

Modelación hidrodinámica de sistema cauce-planicie con celdas amorfas, de tramo del río Paraná Inferior

Marina L. Garcia¹, Pedro A. Basile¹ y Gerardo A. Riccardi^{1,2}

¹Dto. Hidráulica y Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales (CURIHAM), Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura (FCEIA), Universidad Nacional de Rosario (UNR), ²Consejo de Investigaciones de la UNR (CIUNR). Riobamba 245 bis, (2000) Rosario, Argentina.

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

RESUMEN: La modelación hidrodinámica de procesos de inundación en valles aluviales constituye la base para el análisis de importantes problemas hidroambientales. Se presenta en este trabajo la implementación y la posterior aplicación de un modelo hidrológico-hidráulico cuasi-2D que permite simular numéricamente los procesos de inundación en sistemas de cauce-planicie en grandes ríos aluviales de llanura. El modelo se basa en un esquema de celdas amorfas interconectadas, que utiliza diferentes simplificaciones de la ecuación de momentum unidimensional para representar las leyes de descarga entre celdas. Las celdas amorfas se adaptan a la configuración planimétrica y topográfica de los diferentes componentes del sistema, como ser el cauce principal, cursos de aguas secundarios, el relieve de la planicie de inundación, bajos y lagunas permanentes, etc. El modelo es particularmente apropiado para la simulación dinámica a grande escala espacial y temporal, y especialmente para flujos con variaciones lentas en el tiempo de caudales y alturas, donde los términos inerciales resultan despreciables, como es el caso en estudio. La aplicación se realiza sobre un tramo del río Paraná Inferior, entre las ciudades de Diamante y Ramallo, a los efectos de reproducir y analizar los procesos hidrodinámicos que se producen en el sistema cauce principal-planicie aluvial y patrones de escurrimiento dentro del valle de inundación, en condiciones de aguas medias y altas del río. Los resultados obtenidos en las etapas de calibración y validación del modelo son ampliamente satisfactorios. Se evalúa además el efecto de la incorporación en el valle de la conexión física Rosario-Victoria, analizándose las modificaciones que se producen aguas arriba, tanto en los niveles máximos de agua como en los tiempos de permanencia dentro del valle.

INTRODUCCIÓN

El estudio de procesos hidrodinámicos en crecidas de grandes ríos de llanura, de conformación tipo cauce-planicie, es importante para evaluar el anegamiento en sus valles, consecuencias y problemas hidroambientales asociados. La modelación hidrodinámica constituye una herramienta muy valiosa a la hora del análisis de estas cuestiones. Por un lado, la modelación permite la evaluación del riesgo de inundaciones (Penning-Roswell *et al.*, 1996), además, los modelos hidrodinámicos que describen apropiadamente los procesos hidráulicos en sistemas cauce-planicie de inundación pueden ser utilizados para representar otros subprocesos, tales como el transporte de sedimentos (Nicholas y Walling, 1997; Asselman y Middelkoop, 1995), el transporte de contaminantes (Feldhaus *et al.*, 1992) y el escurrimiento subterráneo en la planicie (Stewart *et al.*, 1999; Bates *et al.*, 2000). El grado de detalle en la representación de procesos hidráulicos es función del tipo y exactitud de las predicciones requeridas, de la calidad de los datos disponibles para parametrizar el modelo y de las escalas espaciales y temporales en las cuales el modelo debe operar.

En la última década la representación de la dinámica del flujo hídrico en sistemas formados por cauce principal y planicie de inundación ha sido realizada utilizando modelos 1D (Horrit y Bates, 2002; Helmiö, 2002), híbridos 1D-2D (Werner *et al.*, 2005); Cuasi-2D (Bates *et al.*, 2006; Horrit y Bates, 2002); 2D (Nicholas *et al.*, 2006; Horrit y Bates, 2002; Stewart *et al.*, 1999; Nicholas y Walling, 1996) y 3D (Wilson *et al.*, 2006; Nicholas y McLelland, 2004). Estos trabajos han puesto en evidencia la importancia de las características morfológicas, los usos del suelo, la vegetación y las interferencias antrópicas en las planicies de inundación. Los modelos 1D y 2D citados precedentemente fueron aplicados para reproducir mapas de inundación e hidrogramas observados en tramos de ríos de 5-60 Km de longitud, con anchos de planicies de inundación menores que 3 Km y con ausencia de cursos secundarios importantes en el valle aluvial. Mientras que, los modelos hidrodinámicos 3D, dados los requerimientos computacionales y la información necesaria para su implementación, han sido aplicados en dominios espaciales definitivamente menores, es decir, para longitudes de tramos del orden del kilómetro.

Tramos característicos de sistemas cauce-planicie en grandes ríos aluviales de llanura muestran longitudes del orden de centenares de kilómetros, anchos del valle aluvial del orden de las decenas de kilómetros y anchos del cauce principal del orden de algunos kilómetros. El valle aluvial, además, es de una morfología compleja, se encuentra surcado por una densa red de cursos y se observan albardones que involucran distancias considerables a lo largo de la unión cauce-planicie. En estos casos, para simulaciones numéricas a grande escala espacial y temporal, los modelos 1D resultan inapropiados ya que la unidimensionalidad no es representativa del patrón de flujo real. Por otro lado, los modelos 3D, basados en la ecuaciones de Reynolds, acopladas por ejemplo con modelos k- ϵ de cierre de turbulencia, resultan prohibitivos dadas las escalas espaciales y temporales involucradas y los modelos 2D, si bien pueden proveer un nivel de descripción detallado de los procesos hidráulicos involucrados, no resultan adecuados dado que se tornan onerosos computacionalmente.

Una alternativa válida es la utilización de modelos cuasi-2D. Efectivamente, en sistemas de cauce-planicie en grandes ríos aluviales de llanura las crecidas presentan duraciones considerables del orden de meses y se

propagan en forma gradual con celeridades extremadamente bajas. La inundación en la planicie se desarrolla igualmente en forma gradual, produciéndose el llenado paulatino de la misma por desborde del curso principal y de los cursos secundarios que drenan en parte los excedentes del mismo valle. Este mecanismo de funcionamiento hidráulico es compatible con las hipótesis consideradas en la formulación de los modelos hidrodinámicos cuasi-2D (Cunge *et al.*, 1980). En efecto, el modelo cuasi-2D CTSS8 (Riccardi; 1997, 2000) aplicado en un tramo del río Paraná ha mostrado una capacidad de reproducción de perfiles de velocidad transversales comparable a las de los modelos 2D promediados en la vertical (Basile y Riccardi, 2002). La simulación numérica hidráulica del modelo CTSS8 (Riccardi, 2000), se basa en un esquema de celdas amorfas interconectadas, que utiliza diferentes simplificaciones de la ecuación de momentum unidimensional para representar las leyes de descarga entre celdas.

El objetivo principal del presente trabajo es implementar un modelo apropiado para evaluar procesos de inundación, en valles aluviales de grandes ríos de llanura. Se plantea la calibración y validación de los procesos hidráulicos en el curso principal, secundarios y planicie aluvial, y una posterior explotación para evaluación de los impactos de una obra antrópica implantada en la zona. Sucesivamente, se ha desarrollado un módulo de simulación sedimentológica, el cual será acoplado al modelo hidrodinámico y permitirá la representación del transporte y deposición de sedimentos. En este trabajo se presenta la simulación hidrodinámica de un extenso tramo del río Paraná, comprendido entre la ciudad de Diamante (Entre Ríos) y la ciudad de Ramallo (Bs. As.).

DESCRIPCIÓN DEL MODELO CTSS8

El modelo matemático hidrológico-hidráulico, físicamente basado y espacialmente distribuido, CTSS8 (Riccardi, 2000) está basado en los esquemas de celdas originalmente propuestos por Cunge (1975). En sucesivas investigaciones se ha ampliado el campo de aplicación original (Riccardi, 1997 y 2000). Actualmente, el modelo CTSS8 permite la simulación del flujo a superficie libre multidireccional. En cada celda de discretización es posible plantear el ingreso de flujo proveniente de precipitación neta, aporte de caudales externos e intercambio de caudales con celdas adyacentes. La propagación cuasi-2D de caudales se realiza mediante un conjunto de leyes de descarga entre celdas, las cuales han sido derivadas a partir de la ecuación dinámica de Saint Venant. Para considerar condiciones de flujo particulares en aquellas zonas del área en estudio que presentan albardones, terraplenes artificiales, etc., se utilizan leyes de descarga específicas para vertederos. Para más detalles sobre el modelo matemático hidrológico-hidráulico CTSS8 ver en Riccardi (2000).

El sistema de ecuaciones resultante, planteado entre la ecuación de continuidad y las distintas leyes de descarga entre celdas, se resuelve mediante aproximaciones en diferencias finitas, con un esquema numérico de tipo implícito.

La configuración de celdas del sistema es de tipo amorfas –sin forma establecida-, estructurada en diferencias finitas, y las variables de flujo discretas z y Q son escalonadas en el espacio. Los niveles hídricos z se determinan para el baricentro de cada celda utilizando el algoritmo implícito y sucesivamente se calculan los caudales Q en el punto medio de la vinculación establecida, mediante las leyes de descarga correspondientes. Asimismo, a partir de los niveles y caudales, se obtienen otras variables de flujo como profundidad del agua en la celda, área transversal mojada y radio hidráulico entre vinculaciones y velocidad media en el punto medio entre vinculaciones.

La condición de borde aguas arriba son hidrogramas de entrada ($Q-t$). En el contorno aguas abajo se imponen leyes altura-caudal ($H-Q$) en las celdas de salida. Ambas condiciones de borde, independientemente, pueden asimismo configurarse como leyes $H-t$.

Las condiciones iniciales utilizadas fueron alturas de agua en las celdas. Éstas se obtuvieron a partir de su estabilización en corridas previas, en donde se comenzó con alturas iguales a cero en todas las celdas, y con caudales ingresantes aguas arriba de aumento gradual hasta hacerse constante, igual al inicial de los hidrogramas considerados para cada escenario.

Configuración de Celdas Amorfas del Modelo

La distribución espacial de los parámetros y variables hidrológicas se realiza mediante la subdivisión del dominio en estudio en celdas de tipo amorfas –sin forma preestablecida- interconectadas entre sí, que definen el sector del sistema hídrico a modelar. Las celdas pueden ser de tipo “Valle” o tipo “Río”, la diferencia fundamental entre ambos tipos está relacionada con la forma de almacenamiento y conducción del flujo dentro de dicha celda representativa del dominio. De esta forma el sector en estudio resulta constituido en celdas que representan las áreas tributarias a los cursos de agua (celdas Valle) y celdas que constituyen los cursos de agua (celdas Río). La definición de las celdas se realiza siguiendo las áreas que representan, ya sea básicamente de conducción o de almacenamiento, siguiendo en general el siguiente criterio: curso principal del río, río tributario, cursos interiores a la planicie, canales, todos de tipo Río; islas del cauce y resto de la planicie (ya sean distintas partes del relieve del valle que quedan entre los cursos, depresiones, lagunas, etc.) de tipo Valle. Cada celda queda vinculada a tantas otras –del tipo que sea- como así se precise.

En el modelo conceptual utilizado por el modelo hidráulico CTSS8 (Riccardi, 2000), las celdas valle tienen una geometría de conducción de tipo rectangular. La sección transversal efectiva de conducción es representada por un ancho promedio establecido para cada celda y su correspondiente altura de agua, con lo que se define para cada una función área transversal mojada. Para el almacenamiento de cada celda Valle, se lo define también en función de la altura de agua presente en la misma, hasta el área en planta total que ésta ocupa, variando el volumen con una función almacenamiento hipotética propuesta ad hoc.

Para las celdas Río, el modelo tiene similar adopción de secciones que para las de tipo Valle, rectangular. Cada una de ellas fue definida teniendo en cuenta el sentido de escurrimiento del curso, tratando de abarcar el ancho

completo del mismo, y de longitud acotada en función del tipo de curso del que se trate, ya que se considera que la pendiente del pelo de agua se mantiene constante dentro de la celda, y se trata de no introducir grandes errores en la agregación de las mismas. De esta forma se ha considerado, para el cauce principal una longitud máxima de 1000 m, atendiendo a las singularidades que éste presente, y para los cursos secundarios y tributarios, una longitud máxima de 2000 m. Deben definirse las dimensiones geométricas del curso, para lo cual se establece un ancho promedio en cada celda y la resistencia al escurrimiento, con lo cual se conforman, en las vinculaciones de tipo río simple, una función de conducción que involucra estos parámetros entre las celdas vinculadas en función de la altura de agua presente. De forma similar a las celdas Valle, también se conforman funciones de la sección transversal de conducción y del almacenamiento, que dependen de las alturas de agua. Para las celdas Río del cauce principal, a partir de determinada altura de agua, se ha considerado una disminución del coeficiente de rugosidad, para tener en cuenta la dependencia de éste del tirante, especialmente al producirse grandes crecientes, donde el mismo disminuye.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

El área en estudio se limitó a la comprendida por el cauce principal y valle de inundación del río Paraná, desde la ciudad de Diamante (km 533 de la vía navegable) en el extremo aguas arriba hasta la ciudad de Ramallo (km 325 de la vía navegable) en el extremo aguas abajo. La longitud aproximada del tramo modelado es de 200 km. El área total aproximada de modelación es de 8000 km². En la Figura 1 se puede visualizar el área en estudio y los cursos de agua principales dentro del dominio, junto a un mosaico de imágenes satelitales, que corresponde al 18 y 25/01/03, nivel hidrométrico en Rosario de 4.18 m (referido al cero local de la escala hidrométrica).

A partir de Diamante el cauce principal del río Paraná cruza todo el valle y se recuesta sobre la margen santafesina a la altura de las ciudades de Maciel y Oliveros. A partir de esa zona el valle aluvial se desarrolla sobre la margen izquierda del río y el ancho del mismo varía entre 40-60 km, mientras que, el ancho del cauce principal varía entre 0,5-3 km aproximadamente.

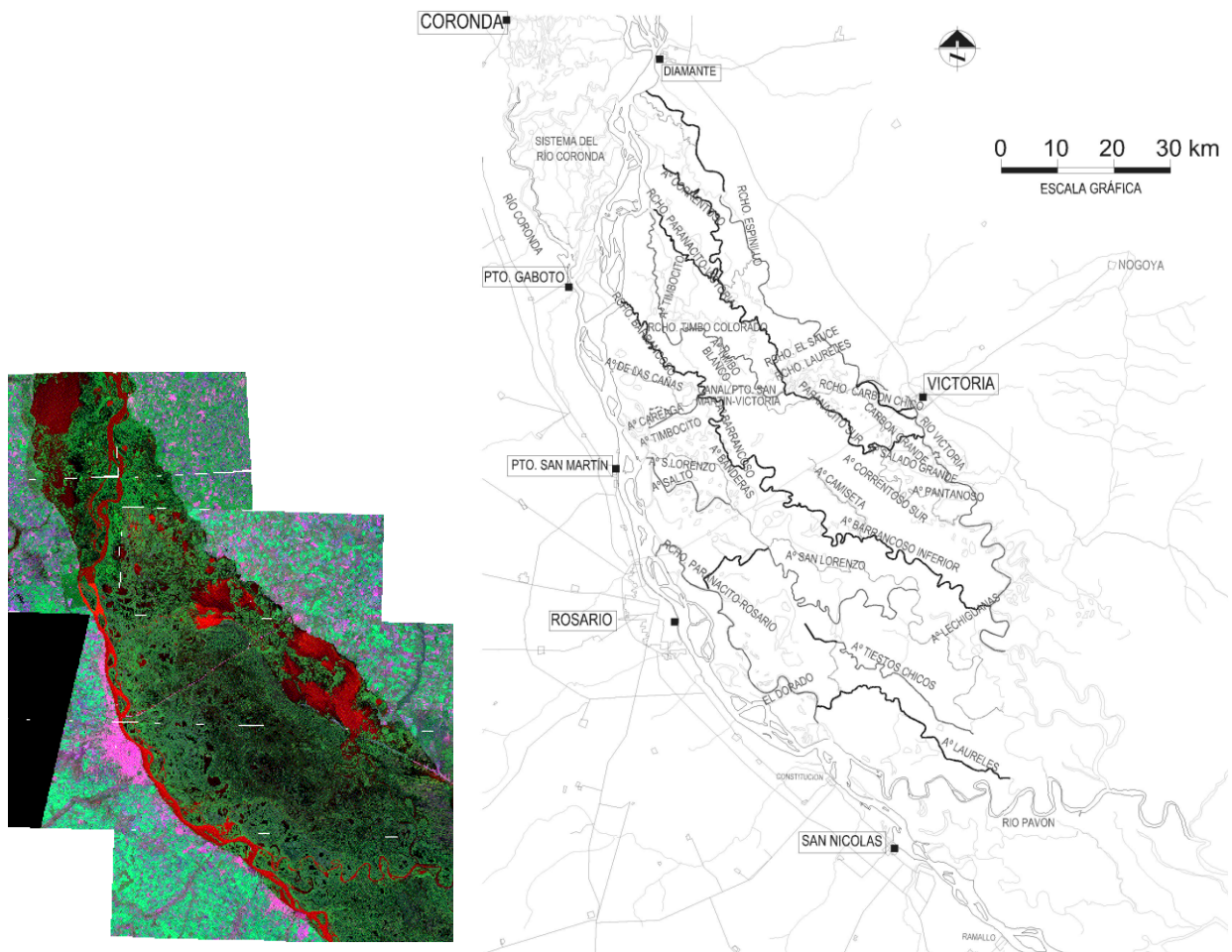


Figura 1.- Mosaico de imágenes satelitales de la zona a modelar, del 18 y 25/01/2003 (izquierda) y la correspondiente área en estudio del Río Paraná, desde Diamante a Ramallo (derecha).

El régimen del Paraná es principalmente gobernado por los aportes provenientes de aguas arriba, los afluentes laterales incrementan en poco porcentaje el caudal total. La principal entrada de volumen de agua en la zona en estudio, es a través del cauce principal del río, y es éste el que recoge y distribuye el fluido en todo lo que conforma el valle de inundación. El otro aporte significativo viene dado por el río Coronda, conformado aguas arriba del dominio por un sistema de depresiones lagunares, que culminan en un flujo encauzado, concentrando los caudales que ingresan desde la margen derecha, y descarga sobre el cauce principal del Paraná una vez que el mismo ya atravesó toda su planicie de inundación, a la altura de Oliveros. Estos dos ingresos se van a considerar diferenciadamente, aunque se establece una relación entre ambos -del sistema del río Coronda con el del cauce del Paraná-.

En el tramo en estudio, el agua que ingresa a la planicie, lo hace a través de cursos de agua menores originarios en el cruce del cauce principal, presentándose dos principales escurrimientos: encauzado sobre la margen derecha –cauce principal- y sobre el valle (a través de cursos, bajos y lagunas interconectados). Éstos se presentan separados por crestas angostas -albardones- que existen hasta aguas abajo de Rosario. Interiormente por el valle, existe una red de cursos, de menores magnitudes que el cauce principal, pero de distintas y variadas jerarquías. Los mismos pueden ser permanentes o transitorios, tienen trazas zigzagueantes que se van moldeando y modificando a través del tiempo según la dinámica hídrica que se

presente, con escurrimientos predominantemente NO-SE. La mayoría de ellos, sobre aguas abajo del tramo estudiado, descargan sus aguas sobre el Río Pavón, curso de importancia que atraviesa el valle desde la margen santafecina a la entrerriana.

Durante las crecidas, los ingresos entre los albardones a los cursos se incrementan considerablemente, y – según sea la magnitud de la creciente- pueden llegar a desbordarlos, situación que se da hasta algunos kilómetros aguas abajo de Rosario, y a partir de ahí los mismos no se presentan. Los cursos de agua aumentan su carga y también desbordan, comienzan a incrementar el volumen de agua de lagunas cercanas aledañas a los cursos y a interconectarse las depresiones, que al aumentar la cota del pelo de agua presente en ellas, pueden iniciar un escurrimiento interlagunar. Las que podían haber estado inicialmente aisladas, con la crecida, usualmente quedan formando parte de la red de escurrimiento a través del valle. El estudio de las crecidas es importante, ya que la magnitud de éstas y la permanencia están vinculadas a las modificaciones topográficas que se producen en el valle, al generarse cambios en los procesos de sedimentación (Asselman y Middlekoop, 1995).

APLICACIÓN DEL MODELO

Se comenzó con la definición y selección de las celdas del modelo en Río y Valle, según se describió anteriormente. Se continuó con la definición topobatimétrica del cauce principal y valle aluvial del río. Para ello se elaboró el modelo digital del terreno con la ayuda de datos sobre relevamientos topográficos efectuados en el valle aluvial, datos topobatimétricos del curso principal y cursos secundarios provenientes del estudio de Serman & asociados S. A. (1999), imágenes satelitales y fotos aéreas de la zona en distintos estados del río (aguas bajas, medias y altas), y de información topográfica satelital, proveniente de la Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), sobre la cual se realizó un proceso de los datos, para obtener cotas de fondo de las áreas correspondientes a las celdas Valle de la planicie.

La constitución final del modelo se puede visualizar en la Figura 2, donde se observa el curso principal del río Paraná –de mayor grado de detalle- que incluye las islas, el valle aluvial, los cursos dentro del mismo y al NE el sistema del río Coronda. El modelo cuenta con 1413 elementos que representan el curso principal, secundarios en el valle de inundación y el río Coronda (celdas Río) y 140 elementos que representan la planicie de inundación e islas (celdas Valle). Las vinculaciones entre las diferentes celdas contabilizan 4248, las cuales se tuvieron que definir específicamente, indicando en cada caso las celdas relacionadas, longitud de tal vínculo, distancia representativa de la vinculación establecida entre ellas, coeficientes de gasto en uniones tipo vertedero, y características geométricas del mismo si estaban conformados por escalones. Luego se establecieron los anchos promedios de cada celda, el área total de las mismas y las funciones almacenamiento de ellas.

Una cuestión que actualmente afronta el modelo, es que no cuenta con una interfaz “amigable” para el armado de la configuración en planta, la definición topográfica y la asignación de los coeficientes hidráulicos necesarios; por lo cual la carga de todos los datos para su funcionamiento fue laboriosa. Esta cuestión se sobrepuso a otra con la que se afrontó anteriormente, donde sí se contaba con una plataforma -Simulaciones (Stenta et al., 2005)-, pero donde la configuración de celdas obligatoriamente tenía que ser de tamaño uniforme y cuadrangular (celdas cuadradas de 500 m de lado), lo que llevaba a contar con una cantidad muy grande de celdas, y consecuentemente de vinculaciones, que hacían que cada corrida insuma un tiempo muy grande (días), además que el detalle de la mayoría de las áreas del valle era excesivo, especialmente para el objetivo buscado, ya que se presentaba redundancia en la información, en función de la topografía característica de llanura. Por lo cual se decidió tener un modelo de mayor agregación en cuanto a las áreas -especialmente del valle-, en pos de mejorar los tiempos de las simulaciones hidrodinámicas (que quedó reducido a horas).

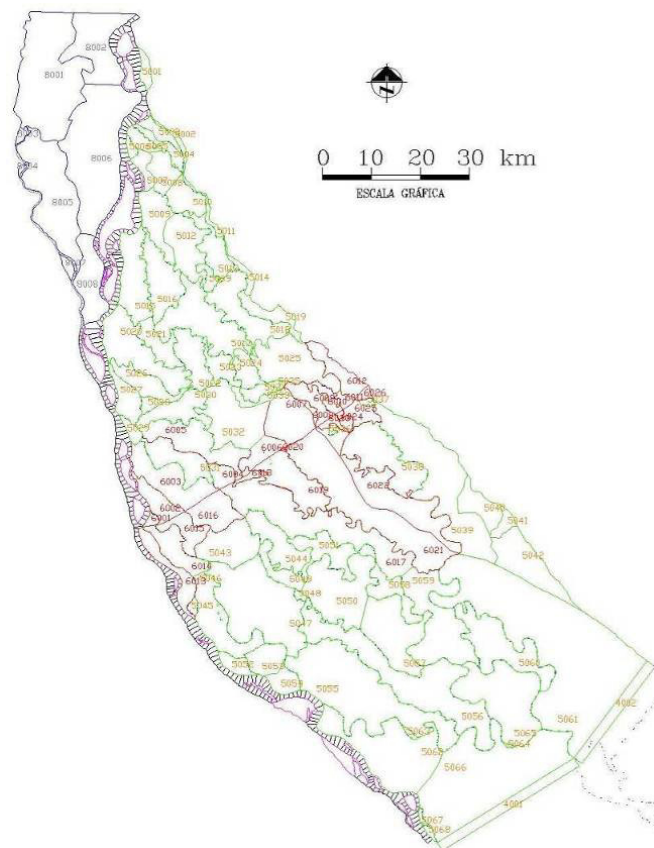


Figura 2.- Visualización de la constitución del modelo matemático.

El modelo fue calibrado para situaciones de aguas bajas, medias y altas. La calibración se realiza especialmente considerando la situación de crecidas, con lo cual se eligieron años calendarios de las mayores que se han registrado en este período: 1982-83; 1992 y 1997-98, que fueron tres eventos extraordinarios (aquellas en que los máximos anuales superaron los 30000 m³/s), siendo las de mayor relevancia en el período a analizar. Para éste, se tomaron en cuenta aquellos años posteriores al comienzo de la década del ‘70, ya que se presenta un cambio en la tendencia central de las series (Paoli et al., 2000), período éste, en el

que la cuenca Del Plata experimentó marcados cambios en el uso del suelo, en especial deforestación, se evidencian también aumento en las precipitaciones y además comenzaron a operar una serie de presas en el propio Río Paraná, que podrían formar parte de las causas de mayores escurrimientos, que hacen que la serie homogénea a analizar sea a partir de dicha fecha. Para el año medio se seleccionó a 1994, y para aguas bajas a 1968, que si bien sale del período considerado, es cercano y fue un año de muy escasos caudales. Luego la validación se realiza sobre el período completo de la década del '80 y '90.

Posteriormente, como sobre el final del siglo XX se construye la conexión física (CF) Rosario-Victoria, se incorpora esta obra de infraestructura en el modelo, calibrándolo para el período 2007-2010, donde se dan dos crecidas -2007 y 2009-10- y una bajante considerable -en 2008-, y luego se valida con el período completo 2000-2010.

Los registros a contrastar son las alturas limnimétricas en los puertos que comprende la zona en estudio: Diamante, Puerto San Martín (PSM), Rosario, San Nicolás (todos éstos sobre el cauce principal del Paraná), Victoria (único registro sobre el valle de inundación del dominio), Coronda y Puerto Gaboto (ambos sobre el sistema Coronda), y además los caudales sobre el cauce principal a la altura de PSM (único lugar donde se contabiliza esta variable, dentro del dominio en estudio). Estos sitios pueden observarse en la Figura 1.

Los caudales registrados en PSM para los años utilizados para la calibración, se presentan en la Figura 3, donde puede observarse, que comparando con el módulo del río de aproximadamente 17500 m³/s (para el período 1970-2008, el módulo resulta de 17586m³/s), se manifiestan que el año 1968 es de aguas bajas, 1994 de aguas medias, y los períodos 1982-83; 1992 y 1997-98 fueron de aguas altas.

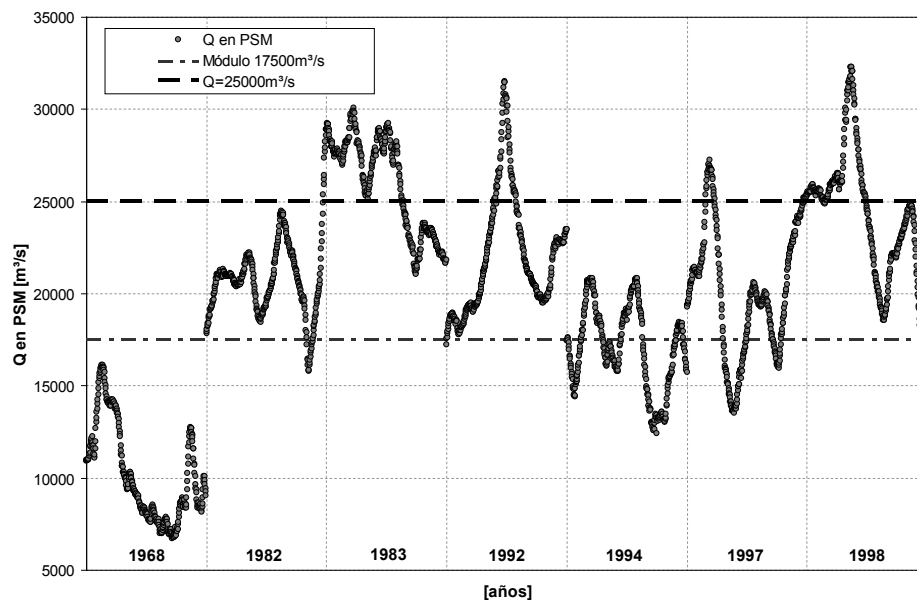


Figura 3.- Hidrogramas anuales en la sección del cauce principal frente a PSM, correspondiente a las crecidas de 1982-1983; 1992; 1997-1998, aguas medias de 1994 y para aguas bajas en 1968.

A los efectos de la alimentación de caudales en el dominio, se consideró dos lugares de ingreso en el contorno aguas arriba, uno desde el cauce principal a la altura de la localidad de Diamante, y otro a la altura de la localidad de Coronda, en el sistema lagunar que corresponde a este curso de agua. No se considera en el estudio, el aporte de precipitaciones directas sobre el dominio, debido a la escasa influencia de las mismas frente a los caudales circulantes.

El hidrograma entrante desde Diamante, fue considerado que es el mismo que se registra sobre el cauce principal a la altura de PSM, ya que pertenece a sección encauzada del flujo que por el sistema circula. Los registros de caudales, así como de alturas limnimétricas sobre las distintas escalas de los puertos, fueron obtenidos de la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (SSRH). Por lo tanto el hidrograma registrado en PSM se traslada aguas arriba sobre el cauce principal, como ingreso en este borde del dominio.

Para los caudales ingresantes desde el sistema Coronda, no se cuenta con observaciones continuas de caudales como en PSM, sólo se registran alturas limnimétricas. Con lo cual, para los años en los cuales se calibró el modelo, se impone en el contorno aguas arriba, en el ingreso del sistema Coronda, el limnigrama $H(t)$ allí registrado para el ingreso de agua (y el hidrograma de PSM en Diamante). A partir de los resultados del caudal ingresante por la celda correspondiente al Coronda, y calibrando el modelo para que los caudales en PSM y las cotas del pelo de agua sobre Puerto Gaboto y PSM, den buenas correlaciones; es que se toman los mismos y se los compara con los ingresantes por Diamante. De esto se confecciona una función vinculante, que se considerará válida para el resto de los años a simular (siempre a partir de contar con los valores registrados en PSM). En la Tabla 1 se expresa la función de relación entre los caudales ingresantes desde Coronda y desde Diamante (considerados similares a los que se registran en PSM).

Tabla 1.- Relación entre caudales ingresantes desde Diamante y desde el sistema Coronda.

Q_{Diamante}	$Q_{\text{ingresante Coronda}}$
$< 7500 \text{ m}^3/\text{s}$	$210 \text{ m}^3/\text{s}$
$7500 \text{ m}^3/\text{s} < Q_{\text{Diamante}} < 24000 \text{ m}^3/\text{s}$	$Q_{\text{ingr Coronda}} = -2,762413\text{E-}17 x^5 + 2,225512\text{E-}12 x^4 - 6,365209\text{E-}08 x^3 + 8,379162\text{E-}04 x^2 - 5,137539 x + 1,208066\text{E+}04$ siendo $x = Q_{\text{Diamante}}$
$> 24000 \text{ m}^3/\text{s}$	$Q_{\text{ingr Coronda}} = a x + b$ siendo: $a = 2,516021361$ $b = -50480,64083$

Una vez ya establecidos los hidrogramas entrantes, se procede a ajustar las condiciones de borde aguas abajo del modelo. Este contorno está conformado por cinco celdas de salida del sistema, por ende tendrá cinco leyes altura-caudal, la correspondiente a la celda de salida del cauce principal, a la de un ramal paralelo a éste -sobre el valle-, otras dos especificadas para las celdas Valle de salida de la planicie y una última en el borde aguas abajo del sistema de cursos secundarios sobre el valle aluvial, que involucra la descarga de la celda de salida del escurrimiento encauzado sobre el valle. Para la ley H-Q del cauce principal, primero forzó al modelo a tener una condición de borde allí con una ley $H(t)$, de los registros de los años para la calibración. Los resultados de caudales para la celda de salida del cauce principal fueron los adoptados para confeccionar la H-Q sobre la misma, que finalmente fue nuevamente ajustada, para que los registros –

especialmente los de PSM - tengan una buena correlación. Las condiciones de borde de las celdas restantes, fueron construidas en principio en función de las características morfológicas de las secciones, y posteriormente fueron ajustadas para que las alturas de los registros sobre el valle –indicador: alturas de agua en Victoria-, otorguen buenos resultados.

El coeficiente de rugosidad de Manning fue uno de los parámetros de calibración. Las celdas del cauce principal, correspondientes al tramo donde el mismo se encuentra recostado sobre la margen derecha, el coeficiente de rugosidad hasta un tirante de 16 m fue de $0,037 \text{ s/m}^{1/3}$, disminuyendo hasta $0,029 \text{ s/m}^{1/3}$ para los 18,5 m de tirante o mayores; y para las celdas aguas arriba, donde el cauce atraviesa toda la planicie de inundación para cruzar de margen, fue más elevado, ya que en este tramo la trayectoria presenta más sinuosidades, calibrándose en valores del doble que los anteriores. En las vinculaciones entre las celdas de los cursos secundarios dentro de la planicie, el coeficiente de rugosidad varió de 0,030 a $0,035 \text{ s/m}^{1/3}$. Por otra parte, se consideraron distintos coeficientes de gasto en las vinculaciones tipo vertedero, los que variaron entre 0,1 y 0,5, en función de la incidencia del flujo de agua sobre los mismos, si representan a albardones costeros, o el ingreso de caudal desde el cauce principal hacia los secundarios del valle, o simplemente por superar la diferencia de cotas entre celdas.

Los ajustes logrados son muy satisfactorios, verificándose errores promedios entre los limnigramas calculados y observados menores del 10 %. Sin embargo, para evaluar la eficiencia de los resultados de las modelaciones con mayor rigurosidad, se utilizó el conocido coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (1970), definido en función de los caudales, y utilizado aquí también para los niveles de agua. En la Tabla 2 se presentan los coeficientes resultantes, para las distintas secciones de comparación, en cuanto a alturas limnimétricas, y para caudales en PSM (nota: donde no hay indicación es porque no se pudo contar con los registros pertinentes para su contraste).

Tabla 2.- Resumen de coeficientes de Nash-Sutcliffe, para la evaluación de diferentes hidrogramas de calibración.

Períodos de tiempo	1968	1982-83	1992	1994	1997-98
Diamante	0.93	0.65	0.81	0.83	0.88
Pto. San Martín	0.83	0.99	0.99	0.95	0.99
Rosario	0.83	0.95	0.90	0.80	0.91
San Nicolás	0.89	0.93	0.93	0.95	0.94
Victoria	0.71	0.89	0.97	-0.16	0.91
Coronda	---	0.74	0.85	0.71	0.92
Pto Gaboto	---	---	0.90	0.89	0.94
QPSM	0.99	0.93	0.96	0.99	0.96

La mayoría de los valores supera a 0,65, indicando el buen ajuste logrado. Se observa una disminución del coeficiente E para aguas medias, en la estación Victoria, lo cual no resulta significativa ya que en el resto de las condiciones, incluso en aguas bajas, tiene un buen ajuste. Esto puede ser debido a que la definición topográfica, en especial de los cursos de agua, del sector correspondiente al valle, fue de difícil elaboración, por contar con escasos a casi inexistentes relevamientos en la zona.

Una vez calibrado el modelo, se prosigue con la validación, para lo cual se realizan las corridas correspondientes a las décadas del '80 (1980-89) y '90 (1990-99). Los resultados fueron muy satisfactorios, teniendo nuevamente errores por lo general menores al 10% en alturas, con excepción de Victoria, donde los mismos fueron menores al 15%. Los coeficientes de eficiencia E también dieron resultados satisfactorios – Tabla 3-, siendo en ambos períodos, y para todas las comparaciones realizadas, mayores a 0,79, indicando la buena correlación obtenida, las cuales se puede visualizar en los limnigramas de la Figura 4 siguiente.

El intervalo temporal utilizado fue en general de $\Delta t = 360$ s, hasta cumplir con el tiempo de modelación total establecido. El tiempo real que insumió cada simulación de un año hidrológico, fue de aproximadamente 8 horas en un equipo Intel Core 2 Quad con CPU 2,4 GHz y 2 Gb de RAM.

Tabla 3.- Resumen de coeficientes de eficiencia E de Nash-Sutcliffe, durante la validación, años 1980-89 y 1990-99.

Períodos de tiempo	1980-89	1990-99
Diamante	0,90	0,92
Pto. San Martín	0,98	0,97
Rosario	0,94	0,90
San Nicolás	0,96	0,97
Victoria	0,79	0,85
Coronda	0,88	0,87
Pto Gaboto	0,91	0,95
QPSM	0,98	0,98

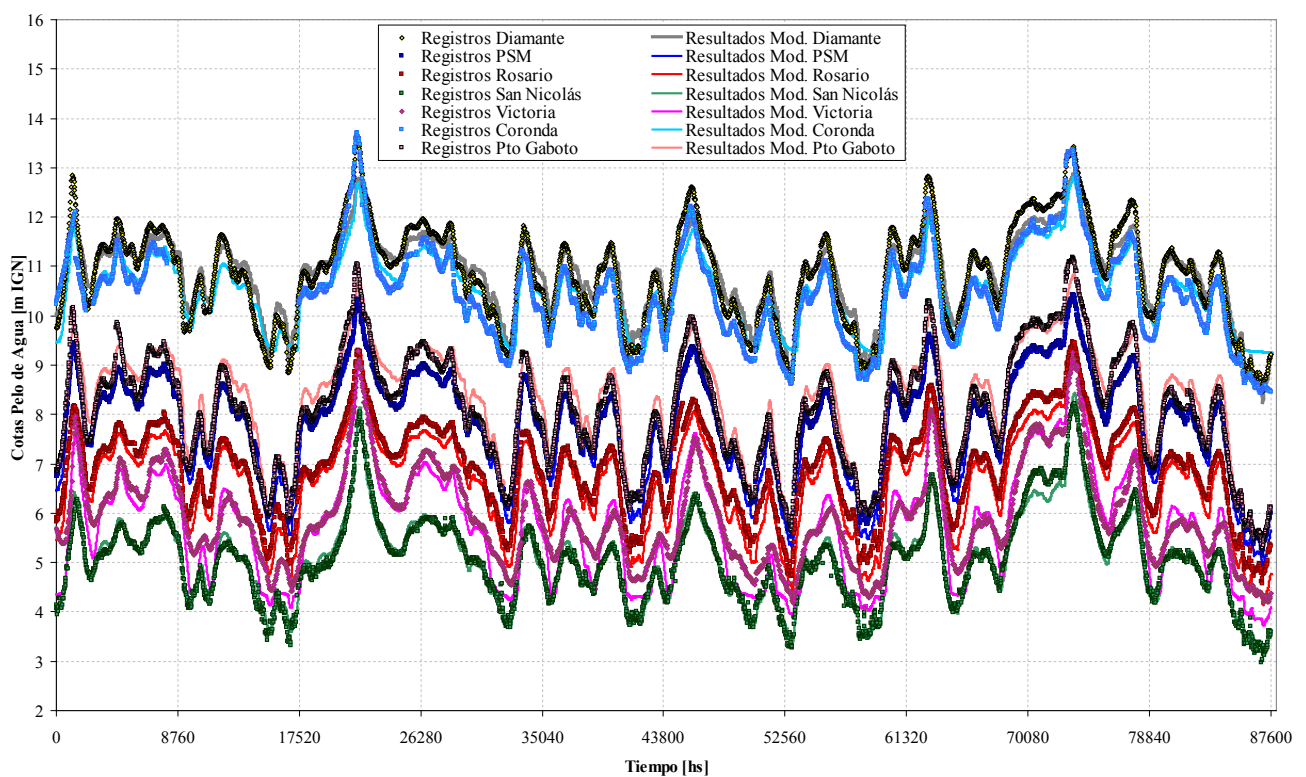


Figura 4.- Comparación de limnigramas calculados y observados en los puntos de control, para el período 1990-99.

Incorporación de la Conexión Física Rosario-Victoria

El siguiente paso fue la incorporación de la conexión física (CF) Rosario-Victoria. Esta obra es importante para la región a nivel económico, ya que mejora la comunicación entre la zona este del país y el O, conformando un corredor vial, con otras vías de comunicación, hasta Chile. El comienzo de la construcción fue en Septiembre de 1998 y se inauguró en Mayo de 2003, pero las obras de los terraplenes finalizaron aproximadamente cercano al comienzo del siglo XXI. Para la construcción se han realizado refulados de arena, para lo cual se han construido canales de servicio paralelos a la traza y lugares de extracción (12 préstamos), los que resultan grandes piletones interpuestos en este curso. Desde una visión global, la obra es un gran dique de contención sobre la planicie especialmente, que permite el paso directo de la mayoría de los cursos, con un canal de interconexión transversal entre los mismos, que hace que aquel curso que no cuente con la abertura directa de paso, desvíe sus aguas por éste, situación presente desde el A° Barrancoso hacia el oeste (hacia el este el canal se desarrolla aguas abajo del terraplén), cumpliendo una función como distribuidor de caudales. Desde el A° Barrancoso hacia el E, los cursos o depresiones activas que no cuentan con paso directo a través de la CF, lo hacen por desborde y encauzamiento de las aguas en los cursos que cuentan con puentes. Las luces que dejan libres estas obras otorgan una transparencia geométrica algo mayor al 18%.

Primeramente se incorporó a la configuración ya calibrada y validada, toda la CF, que incluye el terraplén vial, el canal de servicio, los grandes piletones (ex depósitos de arena) en él presentes y los puentes. Las incorporaciones se pueden visualizar en la Figura 5 donde se presenta el sector que es reconfigurado.

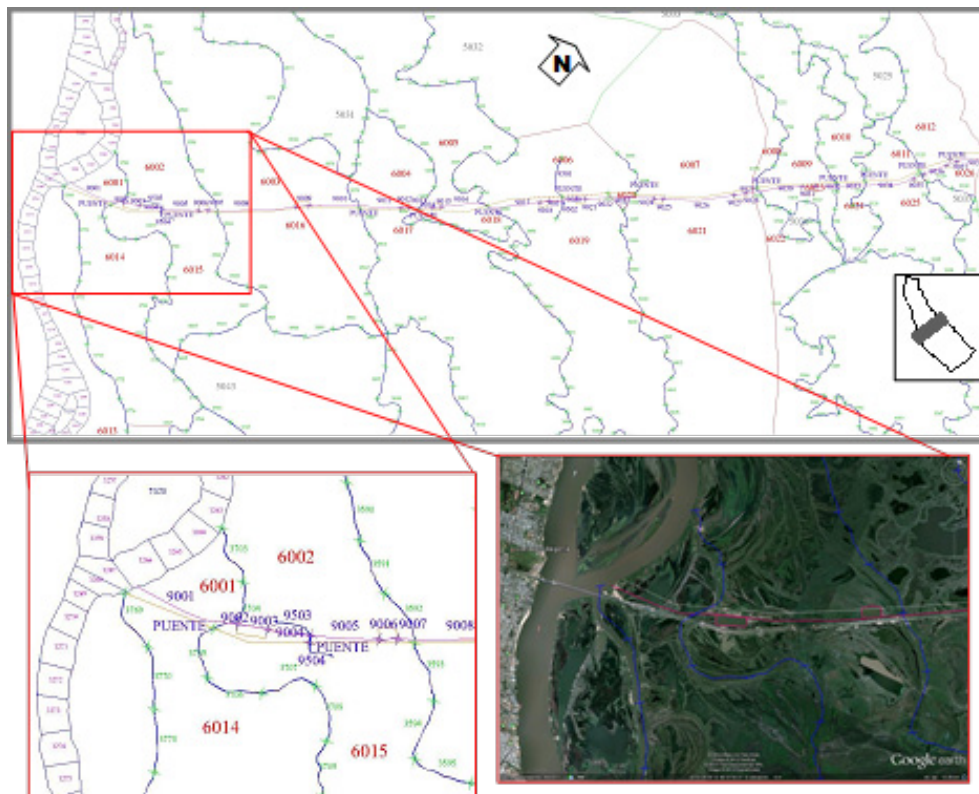


Figura 5.- Sector del modelo con la incorporación de la Conexión Física Rosario-Victoria.

Así, posteriormente, se calibró el modelo con la incorporación de la CF, específicamente los coeficientes de gasto de los vertederos de las vinculaciones nuevas, donde fue emplazada la obra, y los coeficientes de rugosidad de los nuevos canales. Esto se realizó a partir de los registros de los años 2007-2010, donde se sucedieron las dos crecidas (2007, 2009-2010) y un importante estiaje (2008). Los caudales, si bien 2007 y 2009-10 son de crecidas, no son de la relevancia de las de los años usados anteriormente para la calibración, pero son las mayores dentro del nuevo período con la presencia de la CF.

Una particularidad observada dentro del año 2000, es que a partir de aquí en adelante, al contrastar los caudales y alturas limnimétricas de PSM, no responden a la misma ley H-Q con la que venían haciéndolo, sino que se presentaron diferencias. Del estudio de esta cuestión particular realizado en Garcia et al. (2011), se concluye la relación H-Q establecida en el PSM por la SSRH fue modificada a partir del 1/9/2000, lo cual fue contrastado con los caudales aforados desde esa fecha. A raíz de esto, se modifican las condiciones de borde aguas abajo. Las relaciones se vieron ligeramente modificadas, el cambio se considera aplicado a todo este período evaluado.

Los ajustes logrados nuevamente son muy satisfactorios, teniendo errores promedios entre los limnigramas calculados y observados menores del 10 %. Los coeficientes de eficiencia E logrados reflejan la alta correlación entre las observaciones y los cálculos, los cuales se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4.- Resumen de coeficientes E de Nash-Sutcliffe, para 2007-Octubre 2010 (calibración) y 2000-Octubre 2010 (validación). (*) Evaluado sólo para el período a partir de 2007, ya que no pudo conseguirse los registros anteriores.

	2007-Octubre 2010 (calibración)	2000-Octubre 2010
Diamante	0,73	0,73 (*)
Pto. San Martín	0,98	0,94
Rosario	0,93	0,75
San Nicolás	0,95	0,82
Victoria	0,92	0,65
Coronda	0,80	0,75
Pto Gaboto	0,90	0,87
QPSM	0,97	0,95

El coeficiente de rugosidad de Manning de las canalizaciones varió de 0,030 a 0,035 s/m^{1/3}, quedando similar al de los cursos secundarios dentro de la planicie. Los coeficientes de gasto en las vinculaciones tipo vertedero, variaron entre 0,01 y 0,5, en función de si se trata del terraplén vial, desborde del canal de servicio, pasaje por los distintos puentes, escalonamientos de las secciones del canal de servicio, etc.

Para validar la calibración anterior, se modela un período mayor de tiempo, desde lo que se considera que comienza a estar presente la CF, desde inicio del 2000 a Octubre de 2010 (tope máximo de registros conseguidos). Los resultados obtenidos fueron muy satisfactorios, ya que la mayoría de los coeficientes de eficiencia obtenidos fueron mayores a 0,65, como se puede observar en la Tabla 4.

Demostrada la eficiencia del modelo, se realizará la explotación del mismo para evaluar el efecto de la incorporación en el valle del terraplén de la CF Rosario-Victoria, y cuantificar las modificaciones que se producen aguas arriba, tanto en los niveles máximos de agua como en los tiempos de permanencia dentro del

valle. El análisis se realiza a través de las modelaciones hidrodinámicas, en la situación con y sin obra. Para ello se consideró el período de tiempo en el cual está presente la CF, desde el inicio del 2000 a Octubre de 2010, utilizando los resultados de la corrida usada para la validación, y los de otra en paralelo realizada con la configuración sin la CF, para evaluar la situación como si la obra no hubiese sido construida.

EVALUACIÓN DE RESULTADOS

Se compararon los resultados de las corridas, para el período 2000-Octubre 2010, sin y con la CF, observando diferencias en hidrogramas, así como en cotas del pelo de agua en distintas celdas. El principal efecto del terraplén vial es que aguas arriba del mismo se genera acumulación de volúmenes de agua, elevando los tirantes y produciendo en las celdas un mayor tiempo de permanencia de agua.

Los caudales y niveles hidrométricos sobre el cauce principal, no tuvieron grandes cambios, siendo las mayores diferencias en estos últimos menores al 0,3% -en más- aguas arriba del puente de la CF, y aguas abajo menores al 1% -en menos-. Los limnigramas resultantes de Victoria sí presentaron variaciones oscilantes menores al 3% -en menos-, indicando que fundamentalmente los efectos de la presencia de la CF son sobre el valle de inundación. En cuanto a los hidrogramas, las diferencias a la altura de PSM, son menores al 0,15%, siendo en su gran mayoría menores a 0,05%, dando cuenta la casi despreciable diferencia. Por otro lado, se han sumado los caudales totales que atraviesan la planicie, a la altura de la CF, en las dos situaciones –sin y con la obra-, presentándose diferencias en los mismos, llegando a aumentar hasta en un 9% (con los picos de las crecidas sucedidas), dependiendo de los caudales totales que fluyan por el dominio.

Para analizar las diferencias en cuanto a las cotas del pelo de agua, se centró el estudio sobre las celdas del valle de inundación, dividiéndolas entre las de aguas arriba de la CF y las de aguas abajo. En cada lugar se recopilaron los resultados, donde en ocasiones –según las celdas- hubo disminución del tirante respecto a la situación sin la CF, y en otros aumentos. Sobre ellas, se contabilizaron las diferencias que se presentaron, tanto máximas como mínimas, encontrándose que las mayores se dan aguas arriba de la CF, siendo de 0,65 m. Los mínimos son del orden de los 5 cm (disminuciones de alturas), que pueden deberse oscilaciones de los vertederos al ponerse en funcionamiento. Aguas abajo, las máximas diferencias son del mismo orden que las mínimas, de 0,18 m, que indica no haber una tendencia definida, sino que se producen oscilaciones menores que parecen tender a mantener el pelo de agua sin variación con respecto a la situación sin la CF.

Para esquematizar la situación de anegamiento sobre la zona en estudio, se toma el instante de tiempo del pico de la crecida de 2007, y se trazan perfiles transversales y longitudinales, para la situación con y sin la CF. En cada uno se presentan a escala las cotas de fondo de las celdas del modelo –las tipo valle como las río-. Se han definido tres perfiles longitudinales (PL1, PL2 y PL3) a lo largo del valle de inundación, y dos perfiles transversales, aguas arriba y aguas abajo de la CF. En éstos se puede visualizar notoriamente la presencia del terraplén vial. En la representación están presentes los albardones costeros del cauce principal. Sobre el PL3,

hacia aguas abajo, aparece representado a través de un vertedero la separación interna en el valle entre el viejo cauce del Paraná (llanura de avenamiento impedido), sobre la costa entrerriana, y la llanura de médanos (o playas de regresión) hacia el oeste. Los perfiles trazados se presentan en las Figuras 6; 7; 8 y 9.

De la visualización de los perfiles longitudinales, se puede concluir que el efecto de la presencia de la CF Rosario-Victoria sobre el valle de inundación se evidencia aguas arriba de la misma, elevando las cotas del pelo de agua, no teniendo casi influencia sobre la zona aguas abajo de ella. La extensión de afectación, para el pico de las crecidas ocurridas -2007 y 2009-10-, llega a ser de 53,5 km aproximadamente.

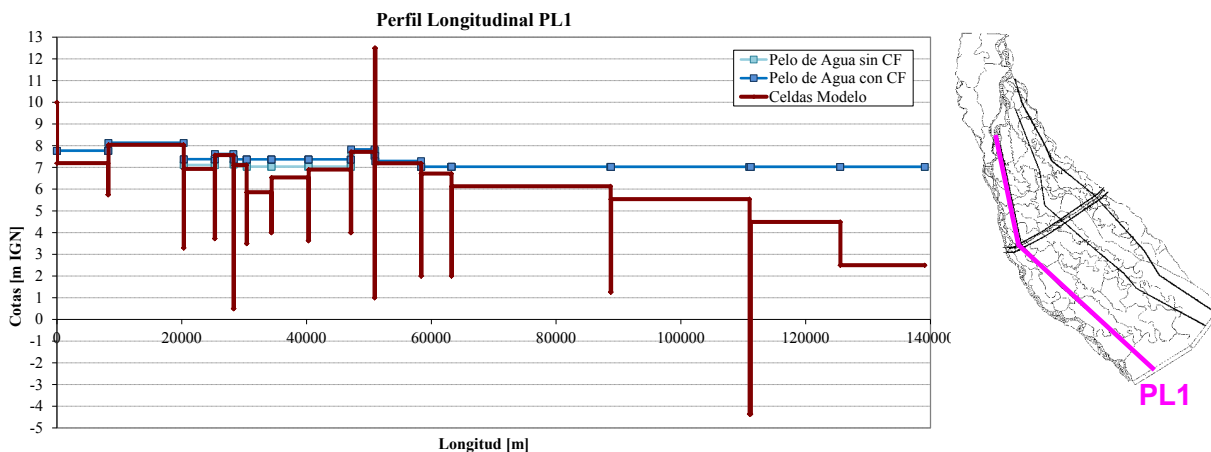


Figura 6.- Perfil longitudinal PL1, con las cotas del pelo de agua, sin y con la CF, para el pico de la crecida de 2007.

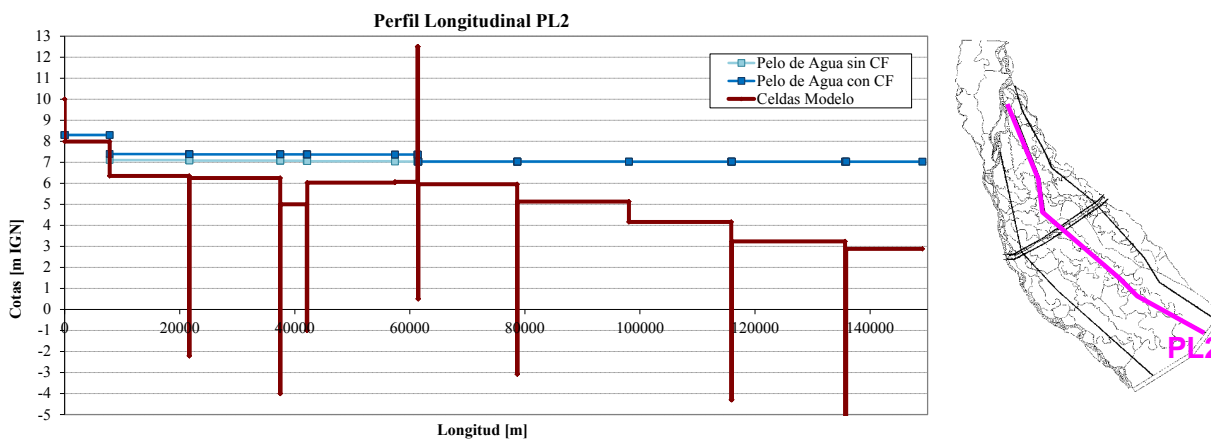


Figura 7.- Perfil longitudinal PL2, con las cotas del pelo de agua, sin y con la CF, para el pico de la crecida de 2007.

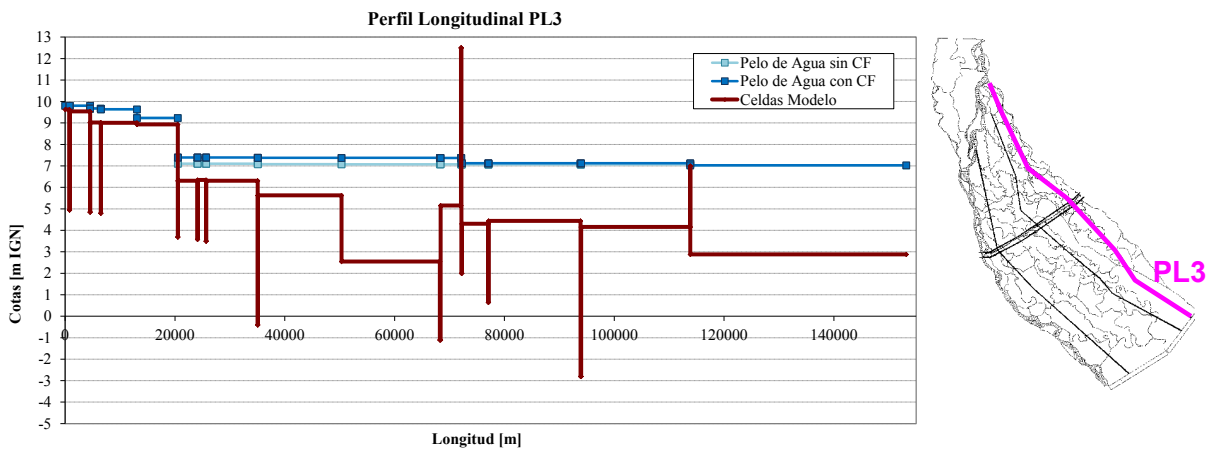


Figura 8.- Perfil longitudinal PL3, con las cotas del pelo de agua, sin y con la CF, para el pico de la crecida de 2007.

Cuando se presentan crecidas, el agua en el valle tiene una determinada cantidad de días de presencia en los distintos lugares, que puede ser evaluada para cada celda. Al incorporar la CF, la permanencia del agua en la planicie cambia, aumentando la misma especialmente aguas arriba. Esta cuestión es importante para el ecosistema del Paraná, ya que muchas comunidades de la flora y fauna son dependientes de los ciclos hídricos (Taller Ecologista, 2010). Si se modifican estas permanencias, podría llegar a influir sobre las comunidades que de ellas dependen.

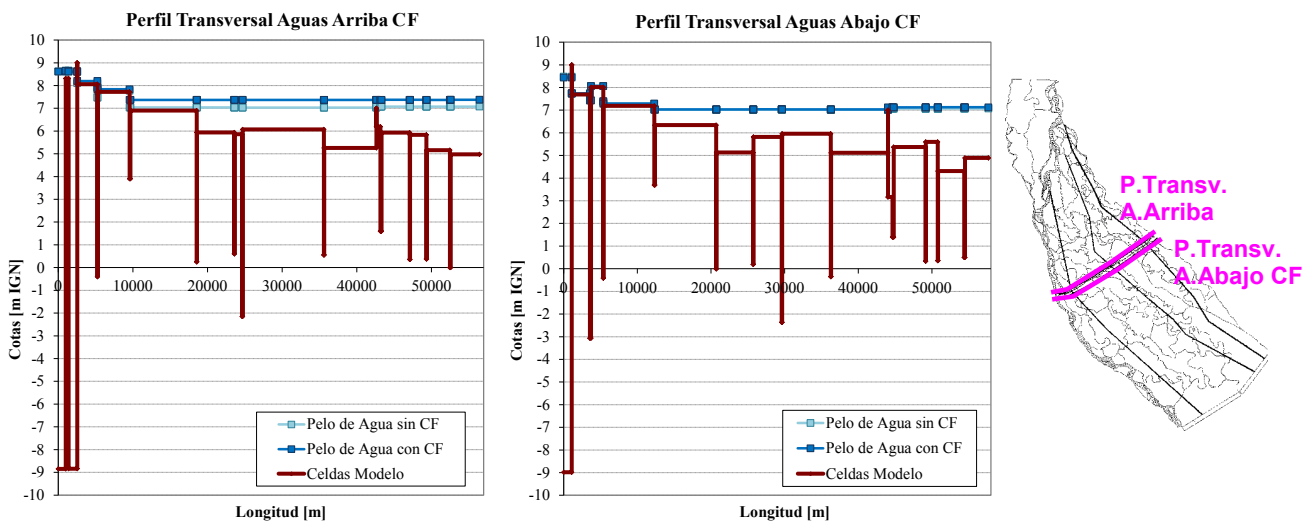


Figura 9.- Perfiles transversales, Aguas arriba y Aguas Abajo de la CF, con las cotas del pelo de agua, sin y con la CF, para el pico de la crecida de 2007.

Para evaluar los cambios de la presencia del agua en las celdas, se fueron tomando las permanencias sobre cada una -cantidad de días que sobre la celda se sobrepasa una altura de agua, asociada a un área de anegamiento en cada una-, y se cuantifican las variaciones -sin y con CF-. Posteriormente se pondera, según la superficie de cada una, el cambio en la permanencia del conjunto de celdas de cada grupo -aguas arriba y aguas abajo-, para el período estudiado. Los resultados pueden visualizarse en la Figura 10 siguiente, a la izquierda. La diferencia en el área anegada responde a las diferentes superficies de los sectores.

Para ambos sectores diferenciados, los resultados ponderados indican que la permanencia aumenta con la presencia de la CF, siendo más notorio en el conjunto de celdas aguas arriba. Sobre las celdas aguas abajo, la casi coincidencia de las curvas refleja que prácticamente no hay variabilidad en la permanencia de agua sobre este sector. En la Figura 10, a la derecha, se presentan los porcentajes de incremento de la permanencia de agua por la incorporación de la CF, para ambos conjuntos de celdas, aguas arriba y abajo.

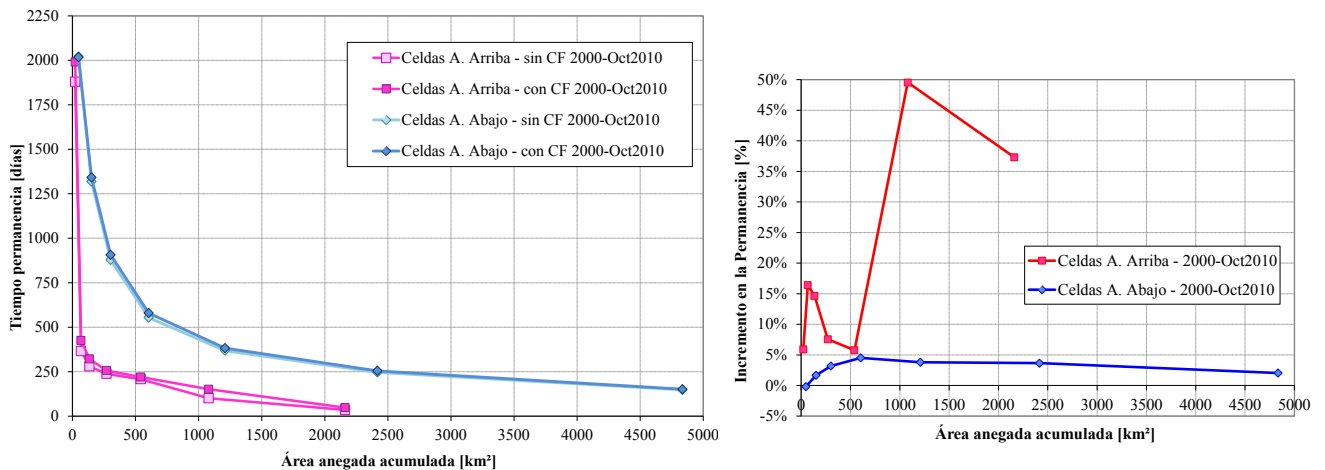


Figura 10.- Curvas de Permanencias vs. Área superficial anegada (izquierda) y del Porcentaje de Incremento en la Permanencias del agua (derecha), ponderada para el conjunto de Celdas Aguas Arriba y Aguas Abajo, período 2000- Octubre 2010, sin y con la presencia de la CF.

Es notoria la diferencia entre ambos conjuntos de celdas. Para las de Aguas Arriba, el aumento es de hasta un máximo del 50%, y para Aguas Abajo, el aumento es menor al 5% aproximadamente. Aguas Arriba del terraplén vial, hay un rápido incremento para las áreas anegadas hasta 100-135 km², del 15% aproximadamente, luego disminuye alrededor del 7,5% hasta los 500 km², a partir de donde nuevamente el incremento vuelve a ser muy imponente hasta del 50%, bajando al 37% para las áreas mayores.

En líneas generales, se puede mencionar que la permanencia del agua de este período analizado, aumentó entre el 5 y 50% del tiempo que hubiese permanecido el agua si no estuviese la CF Rosario-Victoria. Aguas abajo la situación es más homogénea, resultando variaciones en la permanencia menores, aumentando entre el 1,5 a 4,5% el tiempo de residencia del agua.

CONCLUSIONES

Se implementó y aplicó el modelo CTSS8 para simular la hidrodinámica del sistema cauce-planicie de inundación en un tramo de aproximadamente 200 Km del río Paraná entre Diamante y Ramallo, que comprende el cauce principal y el valle aluvial. Se calibró el modelo para años calendarios de aguas bajas, medias y especialmente altas, para las principales crecidas sucedidas en las últimas décadas. El modelo

hidrológico-hidráulico aplicado representa satisfactoriamente la dinámica del flujo, tanto encauzado como de desborde, en el sistema cauce-planicie del tramo estudiado, durante décadas de 1980-89 y 1990-99.

A partir de la implementación en el tramo en estudio de las obras de infraestructura vial construidas recientemente y que atraviesan completamente el valle del río Paraná en la zona modelada (CF Rosario-Victoria), se reconfiguró el modelo incorporando el terraplén, el canal de servicio y los puentes de esta obra. Se calibró la nueva constitución, y posteriormente se validó con los registros del período 2000-Octubre 2010, resultando un buen funcionamiento hidráulico del sistema, tanto para aguas bajas como medias-altas.

Para estudiar el comportamiento actual del sistema, a diferencia del estado anterior sin la obra vial, se analizaron a través de las modelaciones hidrodinámicas, las diferencias en las alturas de agua alcanzadas en la planicie de inundación y los cambios en la permanencia del agua sobre esta zona, para el lapso de tiempo 2000-Octubre 2010, desde cuando se implementó esta infraestructura vial.

Como consideración general se puede indicar que la presencia de la CF Rosario-Victoria hizo que la permanencia de agua, en la planicie de inundación, aguas arriba de la misma, aumente entre 5 y 50%. El incremento de tirante máximo allí calculado es de 0,65 m. Por la presencia de esta obra, la longitud máxima de afectación (durante el pico de la mayor crecida ocurrida hasta el momento, 2009-10) en los tirantes, es de 53,5 km aproximadamente, aguas arriba de la CF sobre el valle. Para el sector aguas abajo de ella, no se evidencian cambios significativos, resultado el incremento de la permanencia menor al 5% en general, dando aumentos y disminuciones máximas del pelo de agua del orden de los 0,18 m. En cuanto a las diferencias de caudales observadas, sobre el cauce principal son prácticamente despreciables –menores a 0,15%-, y en la totalidad del flujo sobre la planicie, se registra un aumento con la presencia de la CF, de hasta un 9% en los picos de las crecidas, valor de escasa consideración.

Resumidamente, esta obra antrópica sobre el sistema fluvial completo, influye esencialmente sobre el sector aguas arriba de la misma, aumentando las alturas de agua –que hacen que sean anegadas más áreas del valle-, con cambios significativos sobre la permanencia del agua, aumentando el tiempo de residencia de la misma en estos sectores.

REFERENCIAS

- Asselman, N.E.M. y Middlekoop, H. 1995. *Floodplain sedimentation: quantities, patterns and processes*. Earth Surface Processes and Landforms 20 (6), pp. 481–499.
- Basile, P.A. y Riccardi, G.A., 2002. *A Quasi-2D Hydro-Morphological Mathematical Model: An Application to the Argentinean Paraná River*. International Journal of Sediment Research, 17 (1), 20-30.
- Bates, P.D., Stewart, M.D., Desitter, A., Anderson, M.G., Renaud, J.P. y Smith, J.A., 2000. *Numerical simulation of floodplain hydrology*. Water Resources Research 36, pp. 2517-2530.
- 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.
- Cunge, J.A., 1975. *Two Dimensional Modelling of Flood Plains*. Cap. 17 Unsteady flow in open channels (Ed. K. Mahmood and V. Yevjevich). Water Resources Publ., Fort Collins.

- Cunge, J.A.; Holly, F.M. y Verwey, A. 1980. *Practical Aspects of Computational River Hydraulics*. Pitman Publishing Limited, Londres.
- Feldhaus, R.; Höttinger, J.; Brockhaus T. y Rouvé, G., 1992. *Finite element simulation of flow and pollution transport applied to a part of the River Rhine*. In: Falconer, R.A., Shiono, K., Matthews, R.G.S. (Eds.) *Hydraulic and Environment Modelling; Estuarine and River Waters*. Ashgate Publishing, Aldershot, pp. 323-334.
- García, M. L.; Basile, P. A. y Riccardi, G. A., 2011. *Estudio de registros de caudales y niveles hidrométricos para grandes crecidas sobre tramo del río Paraná*. Actas del XXIII Congreso Nacional del Agua, Resistencia, Chaco, Argentina. 2011. pp. 88-108.
- Helmiö, T., 2002. *Unsteady 1D flow model of compound channel with vegetated floodplains*. Journal of Hydrology 269, Issues 1-2, pp. 89-99.
- Horrit, M.S. y Bates, P.D., 2002. *Evaluation of 1D and 2D Numerical Models for Predicting River Flood Inundation*. Journal of Hydrology, 268, 87-99.
- Nash, J.E. y Sutcliffe, J.V., 1970. *River flow forecasting through conceptual models Part I: A discussion of principles*. Journal of Hydrology 10 (3), 282-290.
- Nicholas, A.P. y Walling, D.E., 1996. *The significance of particle aggregation in the overbank deposition of suspended sediment on river floodplains*. Journal of Hydrology 186, Issues 1-4, pp. 275-293.
- Nicholas, A.P. y Walling, D.E., 1997. *Modelling flood hydraulics and overbank deposition on river floodplains*. Earth Surface Processes and Landforms, Vol. 22, pp. 59-77.
- Nicholas, A.P. y McLelland, S.J., 2004. *Computational Fluid Dynamics modelling of three-dimensional processes on natural floodplains*. Journal of Hydraulic Research 42, pp. 131-143.
- Nicholas, A. P.; Walling, D. E.; Sweet, R. J. y Fang, X., 2006. *Development and evaluation of a new catchment-scale model of floodplain sedimentation*. Water Resources Research, Volume 42, Issue 10, pp. 1-13.
- 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.
- Penning-Rowsell, E.C. y Tunstall, S.M., 1996. *Risks and resources: defining and managing the floodplain*. In: Anderson, M.G., Walling, D.E., Bates, P.D. (Eds.) *Floodplain Processes*. Wiley, Chichester, pp. 493-533.
- Riccardi, G.A., 1997. *The Mathematical Modelling for the Delimitation of Inundation Risk Zones*. Sustainability of Water Resources Under Increasing Uncertainty. IAHS Public. N° 240, ISSN 0144-7815, Wallingford, pp.127-136.
- Riccardi, G.A., 2000. *Un Sistema de Simulación Hidrológica-Hidráulica cuasi-2D multicapa para ambientes rurales y urbanos*. Tesis Doctoral, FCFyN, UNC, Córdoba.
- Serman & asociados S. A., 1999. *Estudio de la distribución y las luces de los puentes en la planicie inundable*. 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.
- Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) <ftp://edcsgs9.cr.usgs.gov/pub/data/srtm/>
- Stenta, H., Rentería, J.P. y Riccardi, G.A., 2005. *Plataforma computacional para gestión de información en la simulación hidrológica-hidráulica del escurrimiento superficial*. XX Congreso Nacional del Agua, Mendoza. CONAGUA 2005. CD-Rom ISBN: 9872214301.
- Stewart, M.D.; Bates, P.D.; Anderson, M.G.; Price, D.A. y Burt, T.P., 1999. *Modelling flood in hydrologically complex lowland river reaches*. Journal of Hydrology 223, 85-106.
- Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (SSRH), del Sistema Nacional de Información Hídrica/Base de Datos Hidrológica Integrada (BDHI): <http://www.hidricosargentina.gov.ar/ AccesoBDHI.html>
- Taller Ecologista., 2010. *Humedales del Paraná. Biodiversidad, usos y amenazas en el Delta Medio*. Proyecto "Iniciativas sustentables en los humedales del Paraná Inferior", financiado por el Programa de Subvenciones para Ecosistemas (EGP) del Comité Holandés para la IUCN NL (Comité Nacional de los Países Bajos). Edición Inercia Comunicaciones. Rosario, Argentina. 68 pp.
- Werner, M.G.F., Hunter, N.M., Bates, P.D., 2005. *Identifiability of distributed floodplain roughness values in flood extent estimation*. Journal of Hydrology 314, pp. 139-157.
- Wilson, C.A.M.E.; Yagci, O.; Rauch, H.P. y Olsen, N.R.B., 2006. *3D numerical modelling of a willow vegetated river/floodplain system*. Journal of Hydrology 327, Issues 1-2, pp. 13-21.