



ESTUDIO DE AFOROS Y MODELACIÓN HIDRO-SEDIMENTOLÓGICA DEL CAUCE Y PLANICIE ALUVIAL DEL RÍO PARANÁ

Marina L. Garcia⁽¹⁾, Pedro A. Basile⁽¹⁾ y Gerardo A. Riccardi^{(1)y(2)}

(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 – Fac. Cs. Exactas, Ingeniería y Agrimensura – Universidad Nacional de Rosario
 Riobamba 245 bis, Ciudad Universitaria Rosario, 2000 Rosario, Santa Fe – Tel.: +54 341 4808541
 E-mail: mgarcia@fceia.unr.edu.ar

RESUMEN

En este trabajo se presenta un estudio de los registros de caudales líquidos y sólidos del río Paraná, y la posterior aplicación de un modelo hidro-sedimentológico en el tramo Diamante-Ramallo (aproximadamente 8100 km²), comprendiendo el cauce principal y la planicie de inundación del río Paraná Inferior. En primer lugar, se realizó una recopilación de registros de niveles hidrométricos y caudales (líquidos y sólidos), publicados por la SSRH, observados en el Paraná Medio y en la zona de la confluencia de los ríos Bermejo-Paraguay-Paraná. Se plantearon diversas hipótesis de distribución de caudales para generar los hidrogramas de ingreso al dominio. Además, con los registros de transporte de sedimentos en suspensión, se generó un sedimentograma, que se propagó hasta el contorno aguas arriba del tramo modelado, y se lo contrastó con aforos sólidos disponibles en la zona. Para la cuantificación de procesos de deposición, se aplicó el modelo hidro-sedimentológico CTSS8-FLUSED, para el período Septiembre 2010-Agosto 2015. Los resultados de la modelación hidrodinámica son satisfactorios, lográndose una aceptable reproducción de caudales y niveles hidrométricos en los puntos de control. Los resultados sedimentológicos indican deposiciones que varían de 10 a 16×10⁶ t/año dentro del área de estudio, siendo la eficiencia de atrape de la planicie aluvial entre 21% al 43%.

ABSTRACT

A study of water and sediment measurements in the Paraná River and the subsequent application of a hydro-sedimentological model at the Diamante-Ramallo reach are presented. The study area comprises the main channel and the floodplain, covering an approximate extension of 8100 km² of the Lower Paraná River. In a first stage, a data collection of recorded discharges (liquid and solid) was carried out in the middle section of the Paraná River and at the confluence zone of the Bermejo-Paraguay-Paraná rivers. These data are published periodically by the SSRH of Argentina. In addition a sedigraph was generated with records of suspended sediment transport, which was propagated up to the upstream boundary and it was compared with available measurements in the area. In order to evaluate the deposition processes in the period September 2010-August 2015, the hydro-sedimentological model CTSS8-FLUSED was applied. The results of the hydrodynamic modeling are satisfactory, achieving an acceptable reproduction of discharges and water levels at the control sections. The sedimentological results indicate depositions varying from 10 to 16×10⁶ t/year within the study area, with trapping efficiency of the floodplain between 21% and 43%.

INTRODUCCIÓN

El río Paraná es el más importante del país, por lo que resulta sustancial contribuir al conocimiento de los procesos hidrodinámicos en este sistema cauce-planicie, donde 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 los cambios (deposiciones) en las cotas de fondo de la planicie aluvial.

La modelación matemática permite cuantificar los fenómenos hidrodinámicos y sedimentológicos que se presentan, evaluando el comportamiento integral del sistema. Éstas son herramientas valiosas, que tienen distintas simplificaciones, de acuerdo al grado de representación del fenómeno que se estudie y al área involucrada. La implementación de los modelos cuasi-2D logran un buen compromiso entre el costo computacional (bajo) y la 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 ha implementado y aplicado el modelo cuasi-2D CTSS8 (Riccardi, 2001) y módulo FLUSED (Basile et al., 2007), que simulan numéricamente los procesos de inundación en el sistema cauce-planicie, y el transporte y deposición de sedimentos finos, respectivamente. Las aplicaciones anteriores en zona de estudio (García, 2012, 2013; García et al., 2013a y b; García et al., 2015), tuvieron resultados muy satisfactorios. Sin embargo, los datos de entrada al modelo pueden ser ulteriormente mejorados.

Recientemente la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (SSRH) ha puesto a disposición en su página web, registros de alturas y caudales de las principales estaciones de los ríos de nuestro país. Se decide analizar aquellas que están involucradas en los aportes líquidos e ingresos sólidos al área en estudio. Un primer objetivo del presente trabajo es determinar los hidrogramas y sedimentogramas ingresantes, a partir de aforos líquidos y sólidos actualizados, para la simulación hidro-sedimentológica en un tramo de 208 km del río Paraná, entre las ciudades de Diamante y Ramallo. En segundo lugar, se plantea la evaluación, mediante modelación hidro-sedimentológica, para el período Septiembre 2010 a Agosto 2015, del comportamiento del sistema cauce-planicie, cuantificando las deposiciones de sedimentos y retención de sólidos, a través del análisis integral de 8100 km² del río Paraná Inferior. Así, se confeccionan hidrogramas para la condición de borde aguas arriba del modelo, independientes de los registros internos del dominio, para evaluar la eficacia del modelo en la reproducción de limnigramas e hidrograma en los puntos de control, especialmente sobre el cauce principal. También se elaboran concentrogramas en los ingresos al modelo, donde se toma en cuenta una relación actualizada entre caudales líquidos y sólidos de la fuente principal de sólidos del Paraná, se lo propaga hasta el borde aguas arriba del modelo, y se van comparando los valores con los registros recientes de aforos sólidos

MATERIALES Y MÉTODOS

El flujo de agua se simula con el modelo hidrodinámico CTSS8 (Riccardi, 2001). El modelo se basa en un esquema de celdas interconectadas, que representan planialtimétricamente al cauce principal, cursos secundarios, relieve del valle, bajos y lagunas, albardones. La hidrodinámica se resuelve mediante aproximación de onda difusiva cuasi-2D de las ecuaciones de Saint-Venant. 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 (amorfas), que se adaptan a la configuración planimétrica del área a representar. El modelo se aplicó desde Diamante a Ramallo, y comprende al cauce principal y

llanura de inundación (Figura 1a). 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) es 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 150×10^6 t/año, de los cuales el 83% son limos y arcillas transportadas en suspensión como carga de lavado (Amsler y Drago, 1999).

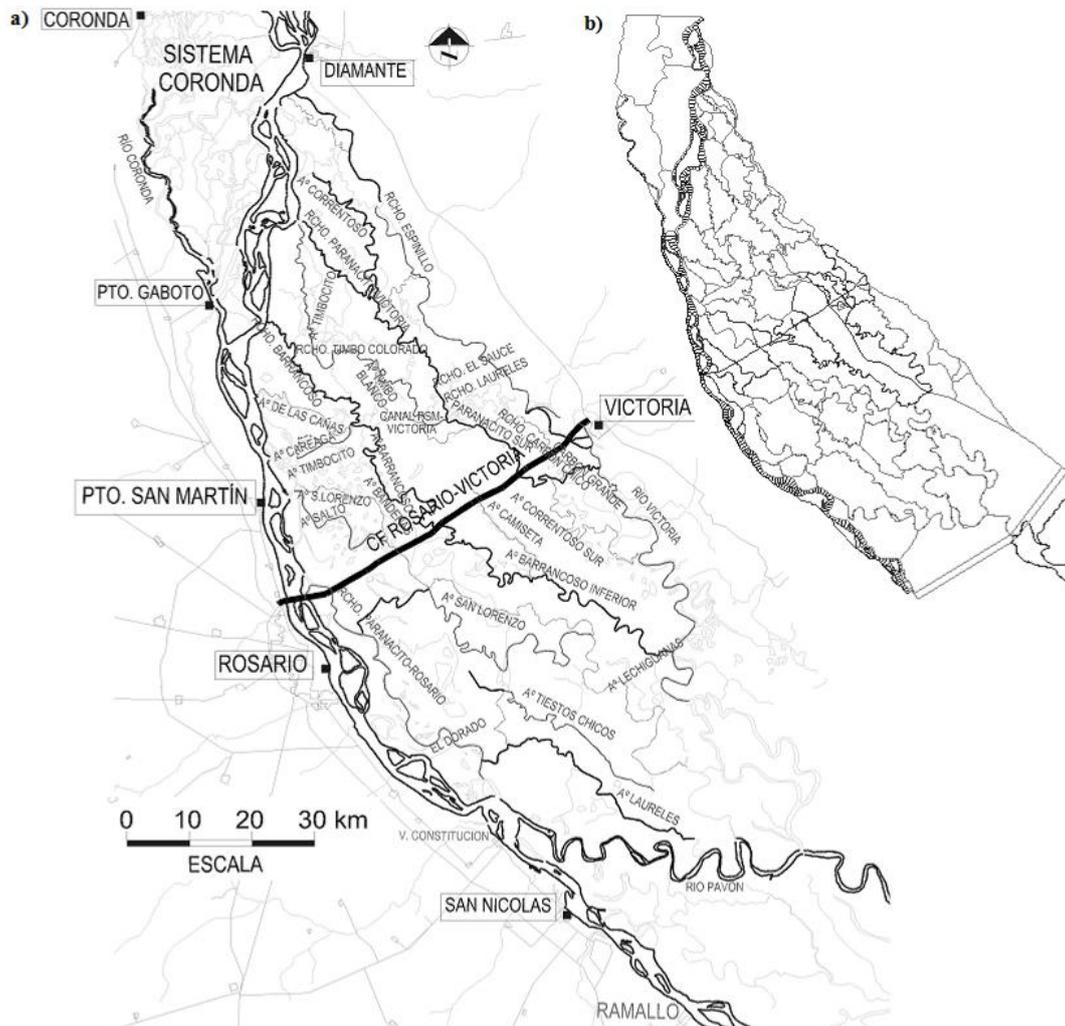


Figura 1.- a) Área en estudio, b) Visualización de la constitución del modelo matemático.

La discretización topológica del modelo matemático conformado sobre el área de aplicación, 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 modelo constituido (con la CF Rosario-Victoria) tiene 1443 celdas Río y 152 celdas Valle, con 4366 vinculaciones entre ellas (Figura 1b). El mismo fue calibrado (para aguas bajas, medias y altas, con eventos hidrológicos registrados) y validado (considerando las décadas del '80; '90 y del 2000) con resultados muy satisfactorios (García et al., 2012; García, 2013), donde los coeficientes de Nash-Sutcliffe (NS) fueron superiores a 0.65 (y la mayoría de éstos superiores a 0.8) y los errores promedios entre los limnigramas calculados y observados menores al 10%.

Sobre la base de los resultados de la aplicación 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 las planicies. Las simulaciones se realizan mediante la resolución de la ecuación de continuidad sólida cuasi-2D de sedimentos suspendidos. El flujo vertical de sedimentos, 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. La P_d viene dada por el criterio de Krone (1962), en función de la velocidad media del flujo y de la crítica para el comienzo de la deposición U_{cd} . Se definieron los principales parámetros sedimentológicos necesarios para las simulaciones sedimentológicas ($U_{cd} = 0.15$ m/s, la w_s se trabaja con el rango: 1×10^{-5} - 1×10^{-4} - 4×10^{-4} m/s), a través de valores plausibles desde mediciones y de análisis de sensibilidad (García, 2013), para determinar las deposiciones medias, las totales acumuladas, e incrementos en las cotas de fondo de las celdas. El modelo también ha sido aplicado para predecir el comportamiento del sistema frente a crecidas extraordinarias (García et al., 2013a,b; García et al., 2015).

Las condiciones iniciales son alturas de agua en las celdas. Las condiciones de borde aguas arriba son hidrogramas de entrada. En el contorno aguas abajo se imponen leyes altura-caudal. Las condiciones iniciales para el módulo sedimentológico son los niveles de agua y caudales (de las simulaciones hidrodinámicas), y las concentraciones de sedimentos suspendidos iniciales en cada celda, y el concentrograma entrante aguas arriba en el dominio.

ESTUDIO DE REGISTROS DE CAUDALES AGUAS ARRIBA

Para las simulaciones hidrodinámicas y sedimentológicas, los registros de alturas y caudales son fundamentales a la hora de generar las entradas a los modelos, así como para la evaluación de resultados. La recopilación de estas variables es una tarea que por lo general resulta laboriosa, de difícil alcance y en ocasiones la información obtenida termina siendo fragmentada. Desde principio de este decenio, la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (SSRH) comenzó a publicar en su página web los registros de caudales y alturas de agua (entre los parámetros más destacados) de las principales estaciones sobre los ríos del país. Este hecho resulta particularmente importante para poder trabajar con los registros en conjunto y analizar las variables que atañen al flujo de agua en grandes áreas, y así poder relacionar los registros de cursos de agua con sus tributarios. A medida que pasa el tiempo, la SSRH sigue incorporando más estaciones de registros y amplía las series publicadas. Todos los registros de alturas, caudales líquidos y sólidos aquí considerados fueron obtenidos de la página de la Base de Datos Hidrológica Integrada de la SSRH.

A partir de esta disponibilidad se procede a realizar un análisis de datos de aquellas estaciones que están involucradas en los aportes líquidos del área en estudio por un lado, y por otro las que atañen al ingreso sólido. En este trabajo se realiza el estudio para poder generar las entradas sobre el cauce principal en Diamante y en el sistema Coronda, y así obtener hidrogramas de ingreso no vinculados entre sí, ni con los registros de PSM (como eran considerados en las aplicaciones anteriores, García et al., 2012; García, 2013; García et al., 2013a,b; García et al., 2015), pasando éstos a conformar un punto de control más representativo de la performance del modelo.

INGRESO DE CAUDALES LÍQUIDOS

Los caudales que ingresan al área en estudio provienen inmediatamente del tramo Paraná Medio, y de aportes menores de los cursos de agua afluentes. El principal aporte líquido es a través del cauce principal del sistema cauce-planicie. Los registros de caudales medios diarios publicados, aguas arriba del sector estudiado, son de las estaciones que se indican en la Tabla 1 (Figura 3a), donde las 4 primeras pueden ubicarse en una transecta Santa Fe-Paraná (SF-P).

Tabla 1.- Estaciones de registro de caudales medios diarios estudiadas (publicadas por la SSRH).

Estación	Ubicación	Período publicado (al momento de realizar el estudio)
Paraná - Túnel Subfluvial – Estación 3050	sobre el cauce principal	25/01/1904 - 31/08/2016
Colastiné – Ruta Nacional N°168 – Estación 3249	sobre uno de los cursos de agua secundarios más importantes sobre la planicie aluvial	25/08/1903 - 31/08/2016
Sistema Setúbal – La Guardia – Estación 3339	sobre la laguna Setúbal	01/01/1905 - 31/08/2015
Salado – Ruta Provincial N°70 – Estación 3216	sobre el río Salado, afluente del río Coronda, donde finalmente tributa al Paraná	01/01/1954 - 31/08/2015
Corrientes – Estación 3805	sobre el cauce principal, a orillas de la localidad homónima. Aquí todo el volumen de agua del río fluye por el cauce principal, contabilizándose en esta sección todo el caudal circulante	01/01/1904 - 31/08/2015

La suma de los registros indicados en la transecta SF-P es parte de los aportes principales de ingreso en el dominio en estudio. Los caudales registrados en las estaciones de Túnel, Colastiné y Setúbal parecieran cubrir a priori la mayoría de los aportes encauzados del sistema, quedando sin registrar el flujo de desborde por la planicie que podría ocasionarse frente a crecidas. Los caudales del río Salado aportan directamente al sistema Coronda. Para el período que nos atañe (Septiembre 2010 – Agosto 2015), se han compilado los registros de los caudales medios diarios informados por la SSRH. Para el mismo, se evaluó que la suma de los caudales en Túnel+Colastiné+Setúbal (no toma en cuenta el flujo sobre la planicie, que queda sin registro), de 2.93×10^6 hm³, represente aproximadamente el flujo que ingresa al área de estudio, comparándola con los volúmenes que se contabilizan en la sección de Corrientes, de 2.96×10^6 hm³, resultando muy similares (diferencia <0.88%).

Para conformar los hidrogramas de entrada al modelo, se establecen hipótesis de distribución de caudales a partir de los registros en la transecta SF-P. De la visualización del sistema en las imágenes Google Earth® (Figura 3c), puede suponerse: que los caudales registrados en Túnel fluyen solo por el cauce principal, aportando directamente al hidrograma de ingreso en Diamante; y que los caudales de la sección Colastiné tributan tanto al cauce principal, como al Coronda en presencia de crecidas, donde los aportes a este sistema lagunar aumentan considerablemente (llegan a ser similares a los que circulan por el cauce principal, y las alturas entre Coronda y Diamante tienden a igualarse, Garcia, 2013).

El volumen registrado en Setúbal, llega a una bifurcación aguas abajo (en Alto Verde), donde se presenta el canal de acceso al Puerto de Santa Fe sobre la izquierda, y a la derecha son los inicios del río Coronda, donde 3 km aguas abajo desemboca el río Salado. En este estudio no se contó con información de secciones de ambos ramales, pero a priori la sección del canal de acceso al puerto se supone de mayor importancia que la del inicio del Coronda, y debe contar con un dragado habitual de mantenimiento para su funcionamiento. Por lo tanto, no hay una distribución definida entre lo que se aporta al sistema Coronda y al cauce principal.

a)



b)



c)



Figura 3.- Ubicación de las estaciones de registro en estudio: a) en la transecta Santa Fe-Paraná, b) en la zona de Confluencia: ríos Bermejo, Paraguay y Alto Paraná; y sobre Paraná Medio, c) Imagen Google Earth® de la transecta SF-P y sector aguas abajo, aguas arriba de la zona en estudio.

Teniendo en cuenta lo indicado, se plantearon 15 hipótesis de distribuciones de caudales, maximizando y minimizando los aportes en ambos ingresos. Dentro de las principales hipótesis evaluadas, se citan:

- Hip. 01: Ingreso por Diamante: Túnel + Colastiné. Ingreso por Coronda: Setúbal + Salado.
- Hip. 02: Ingreso por Diamante: Túnel. Ingreso por Coronda: Colastiné + Setúbal + Salado.
- Hip. 08: Ingreso por Diamante: Túnel + Colastiné + 2/3 Setúbal. Ingreso por Coronda: 1/3

Setúbal + Salado.

- Hip. 14: Ingreso por Diamante: Túnel + Colastiné + 4/5 Setúbal; e ingreso por Coronda: 1/5 Setúbal + Salado, si $Q_{\text{sumaSF-P}} < 22000 \text{ m}^3/\text{s}$; cuando $Q_{\text{sumaSF-P}} > 22000 \text{ m}^3/\text{s}$, varían proporcionalmente, hasta que $Q_{\text{sumaSF-P}}$ llega a su máximo, quedando: ingreso por Diamante: Túnel; e ingreso por Coronda: Colastiné + Setúbal + Salado. Esta variación se supuso debido a que cuando se incrementan los caudales, hay desborde y flujo circulando por el valle, que se incrementa paulatinamente, y el caudal que fluye por el cauce principal llegaría a una capacidad máxima, derivando los excedentes a la planicie de inundación.

Para cada una se han realizado las simulaciones hidrodinámicas. Se evalúan los resultados comparándolos con los registros limnimétricos en las 7 estaciones del dominio (Figura 1a), y los caudales en PSM. Se adopta aquella hipótesis de distribución de caudales que brinde mejores resultados en los coeficientes NS. En paralelo, se realizó la corrida hidrodinámica para el mismo período temporal, pero con los ingresos de caudales considerados en las aplicaciones anteriores (generados desde los registros en PSM). En la Figura 7 se presentan estos hidrogramas, junto a los de los ingresos de las principales hipótesis planteadas.

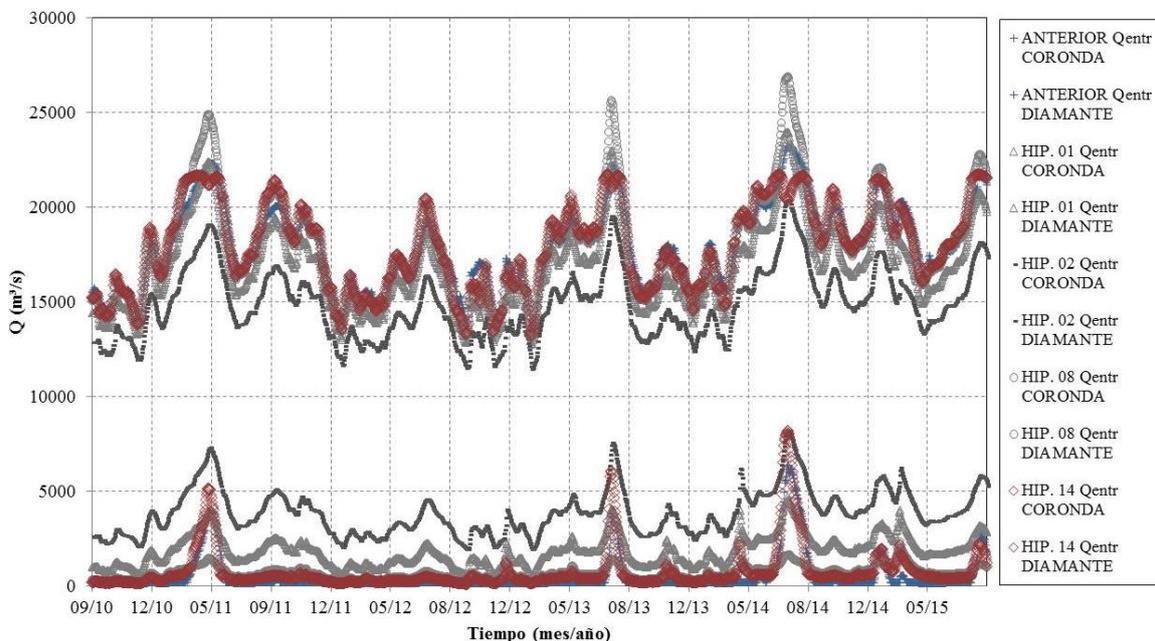


Figura 7.- Comparación de hidrogramas de ingreso de caudales en Diamante y sistema Coronda, los considerados anteriormente en las aplicaciones y los planteados en las hipótesis principales.

INGRESO DE CAUDALES SÓLIDOS

Para llegar a elaborar un concentrograma de ingreso al modelo sobre el cauce principal, se comienza con el análisis de los sólidos desde aguas arriba. En la zona de Confluencia, sobre el km 1240 de la vía navegable del río Paraná, descarga sus aguas el río Paraguay, sobre el cual, 90 km aguas arriba, tiene su descarga el río Bermejo (fuente principal de los sólidos en suspensión). Se contabilizan los sólidos provenientes de las tres fuentes de aporte: del río Paraguay aguas arriba de la afluencia del Bermejo, los de éste río, y los del Alto Paraná. Los registros utilizados de aforos sólidos (finos) y caudales líquidos, son de las estaciones indicadas en la Tabla 2 (Figura 3b).

Tabla 2.- Estaciones de registro de aforos sólidos (finos) y caudales líquidos estudiadas (publicadas por la SSRH).

Estación	Ubicación	Período publicado (al realizar el estudio)
Río Bermejo – El Colorado – Estación 2602	en el río Bermejo, a 194 km aguas arriba de su desembocadura al río Paraguay, y a 925 km del borde aguas arriba del área modelada	03/11/1993 - 24/06/2016
Río Paraguay – Puerto Pilcomayo – Estación 2606	en el río Paraguay, sobre la localidad homónima (provincia de Formosa), sobre la margen derecha de dicho río en el km 375.5, frente a Asunción del Paraguay. Se ubica aguas arriba de la desembocadura del río Bermejo.	30/09/1993 - 21/06/2016
Río Paraguay – Puerto Formosa – Estación 2608 (estación de aforo de reciente aparición)	en el río Paraguay, sobre la localidad homónima (provincia de Formosa), sobre la margen derecha de dicho río en el km 207.5. Se encuentra aguas arriba de la desembocadura del río Bermejo.	30/07/2009 - 20/06/2016
Río Paraguay – Puerto Bermejo – Estación 2401 (estación de aforo de muy reciente aparición)	en el río Paraguay, sobre la localidad homónima (Chaco, Argentina), sobre la margen derecha de dicho río en el km 65. Se ubica próxima a la desembocadura del río Bermejo, a 16 km aguas abajo de la misma.	15/09/2015 - 20/06/2016
Paraná – Posadas (Itacuí) – Estación 3402 (estación actualmente inactiva, los registros son hasta el 2008)	aguas arriba de la localidad homónima (provincia de Misiones), en el Alto Paraná, sobre el cauce principal del río, en el km 1583 de la vía navegable, a 343 km aguas arriba de la desembocadura del río Paraguay en el Paraná.	15/09/1993 - 03/01/2008
Paraná – Itati – Estación 3862	a orillas de la localidad homónima (provincia de Corrientes), en el Alto Paraná, sobre el cauce principal del río, a 38 km aproximadamente aguas arriba de la desembocadura del río Paraguay en el Paraná.	24/11/1993 - 02/06/2016
Paraná - Corrientes – Estación 3805 (esta estación no cuenta con registros de caudales de sólidos finos)	situada a orillas de la localidad homónima (provincia de Corrientes), en el comienzo del Paraná Medio, ubicada sobre el cauce principal del río, en el km 1208 de la vía navegable, a 32 km aproximadamente aguas abajo de la desembocadura del río Paraguay en el Paraná.	01/01/1904 - 31/08/2015 (caudales medios diarios)
Paraná - Empedrado – Estación 3885 (estación de aforo de reciente aparición)	a orillas de la localidad homónima (provincia de Corrientes), en el Paraná Medio, ubicada sobre el cauce principal del río, en el km 1140 de la vía navegable.	18/02/2011 - 02/06/2016
Paraná - Túnel Subfluvial – Estación 3050	a orillas de la localidad homónima (pcia. de Entre Ríos), en el Paraná Medio, sobre la margen izquierda del río, sobre el cauce principal, en el km 584 de la vía navegable, a 38 km aguas arriba del ingreso al modelo.	27/09/1993 - 24/06/2016

En las aplicaciones anteriores (García et al., 2013b), el aporte sólido del río Bermejo se obtenía de la relación entre caudales sólidos y líquidos dada por Re et al. (2009), para la estación El Colorado. Al disponer actualmente de un mayor número de aforos (casi se duplica la cantidad), se actualiza la relación, quedando conformada como se muestra en la Figura 9.

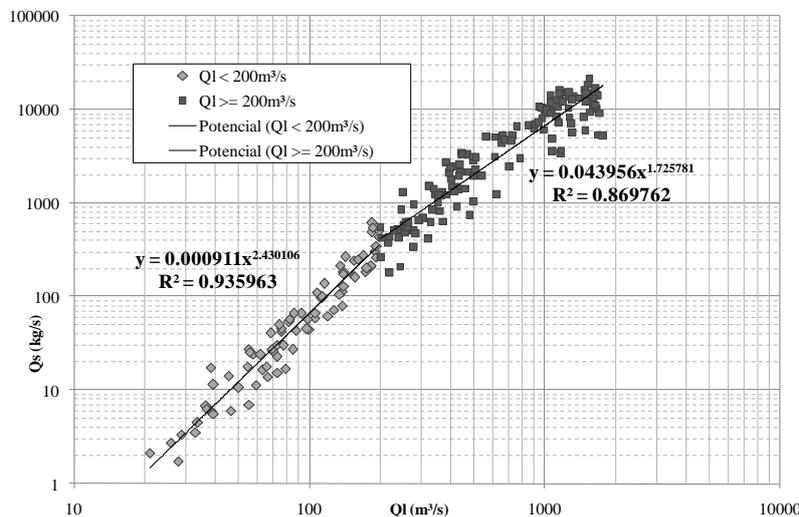


Figura 9.- Relación entre caudales sólidos y líquidos - estación El Colorado - río Bermejo. Período: 03/11/1993-24/06/2016.

Al disponer actualmente de aforos sólidos publicados para el Alto Paraná y el río Paraguay, se efectúa una valoración ajustada de cada carga sólida anual (Gw). De las tres estaciones indicadas del río Paraguay y las dos del Alto Paraná, se compilieron los registros de caudales de sólidos finos, y se presentan en las Figuras 10 y 11 respectivamente. En los registros de Puerto Pilcomayo, hay un cambio en los aforos: el caudal sólido (Q_s) promedio diario para el período completo es de 88.69 kg/s, pero desde el año 2000, el promedio da 65.56 kg/s, siendo

notoria la disminución, y la carga anual es de 2.07×10^6 t/año. Los registros de Puerto Formosa dan un Q_s promedio diario de 65.37 kg/s, similar al de la estación aguas arriba; y Gw de 2.06×10^6 t/año. Los registros de Puerto Bermejo, de escasa cantidad (ocho) y aparición reciente (Septiembre 2015), se presentan a nivel indicativo, ya que cuentan con el aporte del río Bermejo (que aquí se contabilizan aparte). El Q_s promedio obtenido es de 142.94 kg/s, lógicamente mayor a los anteriores. Ésta estación cobrará importancia con el tiempo, al contar con más registros. Se adopta el valor global anual de Puerto Formosa, por ser la estación ubicada aguas abajo sobre el río Paraguay, más cercana a la confluencia sin contar con los sólidos provenientes del Bermejo. El Gw se distribuye uniformemente en el año.

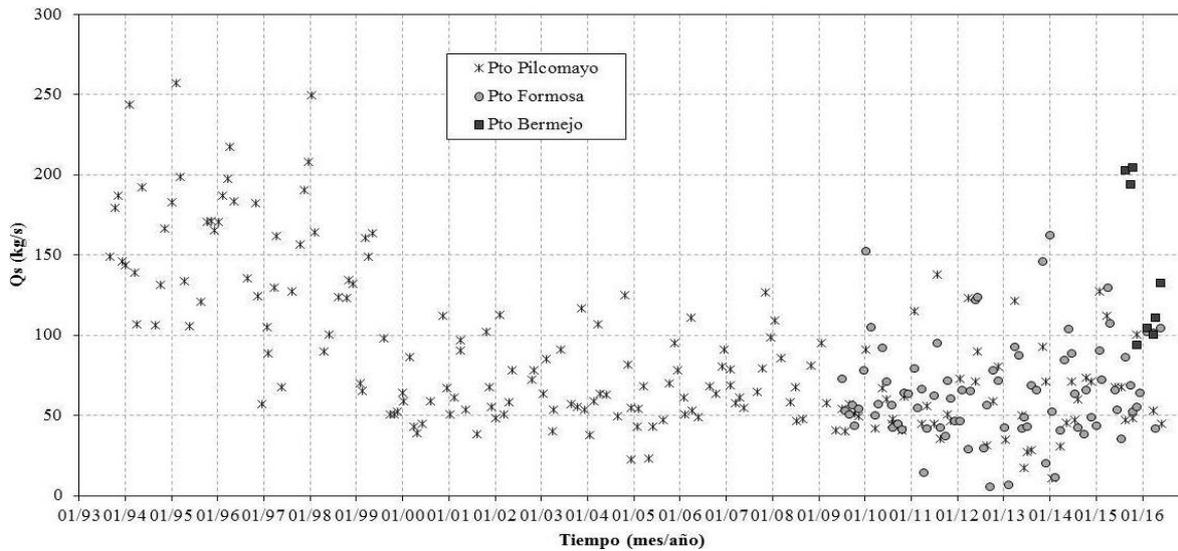


Figura 10.- Registros de aforos sólidos para Puerto Pilcomayo, Puerto Formosa y Puerto Bermejo, sobre el río Paraguay.

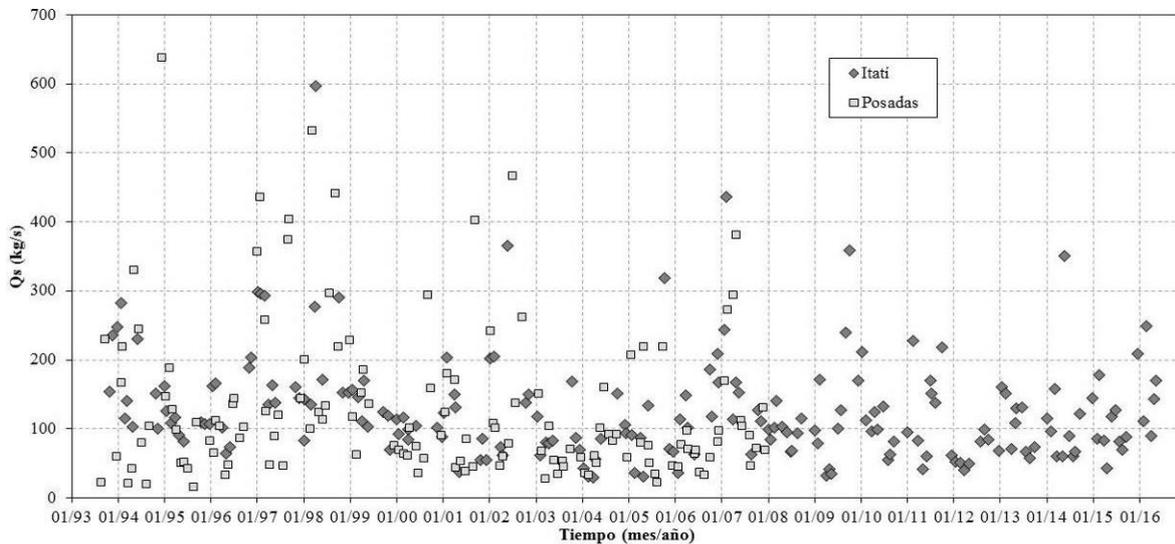


Figura 11.- Registros de aforos sólidos publicados por la SSRH para las estaciones Posadas e Itatí, sobre el río Alto Paraná.

En el Alto Paraná, la estación Posadas está inactiva desde el 2008, por la elevación de la cota del embalse de la represa Yacyretá. Los registros (indicativos), dan un Q_s promedio de 130.19 kg/s, y la carga anual estimada es de 4.11×10^6 t/año. Los registros de la estación Itatí dan un Q_s promedio de 127.28 kg/s, similar al de la estación aguas arriba y lógicamente algo menor; y una Gw de 4.01×10^6 t/año. Se adopta el valor global anual de Itatí, por ser la más cercana a la zona de Confluencia y actualmente activa. El Gw estimado para el Alto Paraná se considera

distribuido uniformemente en el año (127.28 kg/s).

Si se comparan los valores anuales adoptados con los considerados en las aplicaciones anteriores (de Alarcón et al., 2003, se extraían 4.5×10^6 t/año para Alto Paraná y 5.0×10^6 t/año para el río Paraguay, Garcia et al., 2013b), podremos ver que son menores. Esto puede ser debido a que en este período las cargas sólidas pudieron llegar a ser menores, por disminuir las contribuciones de las fuentes. Así, se sumaron temporalmente los tres aportes (río Bermejo, río Paraguay y Alto Paraná) de sólidos finos. Se utilizan los caudales medios diarios informados para la estación Corrientes (donde se contabiliza todo el flujo de agua), y con la carga sólida calculada, se determinan las concentraciones C_w al inicio del Paraná Medio.

A 100 km aguas abajo de Confluencia, se localiza la estación Empedrado, relativamente cercana, donde hay publicados aforos sólidos desde el año 2011. Se determinan las concentraciones C_w para este lugar y se los compara con las calculadas para la confluencia, contrastando si la metodología que se está siguiendo es adecuada. En la Figura 12 se pueden ver que los C_w tienen un ajuste aceptable, teniendo en cuenta que aún en Empedrado hay afectación de la longitud de mezcla de sedimentos (desde el ingreso de finos, provenientes del Bermejo, al Paraná), y en las primeras mediciones (en el 2011) puede haber dispersión. Sobre Junio-Julio-Agosto de 2013 hay registros que indican una elevada concentración (las mayores de la serie), que no parecen ser acordes al resto de los valores, y tampoco se condicen con lo que sucede en ese período en el río Bermejo, que es el aporte principal de los sólidos finos.

A la carga sólida generada en la zona de confluencia, se considera una pérdida del 17% por atrape de sólidos que se produciría en la planicie del Paraná Medio (estimado de lo presentado en Alarcón et al., 2003, concordantes con lo computado para el Paraná Inferior en Garcia, 2013). Así, se calculan los caudales sólidos en el borde aguas arriba del modelo, y con los caudales líquidos considerados, se elabora el concentrograma de la carga de lavado. El mismo tiene una C_w promedio diaria de 108.15 mg/l, máximo de 729.21 mg/l y mínimo de 7.90 mg/l, valor excesivamente bajo, considerando que usualmente es del orden de los 60 a 80 mg/l (Drago y Amsler, 1988; Serman y asociados S. A., 1999; Alarcón et al., 2003; Sarubbi, 2007). Los valores máximos usuales son hasta 900 mg/l (Bertoldi de Pomar, 1984; Sarubbi, 2007), indicando que el valor máximo calculado es acorde. Se realiza un ajuste sobre el valor mínimo, con las C_w que surgen de los aforos en la sección del Túnel (se calculan con los registros de sólidos finos y caudales líquidos, para el período a evaluar). Los resultados dan un mínimo de 37.62 mg/l, y máximo de 1166.96 mg/l, siendo la concentración promedio de 144.82 mg/l (carga sólida promedio de 2177.65 kg/s). Para tener en cuenta un mínimo general y ajustar el concentrograma, se adopta el percentil 30 de la muestra, para el período en estudio, que resulta de 57.47 mg/l. El concentrograma reelaborado resultante tiene un promedio diario de 133.92 mg/l, el máximo se mantiene en 729.21 mg/l y el mínimo de 57.47 mg/l; la carga sólida promedio diaria es de 2378.16 kg/s, similar al valor indicado para el Túnel. La carga sólida media anual es de 75.00×10^6 t/año. En distintos trabajos se encuentran valores de transporte anual de cargas de lavado de 67 a 145×10^6 t/año para este tramo (Alarcón et al., 2003; Amsler et al., 2007; Sarubbi, 2007), y siendo el calculado de 75×10^6 t/año, se concluye que la carga sólida en este período es relativamente baja.

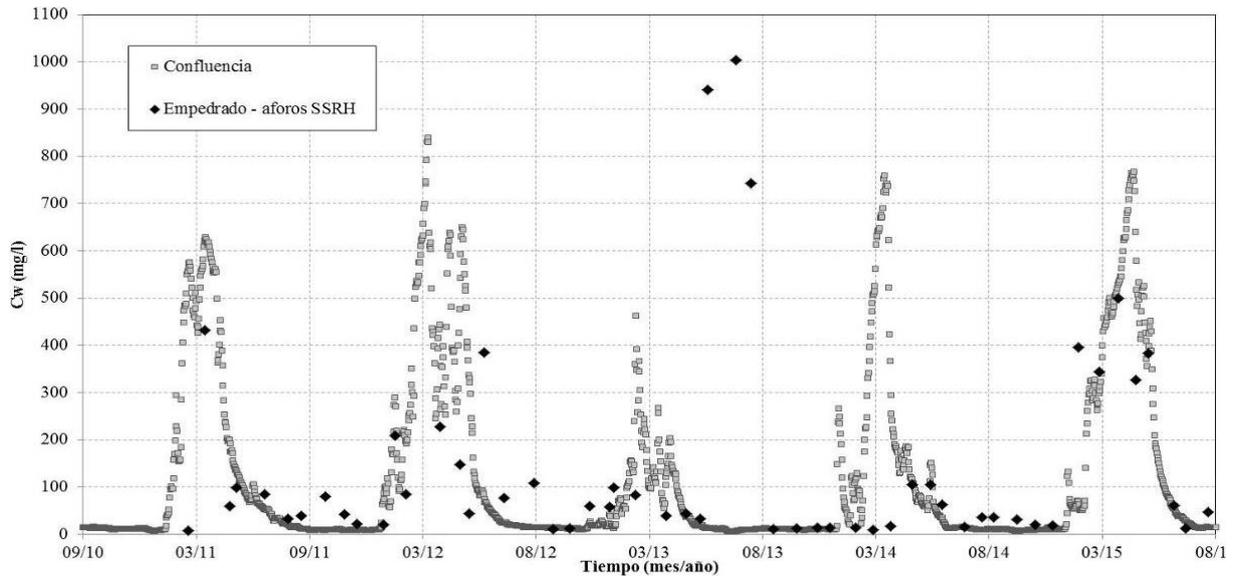


Figura 12.- Comparación de concentraciones de sólidos finos, calculadas para la confluencia del río Paraná y Paraguay, y las que surgen de los aforos publicados por la SSRH para la estación Empedrado, sobre el río Paraná.

Para validar el sedimentograma elaborado para el cauce principal, se lo contrasta con las concentraciones de finos que surgen de los aforos para la estación Túnel (Figura 13). Ésta es la más cercana, encontrándose a 38 km aguas arriba del borde del modelo. La Figura 13 muestra que se logra una buena concordancia entre el concentrograma y los valores desde los aforos, con excepción de uno puntual en Mayo de 2011, que parece discordante con los registros del río Bermejo, además resulta excesivo para los máximos usuales. Más allá de esto, se aprecia en la comparación que se reproducen bien las características generales de la variación de C_w , en especial las más relevantes, como la forma, tiempo al pico, concentración promedio, rama de ascenso/descenso y magnitud total anual del aporte sólido.

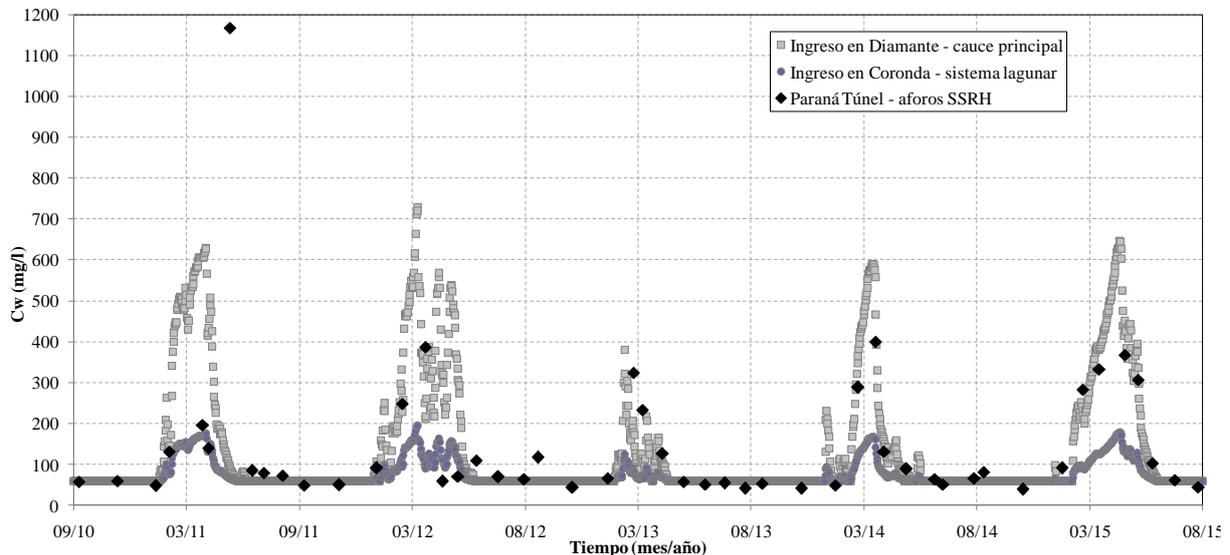


Figura 13.- Concentrogramas elaborados de ingreso sólido al modelo, sobre el cauce principal, y sobre el sistema Coronda. Comparación con concentraciones desde aforos publicados por la SSRH para la estación Túnel Subfluvial (río Paraná).

Para la entrada de sedimentos en el sistema Coronda, al no contar con aforos sistemáticos específicos en el lugar o cercanías, y al ser escasas las mediciones (se registran 11 en 1971-1972 en Amsler et al., 2007), se elaboró un concentrograma a partir del generado para

Diamante. Se considera la misma forma, se toma el mismo valor mínimo (57.47 mg/l) y se tiene en cuenta los registros máximos de 195 mg/l, presentado en Amsler et al. (2007) para dicha zona, y se confecciona el concentrograma proporcional al elaborado en Diamante (Figura 13). La concentración promedio resulta de 73.12 mg/l, y el transporte de sedimentos medio anual es de 1.71×10^6 t/año. En Amsler et al. (2007) se estipula que el Gw se encuentra dentro del rango de 4.7 a 8.6×10^6 t/año, entonces el valor anterior obtenido para el período evaluado indicaría muy bajos aportes sólidos al sistema. Los concentrogramas de la Figura 13 son los ingresos sólidos al sistema, para realizar las simulaciones sedimentológicas. Se aplica el modelo FLUSED sobre los resultados de la simulación hidrodinámica.

RESULTADOS

En la Tabla 1 se presentan los coeficientes NS resultantes de las simulaciones hidrodinámicas (Septiembre 2010 a Agosto 2015), para las principales hipótesis evaluadas (las que mejores resultados obtuvieron) y para las entradas de caudales anteriores. Los resultados para esta última son satisfactorios, con buenos valores en las estaciones de PSM, Rosario y SN, y de menor calificación en Diamante y Victoria. Es decir, el modelo con los ingresos anteriores tiene un buen desempeño para la reproducción de la hidrodinámica a gran escala.

Tabla 1.- Coeficientes de Nash-Sutcliffe (NS), para la evaluación de diferentes hidrogramas de caudales líquido de ingreso.

Estación hidrométrica	Ingresos anterior.	Hipótesis 01	Hipótesis 02	Hipótesis 08	Hipótesis 14
Diamante	0.58	0.73	0.85	0.63	0.59
Puerto San Martín (PSM)	0.95	0.92	0.92	0.92	0.92
Rosario	0.85	0.90	0.90	0.89	0.90
San Nicolás (SN)	0.83	0.87	0.87	0.86	0.86
Victoria	0.44	0.53	0.48	0.55	0.56
Coronda	0.61	0.09	-0.29	0.48	0.58
Puerto Gaboto	0.75	0.59	0.57	0.61	0.61
QPSM	0.88	0.88	0.86	0.89	0.89

Nota: los sombreados grises remarcan los mejores valores obtenidos para cada estación dentro de las hipótesis planteadas, y los subrayados resaltan mejores ajustes obtenidos en los ingresos planteados en las aplicaciones anteriores.

Los resultados de las simulaciones para las entradas independizadas de los registros internos del modelo, son tan buenos como los de los ingresos anteriores. En todas las hipótesis los resultados de caudales en PSM dan muy buen ajuste, valores superiores a 0.85. Los mejores coeficientes NS los da la Hipótesis 14, que se adopta para considerar los hidrogramas ingresantes al modelo. Los ajustes alcanzados son satisfactorios, las estaciones de Diamante, Victoria, Coronda y Puerto Gaboto tienen un desempeño aceptable, con NS superiores a 0.55, y en PSM, Rosario y SN los ajustes son muy buenos con coeficientes superiores a 0.85. Los coeficientes NS logrados reflejan la alta correlación entre las observaciones y las modelaciones. Los errores porcentuales promedio entre limnigramas calculados y observados son menores del 6.5%, y entre el hidrograma en PSM calculado y observado es del 4.1%.

Los resultados de las simulaciones sedimentológicas se presentan en la Tabla 1. Las deposiciones anuales promedio sobre todo el sistema cauce-planicie son acordes a porcentajes usuales (de 5 a 21% para caudales medios en grandes ríos de llanura, García, 2013. En el valle se depositó entre el 21% a 43% de los sedimentos que retiene el tramo, evidenciando su rol preponderante de almacenador, que generan incrementos en las cotas de fondo que varían de 0.32 a 0.41 mm/año. Sobre el cauce principal no se contabilizan deposiciones. En la Figura 17 se presenta la distribución espacial de las deposiciones. Los mayores depósitos se observan

en las celdas de las principales lagunas (Grande y Coronda), donde las velocidades disminuyen considerablemente, y donde se ensancha la planicie de inundación.

Tabla 1.- Resultados de simulaciones sedimentológicas (se informan rangos de valores, ya que se considera un rango de w_s).

Resultados	Sept. 2010–Ago. 2015	Promedio anual
Sólidos suspendidos ingr. [$\times 10^6$ t]	383.7	76.7
Depósitos anuales [$\times 10^6$ t] en el dominio	51.0 – 80.4	10.2 – 16.1
Retención sólidos en dominio [%]	13.3 – 20.9	
Depósitos anuales [$\times 10^6$ t] en la Planicie	17.1 – 21.9	3.4 – 4.4
Retención sólidos en Planicie [%]	4.5 – 5.7	
Aumento en cotas de fondo [mm] sobre la Planicie	1.6 – 2.0	0.32 – 0.41

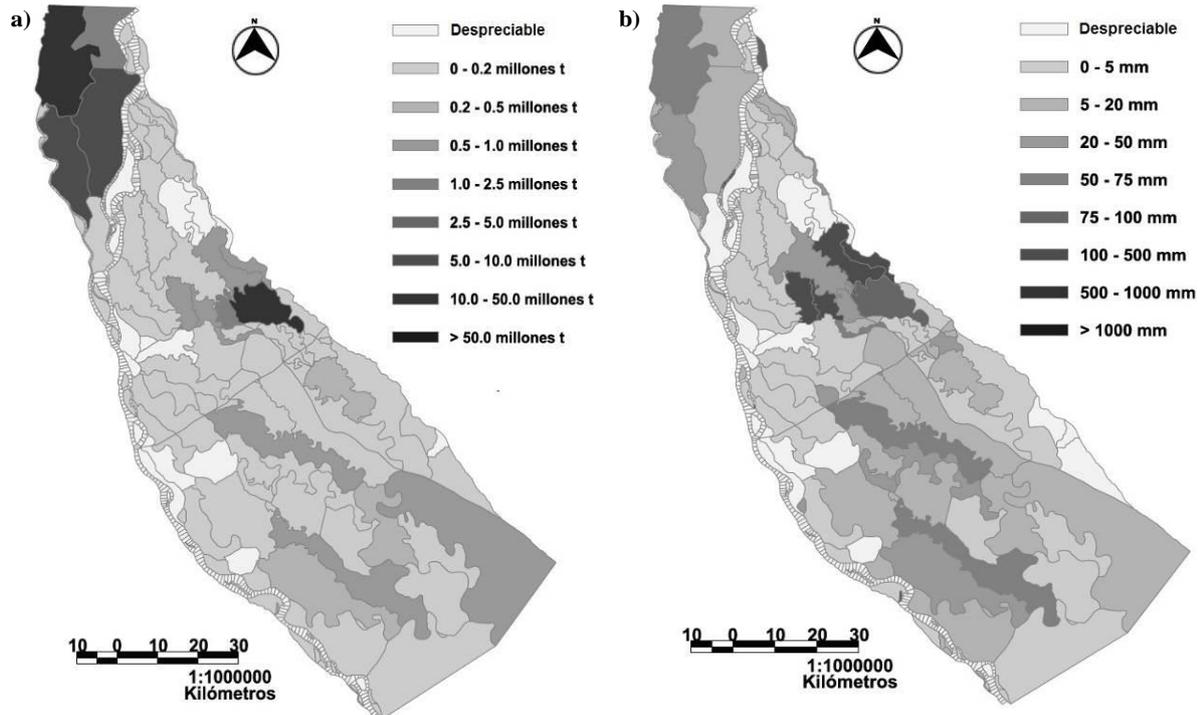


Figura 17.- Distribución espacial de deposiciones para el período Septiembre 2010 – Agosto 2015 ($w_s = 0.0001$ m/s): a) depósitos totales en las celdas del dominio, b) variaciones de la cota de fondo, ponderadas con áreas anegadas.

CONCLUSIONES

A partir del modelo constituido sobre el Paraná Inferior, se evaluó el comportamiento hidro-sedimentológico del sistema cauce-planicie para el período Septiembre 2010 a Agosto 2015. Los resultados para la hipótesis de distribución de caudales de mejor ajuste, indican un desempeño muy bueno del modelo, con NS elevados para las estaciones de registro sobre el cauce principal, y aceptables para el resto. Los hidrogramas de ingreso al modelo generados a partir de los registros de la SSRH, constituyen un gran avance en la determinación de una posible distribución de caudales desde el Paraná Medio hacia el Paraná Inferior, dentro de tan compleja estructura cauce-planicie. Para las simulaciones sedimentológicas, se generaron los caudales sólidos de ingreso a partir de los registros de las fuentes de aporte preponderantes, propagado hasta el tramo en estudio, y contrastado con aforos sólidos de estaciones cercanas.

Los sólidos ingresantes en el dominio resultaron de un promedio anual que puede clasificarse como escaso, en comparación con los valores usuales, también las cantidades de depósitos en

la planicie resultan bajas. Esto es acorde a que en este período no hubo crecidas importantes (los máximos caudales por el cauce principal fueron menores a 25000 m³/s, lo cual no produce desbordes significativos sobre los albardones hacia el valle de inundación). A su vez, en todo el período los caudales superaron los 13000 m³/s, puede indicarse que estos cinco años fueron de caudales medios. Por lo tanto, el ingreso de flujo al valle fue principalmente por los cursos secundarios, flujo encauzado, alimentando a las depresiones interiores de la planicie, y en menor medida se presentó flujo por desborde, que provocaría mayores deposiciones. Es decir, no hubo grandes cantidades de agua en el valle, sumado a un período de escasos aportes sólidos, que generó deposiciones menores en el valle.

Agradecimiento. Este trabajo fue desarrollado en el marco de los proyectos de investigación PID ING 514 e ING 509 de la Universidad Nacional de Rosario, Argentina.

LISTA DE SÍMBOLOS

CF: conexión física Rosario-Victoria
 C_w: concentración de la carga de lavado [m³/m³]
 G_w: transporte total anual de carga de lavado
 NS: coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe
 P_d: probabilidad de deposición
 PSM: Puerto San Martín
 Q ó Q_l: caudal líquido [m³/s]
 Q_s: caudal de sólidos finos o carga de sedimentos finos [kg/s]
 SF-P: transecta Santa Fe-Paraná
 SN: San Nicolás
 SSRH: Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación
 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]

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, N.York. Vol.I, pp. 123-14.

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.

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.

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.

García, M.L. (2013). “*Modelación de Procesos Hidrodinámicos y Sedimentológicos en Planicies de Inundación de Grandes Ríos de Llanura*”. Tesis Doctoral, FCEIyA, UNR, Rosario, Argentina, 424 p.

García, 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*, INA, Ezeiza, Argentina, 15 p.

García, M.L.; Basile, P.A. y Riccardi, G.A. (2013a). “Modelación Hidrodinámica de Crecidas Extraordinarias en Sistema Cauce-Planicie del Río Paraná Inferior”. *Sexto Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos*. Santa Fe, Argentina.

García, M.L.; Basile, P.A. y Riccardi, G.A. (2013b). “Modelación Sedimentológica en Sistema Cauce-Planicie del Río Paraná Inferior”. *Sexto Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos*. Santa Fe, Argentina. E-Book ISBN 978-987-657-900-1. 1ª Ed. FICH-UNL.

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.

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*.

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, FCEyN, 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 – Pcias. de Santa Fe y Entre Ríos para la obra Conexión Física Rosario-Victoria*. Argentina.

SSRH. *Subsecretaría de Recursos Hídricos*, del Sistema Nacional de Información Hídrica.
Base de Datos Hidrológica Integrada:
<http://www.hidricosargentina.gov.ar/AccesoBDHI.html>.