

EVALUACIÓN DE DEPOSICIONES MEDIANTE MODELO HIDRO-SEDIMENTOLÓGICO EN GRAN TRAMO DEL RÍO PARANÁ INFERIOR

Marina L. García¹, Pedro A. Basile¹ y Gerardo A. Riccardi^{1,2}

¹ Dto. Hidráulica (EIC) y Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales, ² Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Rosario – Fac. Cs. Exactas, Ingeniería y Agrimensura – Universidad Nacional de Rosario, Argentina.
E-mail: mgarcia@fceia.unr.edu.ar

Introducción

La importancia del río Paraná dentro de nuestro país, desde diversos aspectos, hace que su estudio sea fundamental para contribuir al conocimiento de los procesos que suceden en éste. En particular, la hidrodinámica que tiene lugar en él es debido a la formación geológica que ha tenido y a las geoformas allí presentes, donde en su conformación actual cauce-planicie son considerables los procesos de deposición de la carga de lavado. Los ecosistemas presentes en estos grandes ríos de llanura, tienen anegamientos periódicos durante las crecidas, las cuales son cruciales para mantener la biodiversidad e integridad ecológica de estas áreas. Además, éstas producen la atenuación de las crecidas al conducir flujo de desborde desde el cauce principal. Las partículas sólidas que ingresan con éste al sistema, son las principales determinantes de las deposiciones en la planicie de inundación.

La modelación matemática permite cuantificar fenómenos hidrodinámicos y sedimentológicos, evaluando el comportamiento integral del sistema. Éstas son herramientas muy valiosas, que tienen distintas simplificaciones, de acuerdo al grado de representación del fenómeno y del área involucrada. La implementación de los modelos cuasi-2D es una de las mejores opciones para las simulaciones en estos ambientes, ya que logran un buen compromiso entre el bajo costo computacional y la adecuada representación de los procesos físicos involucrados, donde la dinámica hídrica es a gran escala espacial y de largo plazo. Sobre el área de estudio se han implementado y aplicado: el modelo cuasi-2D CTSS8 (Riccardi, 2001) y módulo FLUSED (Basile et al., 2007), físicamente basados y espacialmente distribuidos, que simulan numéricamente los procesos de inundación en el sistema cauce-planicie, y el transporte y deposición de sedimentos finos, respectivamente. Las aplicaciones anteriores del modelo en la zona de estudio (García, 2012, 2013; García et al., 2013a y b; García et al., 2015; García et al., 2017), tuvieron resultados muy satisfactorios. El modelo también fue aplicado exitosamente en otro tramo del río Paraná (Werter et al., 2018). Se presenta aquí la aplicación de dicho modelo hidro-sedimentológico cuasi-2D, sobre un gran tramo del Paraná Inferior, para la evaluación global de las deposiciones en el sistema.

Objetivos

El objetivo del trabajo es la evaluación, mediante modelación hidro-sedimentológica, del comportamiento del sistema cauce-planicie en un tramo de 208 km del río Paraná, entre las ciudades de Diamante y Ramallo (Argentina), cuantificando las deposiciones de sedimentos y retención de sólidos que tuvieron lugar entre los años 2010 y 2016, a través del análisis integral del área de aproximadamente 8100 km² del río Paraná Inferior.

Materiales y métodos

El modelo hidrodinámico utilizado es el CTSS8 (Riccardi, 2001), que simula el flujo de agua, basado en un esquema de celdas amorfas interconectadas, que representan planialtimétricamente al cauce principal, cursos secundarios,

relieve del valle, bajos y lagunas, albardones. La propagación cuasi-2D de caudales se realiza mediante leyes de descarga entre celdas, las cuales han sido derivadas a partir de la ecuación de Saint Venant (aproximación de onda difusiva). La distribución espacial de los parámetros del modelo y de las variables hidrodinámicas se realiza a través de la subdivisión del dominio del modelo de celdas irregulares, que se adaptan a la configuración planimétrica del área a representar.

El modelo se aplicó desde Diamante (provincia de Entre Ríos, Argentina) a Ramallo (provincia de Buenos Aires, Argentina), y comprende al cauce principal y llanura de inundación (Figura 1). El ancho del valle aluvial varía entre 30 y 60 km, y el del canal principal varía de 0.5 a 3 km. El caudal medio anual en Rosario (km 416 de la vía navegable) es de 17000 m³/s aproximadamente. La relación entre caudales líquidos máximos y mínimos es de 9, valor bajo, característico de los grandes ríos. La llanura de inundación es morfológicamente compleja. La fuente dominante del material fino que predomina en el río Paraná Inferior es la cuenca alta del río Bermejo. El transporte de sedimentos promedio que ingresa al sistema es de 150×10⁶ t/año, de los cuales el 83% son limos y arcillas transportadas en suspensión como carga de lavado (Amsler y Drago, 1999).

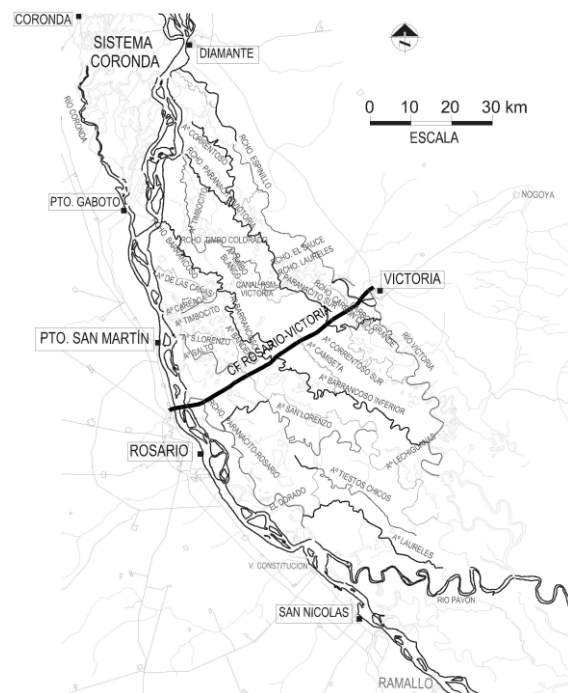


Figura 1.- Área de aplicación del modelo.

La discretización topológica se realizó mediante la definición de celdas Río, celdas Valle y distintas vinculaciones entre ellas, donde se representan características topográficas especiales (albardones naturales, terraplenes de caminos, puentes, etc.). El mismo fue calibrado para aguas bajas, medias y altas, con eventos hidrológicos registrados, y posteriormente validado para tres décadas (García et al., 2012).

A partir de los resultados hidrodinámicos (alturas y caudales) del modelo CTSS8, se aplica el módulo sedimentológico cuasi-2D FLUSED (Basile et al., 2007), físicamente basado y

espacialmente distribuido, que simula los procesos de transporte y deposición del material fino de la carga de lavado, para obtener tasas de deposición sobre la planicie. Las simulaciones se realizan mediante la resolución de la ecuación de continuidad sólida cuasi-2D de sedimentos suspendidos. El flujo vertical de sedimentos, asociado a la deposición, es proporcional a la probabilidad de deposición P_d , a la velocidad de caída de las partículas w_s y a la concentración de sedimentos suspendidos C_s . La P_d viene dada por el criterio de Krone (1962), en función de la velocidad media de flujo U y de la crítica para el comienzo de la deposición U_{cd} . Los parámetros sedimentológicos (w_s , U_{cd} , porosidad) fueron definidos en base a un análisis de sensibilidad de los mismos, y desde rangos plausibles obtenidos de mediciones (García, 2013). Se calculan en cada celda las deposiciones medias y totales acumuladas, así como también los incrementos en las cotas de fondo de las celdas.

Las condiciones iniciales utilizadas son alturas de agua en las celdas, obtenidas de corridas preliminares. Las condiciones de borde aguas arriba son hidrogramas de entrada, obtenidos a partir de los registros de caudales en el tramo inmediato aguas arriba, Paraná Medio (García et al., 2017). En el contorno aguas abajo se imponen leyes altura-caudal en las celdas de salida. Las condiciones iniciales para el módulo sedimentológico son los niveles de agua y caudales (de las simulaciones hidrodinámicas), las concentraciones iniciales de sedimentos suspendidos en cada celda, y la condición de borde en el extremo aguas arriba es el sedimentograma entrante, que se obtiene a partir de los registros de sólidos finos de las principales fuentes de aporte, y propagado hasta el extremo del dominio modelado.

Con las condiciones indicadas, se realiza la aplicación del modelo CTSS8-FLUSED para dos períodos: Sept. 2010–Agosto 2015 y Sept. 2015–Agosto 2016. En este último, se presentó una crecida importante del río, y se la trata separadamente para realizar comparaciones de resultados deposicionales.

Resultados

Los resultados de las simulaciones hidrodinámicas (con el CTSS8) fueron muy satisfactorios (se comparan niveles limnimétricos en Diamante, Victoria, Coronda, Puerto Gaboto, PSM, Rosario y San Nicolás, y caudales en PSM), obteniéndose un desempeño aceptable del modelo en general con coeficientes Nash-Sutcliffe superiores a 0.55, y en PSM, Rosario y SN muy buenos, coeficientes mayores a 0.85. Los resultados logrados reflejan una buena correlación entre las observaciones y las modelaciones (errores promedios menores de 6.5%).

En cuanto a las simulaciones sedimentológicas realizadas con FLUSED (se informan rangos de valores, debido a que se considera un rango de w_s factibles), los resultados fueron los siguientes (Figura 2): los sólidos anuales promedio depositados van desde 10 a 16×10^6 t, representando del 13 al 21% de los sólidos ingresantes que se depositan sobre todo el dominio (acordes a porcentajes usuales en estos sistemas cauce-planicie de grandes ríos de llanura). En el valle se depositaron de 3.4 a 4.4×10^6 t anuales, que representan de 21% a 43% de los sedimentos retenidos en el tramo, evidenciando su rol de almacenador. Estos depósitos generan incrementos en las cotas de fondo de la planicie que varían desde 0.3 a 0.4 mm/año. Sobre el cauce principal no se contabilizan deposiciones.

Para la crecida sucedida entre 2015 y 2016, el caudal máximo registrado fue de $26431 \text{ m}^3/\text{s}$, superando someramente el valor de $25000 \text{ m}^3/\text{s}$, donde se considera que se presenta el flujo por desborde sobre la planicie. En dicho período (Sept. 2015–Agosto 2016), el ingreso sólido es de 86.4×10^6 t, que es un valor bajo de ingresos de sedimentos en el sistema. Luego de las simulaciones hidro-sedimentológicas para esta crecida, se

contabilizan deposiciones de 21 a 33×10^6 t en todo el dominio, y dentro de la planicie de inundación de 15.3 a 16.5×10^6 t (entre 45% a 78% de lo depositado en el sistema). El incremento promedio anual en las cotas de fondo de la planicie que generó esta crecida es de 1.4 a 1.7 mm.

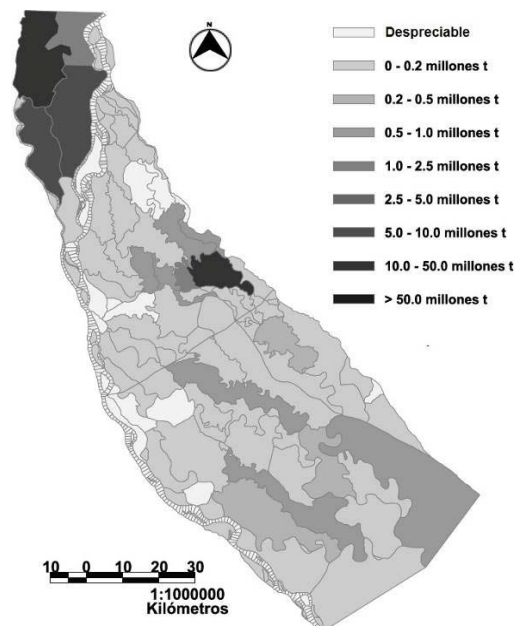


Figura 2.- Distribución espacial de deposiciones, durante período 2010-2015 ($w_s = 0.0001 \text{ m/s}$).

Conclusiones

A partir del modelo matemático constituido sobre el Paraná Inferior, se evaluó el comportamiento hidro-sedimentológico del sistema cauce-planicie para el período 2010 a 2016. Los resultados hidrodinámicos indican un desempeño muy bueno del modelo, con coeficientes NS elevados para las estaciones de registro sobre el cauce principal, y aceptables para el resto.

De los resultados de las simulaciones sedimentológicas, se concluye que para el período 2010-2015, de caudales medios, con escaso ingreso de sólidos al sistema, y presencia moderada a baja de agua en el valle, le corresponden deposiciones considerablemente bajas. La crecida 2015-2016, según los caudales registrados, fue de carácter moderada. Los resultados sedimentológicos indican que este tipo de crecidas puede llegar a generar depósitos en el valle del orden de cuatro veces las cantidades anuales del período 2010-2015, y del 75% al 90% de los que se acumularían en 5 años de aguas medias, con escaso ingreso sólido.

Referencias

- Basile, P.A.; Riccardi, G.A.; García, 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.
- García, M.L.; Basile, P.A.; Riccardi, G.A. y Rodríguez, J.F. (2015). "Modelling extraordinary floods and sedimentological processes in a large channel-floodplain system of the Lower Paraná River (Argentina)". *International Journal of Sediment Research*, ISSN 1001-6279, Vol. 30 (2015), pp. 150-159.
- Riccardi, G.A. (2001). *Un Sistema de Simulación Hidrológica-Hidráulica cuasi-2D multicapa para ambientes rurales y urbanos*. Tesis Doctoral, FCEfyn, UNC, Córdoba, Argentina.
- Werter, S.J.; Grimson, R.; Minotti, P.G.; Booij, M.J. y Brugnach, M. (2018). "Hydrodynamic modelling of a tidal delta wetland using an enhanced quasi-2D model". *Journal of Hydrology*, Vol 559, pp. 315-326.