la j-ésima celda [m <sup>2</sup> ]
$C_s$ :	concentración de sedimentos en suspensión [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]
CF:	conexión física Rosario-Victoria
$G_w$ :	transporte total anual de carga de lavado [t/año]
h:	profundidad del flujo en la celda j-ésima [m]
N:	número de celdas interconectadas con la j-ésima celda
$P_d$ :	probabilidad de deposición
$Q_{j,k}$ :	caudal líquido entre las celdas j y k (celda adyacente) [m <sup>3</sup> /s]
$Q_l$ :	caudal líquido [m <sup>3</sup> /s]
$Q_s$ :	caudal de sólidos finos o carga de sedimentos finos [kg/s]
t:	coordenada temporal [s]
U:	velocidad media de flujo [m/s]
$U_{cd}$ :	velocidad media crítica para el comienzo de la deposición [m/s]
$w_s$ :	velocidad de caída de las partículas de sedimento suspendido [m/s]
$\phi_s$ :	flujo vertical de sedimentos asociado a deposición [m/s]

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**Alarcón, J. J.; Szupiany, R.; Montagnini, M. D.; Gaudin, H.; Prendes, H. H.; y Amsler, M.** (2003). “Evaluación del transporte de sedimentos en el tramo medio del río Paraná”, *I Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos. Ezeiza, Argentina.*

**Amsler, M. L. y Drago, E.** (1999). “A review of the suspended sediment budget at the confluence of the Paraná and Paraguay rivers”, *Symposium on hydrological and geochemical processes in large scale rivers. Manaus, Brazil*

**Amsler, M. L.; Drago, E. C. y Paira, A. R.** (2007). “Fluvial sediments: Main channel and floodplain interrelationships”, *Capítulo 5, en: The Middle Paraná River: Limnology of a Subtropical Wetland, de Iriondo, M. H.; Paggi, J. C. y Parma, M. J. (Eds.). Heidelberg, New York. Parte I, pp. 123 – 14.*

**Asselman, N. E. M. y van Wijngaarden, M.** (2002). "Development and application of a 1D floodplain sedimentation model for the River Rhine in The Netherlands". *Journal of Hydrology*, Volume 268, Issues 1–4, pp. 127–142.

**Basile, P. A. y Riccardi, G. A.** (1998). "Desarrollo y aplicación de un modelo matemático morfológico cuasi-2D para simular numéricamente los procesos dinámicos de erosión y sedimentación en ríos aluviales". *XVII Congreso Nacional del Agua, Santa Fe, Argentina, Tomo III*, pp. 472-482.

**Basile, P. A. y Riccardi, G. A.** (2002). "Application of a quasi-2D hydro-morphological mathematical model to the Argentinean Paraná River". *International Journal of Sediment Research*, Vol. 17, N° 1, pp. 20-30.

**Basile, P. A.; Riccardi, G. A.; Garcia, M. L. y Stenta, H. R.** (2007). "Quasi-2D modeling of hydro-sedimentological processes in large lowland river-floodplain systems", *Workshop on Morphodynamics Processes in Large Lowland Rivers. Santa Fe, Argentina*.

**Bates, P. D.; Wilson, M. D.; Horritt, M. S.; Mason, D. C.; Holden, N. y Currie, A.** (2006). "Reach scale floodplain inundation dynamics observed using airborne synthetic aperture radar imagery: Data analysis and modeling", *Journal of Hydrology* 328, Issues 1-2, pp. 306-318.

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

**DH-FCEIA.** (1997). "Estudio y Proyecto de la Obra de Dragado de Acceso al Puerto de PASA S.A.". *Informe Final Convenio PASA S.A.- Departamento de Hidráulica, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario, Argentina*.

**Drago, E. C. y Amsler, M. L.** (1988). "Suspended Sediment at a Cross Section of the Middle Parana River: Concentration, Granulometry and Influence of the Main Tributaries". *Sediment Budgets. Washington, DC. IAHS Publication No. 174*, pp. 381-396.

**Hardy, R. J.; Bates, P. D. y Anderson, M. G.** (2000). "Modelling suspended sediment deposition on a fluvial floodplain using a two-dimensional dynamic finite element model". *Journal of Hydrology*, Vol. 229, pp. 202-218.

**Horritt, M. S y Bates, P. D.** (2002). "Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation". *Journal of Hydrology*, Vol. 268, pp. 87-99.

**Krone, R. B.** (1962). "Flume studies of the transport of sediment in estuarial shoaling processes". *Final Rep., Hydraulic Engineering Laboratory and Sanitary Engineering Research Laboratory, University of California, Berkeley, EEUU*.

**Garcia, M. L.; Basile, P. A. y Riccardi, G. A.** (2012). "Modelación hidrodinámica de sistema cauce-planicie con celdas amorfas, de tramo del río Paraná Inferior", *I Encuentro de Investigadores en Formación en Recursos Hídricos, IFRH 2012, Ezeiza, Argentina, 15 p.*

**Latosinski, F. G.; Szupiany, R. N.; García, C. M. y Guerrero, M.** (2012). “Estimación del Transporte de Sedimentos de Fondo en un Gran Río con Perfilador Acústico Doppler”. *I Encuentro de Investigadores en Formación en Recursos Hídricos, IFRH 2012, INA, Ezeiza, Argentina, 18 p.*

**Mangini, S. P.; Hueste, J.; Cueva, I. P.; Prendes, H. H. y Amsler, M. L.** (2005). “Sedimentación de la carga de lavado en ambientes fluviales de los ríos Paraná y Uruguay”, *XX Congreso Nacional del Agua y III Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur, Mendoza, Argentina.*

**Nicholas, A. P.** (2003). “Modelling and monitoring flow and suspended sediment transport in lowland river flood plain Environments”. *Erosion and Sediment Transport Measurement in Rivers: Technological and Methodological Advances. Proceedings of the Oslo Workshop, June 2002, IAHS Publication 283, pp. 45-54.*

**Nicholas, A. P.; Walling, D. E.; Sweet, R. J. y Fang, X.** (2006). “New strategies for upscaling high-resolution flow and overbank sedimentation models to quantify floodplain sediment storage at the catchment scale”. *Journal of Hydrology, Volume 329, Issues 3–4, pp. 577–594.*

**Paoli, C.; Iriondo, M. y García, N.** (2000). “El río Paraná en su tramo medio. Contribución al conocimiento y prácticas ingenieriles en un gran río de llanura”. *Capítulo 1, Tomo I, de: Paoli, C. y M. Schreider. Ediciones UNL, ISBN 987-508-120-5. Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina.*

**Re, M.; Menéndez, A. N. y Amsler, M. L.** (2009). “Metodología para la generación de series temporales de descarga sólida de los ríos Paraná de las Palmas y Paraná Guazú”, *Cuarto Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos, Salta, Argentina.*

**Riccardi, G. A.** (2001). “Un Sistema de Simulación Hidrológica-Hidráulica cuasi-2D multicapa para ambientes rurales y urbanos”. *Tesis Doctoral, FCEFyN, UNC, Córdoba, Argentina.*

**Sarubbi, A.** (2007). “Análisis del Avance del frente del Delta del Río Paraná”. *Tesis de grado en Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería. Universidad de Buenos Aires. 136 p.*

**Serman & asociados S. A.** (1999). “Análisis de condiciones sedimentológicas en el entorno de la Conexión vial”. *Informe de Puentes del Litoral S.A., Convenio Gobierno Nacional – Provincias de Santa Fe y Entre Ríos para la obra Conexión Física Rosario-Victoria. Argentina.*

**Serman & asociados S. A.** (2000). “Estudio hidráulico del puente principal y viaducto Este. Modelación matemática bidimensional”. *Informe de Puentes del Litoral S.A., Convenio Gobierno Nacional – Provincias de Santa Fe y Entre Ríos para la obra Conexión Física Rosario-Victoria. Argentina.*

**Stewart, M. D.; Bates, P. D., Anderson, M. G.; Price, D. A. y Burt, T. P.** (1999). "Modelling floods in hydrologically complex lowland river reaches". *Journal of Hydrology*, Volume 223, Issues 1-2, pp. 85-106.

**Thoms, M. C.; Heather, M. S. y McGinness, M.** (2005). "Floodplain–river ecosystems: Fragmentation and water resources development", *Geomorphology* 71 (2005), pp. 126–138.

**Walling, D. E.; He, Q. y Nicholas, A. P.** (1996). "Floodplains as suspended sediment sinks". En: *Anderson, M.G., Walling, D.E., Bates, P.D. (Eds.) Floodplain Processes. Wiley, Chichester, U. K., pp. 399-440.*

**Werner, M. G. F.; Hunter, N. M. y Bates, P. D.** (2005). "Identifiability of distributed floodplain roughness values in flood extent estimation". *Journal of Hydrology*, Volume 314, Issue 1-4, pp. 139-157.

**Wilson, C. A. M. E.; Yagcib, O.; Rauchc, H. P. y Olsend, N. R. B.** (2006). "3D numerical modelling of a willow vegetated river/floodplain system". *Journal of Hydrology*, Volume 327, Issues 1–2, pp. 13–21.

**Yang, C. P.; Lung, W. S.; Kuo, J. T. y Lai, J. S.** (2012). "Using an integrated model to track the fate and transport of suspended solid and heavy metal in the tidal wetlands". *International Journal of Sediment Research*, 27 (2) 201-212.