

MODELACIÓN DE PROCESOS HIDRODINÁMICOS Y SEDIMENTOLÓGICOS EN PLANICIES DE INUNDACIÓN DE GRANDES RÍOS DE LLANURA

Ing. Marina L. Garcia⁽¹⁾, Dr. Ing. Pedro A. Basile⁽¹⁾, Dr. Ing. Gerardo A. Riccardi^{(1) y (2)}
mgarcia@fceia.unr.edu.ar - pbasile@fceia.unr.edu.ar - riccardi@fceia.unr.edu.ar

(1) Dto. Hidráulica y Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales (CURIHAM), Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura (FCEIA), Universidad Nacional de Rosario (UNR), (2) Consejo de Investigaciones de la UNR (CIUNR). Riobamba 245 bis, S2000EKE Rosario, Argentina.

RESUMEN

Se presenta en este trabajo la implementación y aplicación de un modelo hidrodinámico-sedimentológico cuasidimensional, físicamente basado y espacialmente distribuido, que simula numéricamente los procesos de inundación y sedimentación en sistemas de cauce-planicie en grandes ríos aluviales de llanura. El modelo se basa en esquema de celdas amorfas 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. El módulo sedimentológico acoplado permite simular el transporte y deposición del material fino de la carga de lavado, y obtener tasas de deposición sobre las planicies. El modelo es apropiado para la simulación dinámica a grande escala espacial y temporal, especialmente para flujos con variaciones temporales lentas de caudales y alturas. La aplicación se realiza sobre un tramo del río Paraná, entre Diamante y Ramallo, para reproducir y analizar los procesos hidro-sedimentológicos en el sistema cauce-planicie, en aguas medias y altas. Los resultados obtenidos, para crecidas ordinarias y promedios a largo plazo, indican que sobre la planicie aluvial, los depósitos varían de 6-28 millones ton/año, y se retiene 5-20% del material fino ingresante, donde anualmente la tasa de deposición promedio es de 0,5-13mm. Los 208km del conjunto cauce-planicie retiene entre 16-54 millones ton/año (15-40% de los sólidos ingresantes), y con eventos extraordinarios, llegan a depositarse de 30-155 millones ton/año, reteniendo hasta 60%. Se evalúa además el efecto en el valle de la CF Rosario-Victoria, donde fundamentalmente las modificaciones se producen aguas arriba, incrementando los niveles hasta 0,65m como máximo, produciendo mayores superficies anegadas por la elevación del pelo de agua en, aproximadamente, un orden de magnitud mayor de la recurrencia de los caudales máximos, y aumenta los tiempos de permanencia del agua en el valle hasta 35% para eventos extraordinarios, pudiendo incrementar las cotas de fondo por deposición de finos hasta 20%.

Palabras Clave: Modelación hidrodinámica-sedimentológica, deposición de sedimentos finos, grandes ríos aluviales de llanura, sistemas cauce-planicie, río Paraná.

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 (Ni-

cholas 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.

En los ríos aluviales la mayor atención ha sido focalizada en el estudio de procesos de transporte de los sedimentos que se encuentran en abundancia en el cauce, es decir, sobre el transporte del material del fondo. En efecto, estos últimos intervienen en la erosión y sedimentación de cauces aluviales, generando procesos que tienen una inobjetable importancia en la morfología fluvial. Sin embargo, recientemente ha ido ganando relevancia el rol que juegan los sedimentos finos, transportados en suspensión como carga de lavado, sobre la morfología de los ríos. En particular, los niveles de la planicie aluvial y el caudal de desborde hacia la planicie, están íntimamente relacionados con las tasas de sedimentación de carga foránea y con la celeridad de los cambios de configuración planimétrica (Narinesingh, 1999).

Además, el intercambio de sedimentos finos entre cauce principal y planicie aluvial induce sustancialmente procesos de sedimentación en esta última, determinando las tasas de su recrecimiento a largo plazo. La particularidad que presentan tales sedimentos finos de adsorber sustancias contaminantes (como ser: metales pesados, pesticidas, hidrocarburos poliaromáticos), hacen que las planicies aluviales puedan actuar como reservorios de sedimentos contaminados (Walling et al., 1996). Además, las excesivas concentraciones de sedimentos finos no solo producen perturbaciones morfológicas, alteraciones en la calidad del agua y en la calidad de los depósitos, sino que también pueden afectar negativamente a la dinámica de la comunidad biótica en ambientes fluviales (Soong, 1999). La predicción de la evolución morfológica de los ríos aluviales es importante para el estudio de impactos frente a cambios, a corto y largo plazo, ya sean naturales y/o debidos a la interferencia humana en los ambientes fluviales. En el área de aplicación, la mayoría de los estudios sobre los procesos de transporte de sedimentos se han realizado sobre el cauce principal (Paoli et al., 2000; Basile y Riccardi; 1998, 2002), o sobre un limitada área entorno a la transecta Rosario-Victoria (Serman & asociados, S. A., 2000), quedando escasos de análisis los procesos integrales en toda el valle de inundación, del sistema cauce-planicie.

El objetivo principal del presente trabajo es implementar un modelo apropiado para evaluar procesos de inundación, en valles aluviales de grandes ríos de llanura (conformación cauce-planicie), en grandes crecidas. Se plantea la calibración y validación de los procesos hidráulicos en el curso principal, secundarios y planicie aluvial. Sucesivamente, se ha desarrollado un módulo de simulación sedimentológica, denominado FLUSED (Basile et al., 2007), el cual se acopla al modelo hidrodinámico y permite la representación del transporte y deposición de sedimentos. En este trabajo se presenta la simulación hidrodinámica-sedimentológica de un extenso tramo del río Paraná, comprendido entre la ciudad de Diamante (Entre Ríos) y la ciudad de Ramallo (Bs. As.). En la posterior explotación de los modelos, se evalúan los impactos hidrosedimentológicos de una obra antrópica implantada sobre planicie de la zona. A su vez, se utilizan los mismos para predecir la evolución morfológica de la planicie de inundación, frente a crecidas extraordinarias, con y sin obras antrópicas.

DESCRIPCIÓN DEL MODELO HIDRODINÁMICO 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.

DESCRIPCIÓN DEL MÓDULO SEDIMENTOLÓGICO FLUSED

Al modelo hidrológico-hidráulico CTSS8 se le ha incorporado el cálculo de procesos sedimentológicos en forma físicamente basada y espacialmente distribuida. Se le ha acoplado el módulo sedimentológico, el cual está orientado a la simulación numérica de la dinámica del transporte y sedimentación de sedimentos finos, en sistemas fluviales formados por cauce principal-planicie de inundación de grandes ríos aluviales de llanura. Las ecuaciones que gobiernan la dinámica del flujo hídrico y del sedimento son representadas por medio del esquema de celdas interconectadas en un dominio bidimensional. Primeramente se resuelve la dinámica hídrica, obteniendo como resultados los caudales, velocidades, alturas de agua y demás variables que intervinieron en la hidrodinámica del escenario simulado.

Posteriormente, al aplicar el módulo sedimentológico, mediante la resolución de la propagación de sedimentos finos, los procesos espacialmente distribuidos de transporte y deposición de sedimentos son simulados en todo el sistema fluvial, constituido por el río principal y la planicie de inundación con sus respectivos cursos de agua. Se presentan a continuación las ecuaciones que se utilizan para describir la dinámica del sedimento.

Dado que el transporte de sedimentos preponderante en el fluido es el de los finos en suspensión, contenidos en la carga foránea, el modelo sedimentológico está basado sobre los mismos. El principal objeto de estudio es la planicie de inundación y el fenómeno predominante sobre ella es la sedimentación de los finos de la carga de lavado. Si bien la erosión y re-suspensión de partículas sobre el valle se da en lugares cercanos a los cursos de agua, o incluso en ellos cuando las velocidades aumentan, son fenómenos que pueden considerarse de efecto localizado, en determinados sectores. Como el enfoque es sobre grandes ríos, los fenómenos localizados no serán tenidos en cuenta, por lo cual no se calcularán los flujos de erosión o resuspensión de las partículas.

Dentro de las ecuaciones gobernantes de la dinámica sedimentológica se encuentran la ecuación de continuidad sólida cuasi-2D y la del flujo vertical de sedimentos, basada en la formulación de Krone (1962). La primera de ellas, para la j -ésima celda del modelo, se expresa como:

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

donde h es la profundidad del flujo hídrico [m], C_s es la concentración de sedimentos en suspensión [m^3/m^3], $A_{s,j}$ es el área superficial de la j -ésima celda [m^2], t es la coordenada temporal [s], $Q_{j,k}$ es el caudal líquido entre las celdas j y k –adyacente– [m^3/s], N es el número de celdas interconectadas con la j -ésima celda y ϕ_s es el flujo vertical de sedimentos asociado a deposición [m/s]. Dados los valores relativamente pequeños de tirantes, especialmente sobre la planicie de inundación, se considerará despreciable el almacenamiento de sedimentos en la columna de agua.

Cuando la velocidad media del flujo hídrico (U) es menor que la velocidad media para el inicio de sedimentación (U_{cd}), el flujo vertical de sedimentos está asociado a la velocidad de sedimentación de las partículas (w_s), y es expresado como:

$$\phi_{s,j} = C_s w_s \left[1 - \left(\frac{U}{U_{cd}} \right)^2 \right] \quad (2)$$

Si bien la configuración original del módulo FLUSED (Basile et al., 2007) contempla el efecto de la vegetación, no se va a considerar el atrape por la presencia de ésta, ya que se va a evaluar sólo el fenómeno de sedimentación neta, testeando los parámetros principales para la misma, que consisten en la velocidad de caída de las partículas (w_s) y la velocidad crítica de inicio de la deposición (U_{cd}).

Para la resolución numérica para obtener las tasas de sedimentación neta media temporal, y con ella calcular la variación en la cota del fondo, se toman como base los resultados de la modelación hidrodinámica realizada con el programa CTSS8, se explicita la función del flujo vertical de sedimentos $\phi_{s,j}$, y se la introduce en la ecuación de continuidad sólida. Para la resolución se utiliza un esquema implícito en la variable concentración de sedimentos en suspensión C_s , asegurando un sistema incondicionalmente estable en diferencias finitas (Cunge, 1975).

Dadas las magnitudes pequeñas de sedimentación en cada paso de tiempo, no se actualiza la cota del fondo, por lo que pueden tratarse desacopladamente este módulo sedimentológico con el hidrodinámico. El módulo FLUSED fue adecuado para su aplicación sobre la configuración de celdas amorfas, y adaptado a las condiciones particulares del dominio, con las simplificaciones indicadas precedentemente. Para más detalles sobre el módulo sedimentológico FLUSED ver en Basile et al. (2007).

Las concentraciones de sedimentos en suspensión C_s se determinan para el baricentro de cada celda utilizando el algoritmo implícito y sucesivamente se calculan el flujo vertical de sedimentos ϕ_s en el centro de cada celda, y posteriormente la variación de la cota de fondo debido a la sedimentación Δz_b y la tasa de sedimentación neta media temporal $\bar{\phi}_s$, asimismo, se calcula el transporte de sedimentos en suspensión Q_{ss} en el punto medio entre vinculaciones.

La condición de borde aguas arriba son concentrograma, en ppm, ingresante al dominio del modelo, es decir, las concentraciones de sedimentos sólidos suspendidos que ingresan, contemporáneas a los caudales externos de entrada (C_s - t). Las condiciones iniciales consisten en las concentraciones de sedimentos sólidos suspendidos iniciales, en ppm, de todas las celdas del modelo.

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.

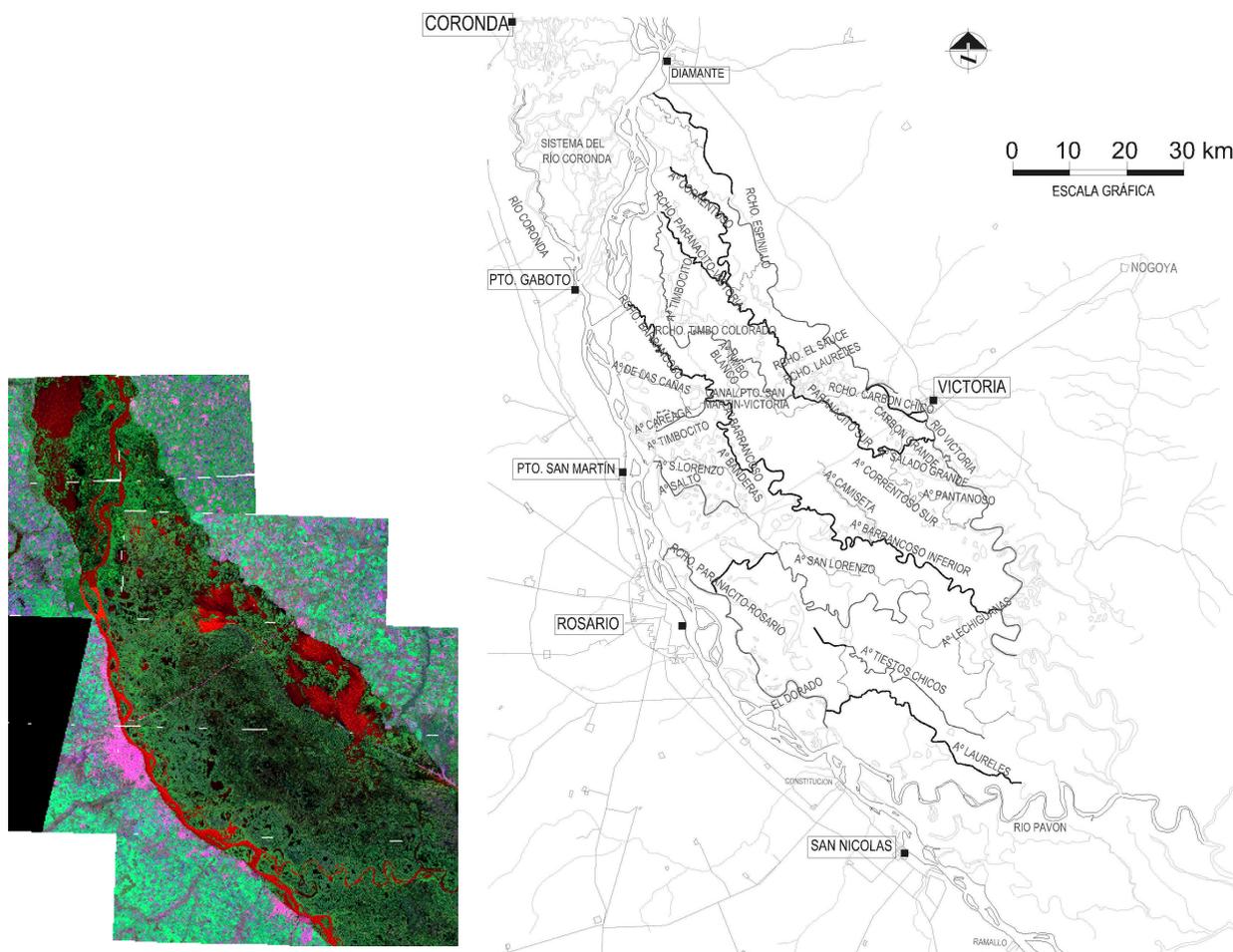


Figura 1. Mosaico de imágenes satelitales de la zona a modelar, del 18 y 25/01/2003 (izquierda) y la correspondiente área en estudio del Río Paraná, desde Diamante a Ramallo (derecha).

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.

En la conformación geomorfológica de la zona, los factores más relevantes son: la actividad fluvial del río mismo y los procesos de ingesión/regresión marina del Holoceno, las improntas dejadas en el relieve determinan unidades de características similares que se identifican en toda la región, llamadas geoformas. Las unidades que constituyen la llanura aluvial fueron clasificadas por Iriondo (1972) siguiendo un criterio genético, considerando la formación y evolución de la misma, a su vez Malvárez (1999) realiza un trabajo, desde la perspectiva ecológica, donde consideró a la región como un todo, y analiza la heterogeneidad ambiental interna y elabora una zonificación en función de unidades del paisaje. Sobre una combinación de ambos trabajos, se presentan en la Figura 2 las principales unidades geomorfológicas identificadas.

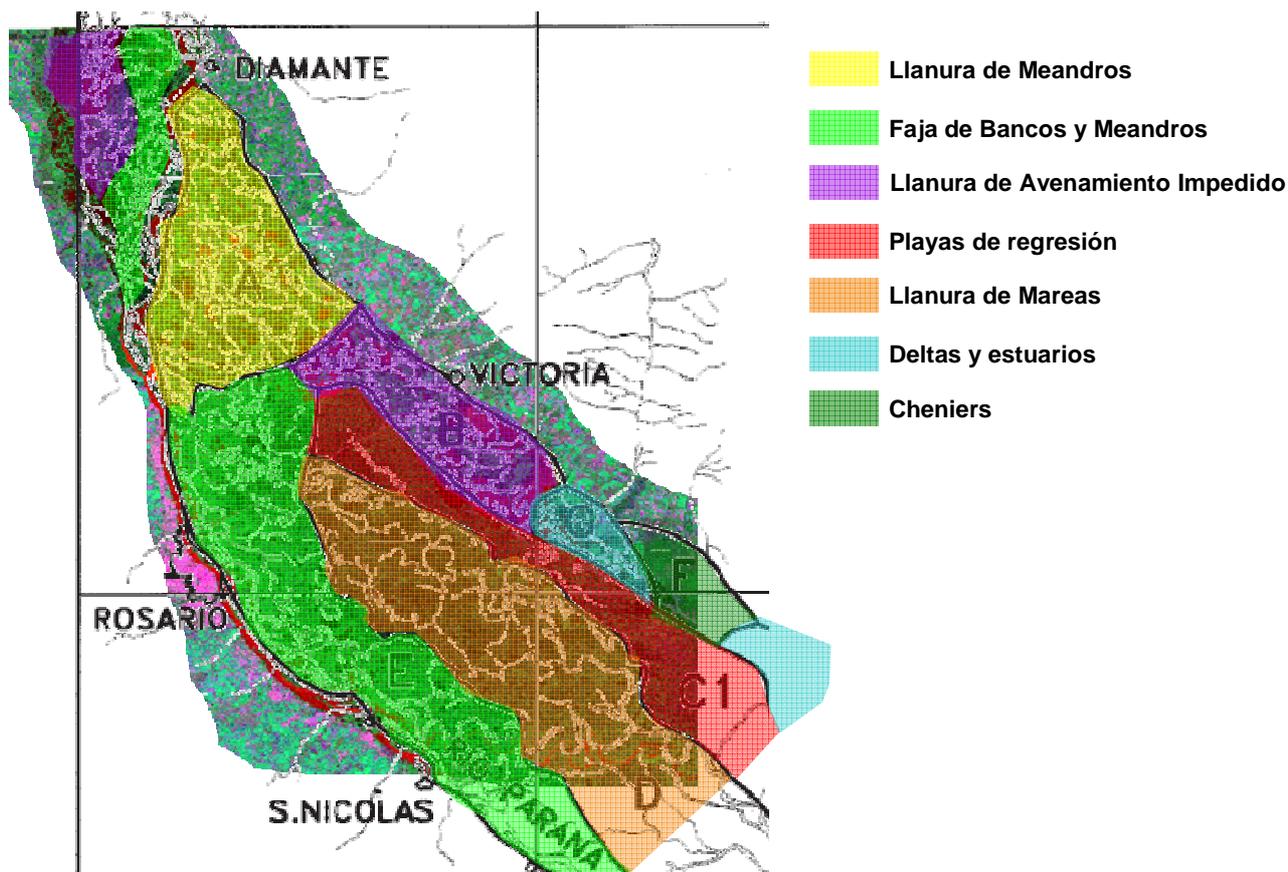


Figura 2. Combinación de unidades del paisaje y geoformas (modificado de Iriondo y Scotta, 1978 y Malvárez, 1999).

Se observa que la zona norte de la planicie está conformada por la llanura de meandros, lindera al cauce principal. Las unidades de la llanura de avenamiento impedido se corresponden con los cuerpos lagunares presentes en la zona, sobre la laguna del sistema Coronda y donde se sitúa la antigua ubicación del Paraná viejo, cercada por el albardón natural arenoso, encerrando los riachos Victoria. En la zona central de la planicie se encuentra la unidad de las playas de regresión, caracterizadas por la serie de depresiones lineales paralelas. Sobre el sureste de ésta última se encuentran las unidades de deltas y estuarios, de los depósitos originados en la desembocadura del A° Cle y de la afluencia del A° Nogoyá, y la llanura de cheniers intermedia, conformada por alineaciones sucesivas cordoniformes de arena gruesa. La unidad de la llanura de mareas es la que se presenta intermedia entre las playas de regresión y faja de bancos y meandros. Ésta última es la que mayor variedad en cuanto a geoformas contiene, incluye una parte de la llanura de mareas restante del anterior, tiene presencia de parte de la llanura de meandros finos, y por ser una de las unidades lindera al cauce principal, abarca la faja de bancos de depósitos asociada a éste, y por ende se la encuentra lindera al mismo, tanto sobre el sistema Coronda (también asociada al cauce principal de este mismo río) como sobre la planicie aluvial, incluso en franjas asociadas a los cursos importantes que por allí fluyen, como en el cruce del Paraná Pavón, sobre el sur.

La configuración geomorfológica existente va a condicionar la dinámica general del escurrimiento dentro del sistema. En épocas de aguas bajas, el flujo es encauzado y se identifican lagunas que pueden conectarse con los mismos. El valle se “carga” de agua principalmente a través de los cursos que tienen origen en el cauce principal, especialmente, para la zona en estudio, cuando éste cruza toda la planicie hacia la margen santafecina. Según Zapata (1999), el desborde de margen izquierda se produce en varias ubicaciones a lo largo del albardón, el agua desborda lateralmente en una especie de vertedero que se presenta en la depresión o ausencia del albardón, y así ingresa al valle, adquiriendo una dirección definida de penetración. Las ubicaciones de esos desbordes se corresponden con nacientes de arroyos y riachos de existencia permanente: Espinillo, Paranacito-Victoria, Barrancoso, Careaga, San Lorenzo, Paranacito-Rosario. Las trayectorias líquidas, en su mayor parte, se alinean con las direcciones medias de los cursos permanentes, aunque se producen algunas desviaciones bien definidas que no tienen contrapartida en aguas bajas: desde el Barrancoso hacia los Timbó (afluentes del Paranacito-Victoria), desde los Timbó hacia el área de drenaje que confluye a La Camiseta, desde el San Lorenzo al Barrancoso, etc. La mayor concentración de corrientes, a la altura de Rosario, se da en la zona comprendida entre el Paranacito-Victoria y la barranca entrerriana. Estos cursos más –en menor medida- las precipitaciones en la zona, son los que alimentan las lagunas. Dentro del sistema Coronda, principalmente hay aportes hacia la gran depresión central existente, y se desarrolla encauzado el flujo sobre el río del mismo nombre; los aportes hacia el cauce principal del Paraná son pequeños, a través del albardón sobre la margen derecha.

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. En aguas altas, en el cauce principal el nivel del pelo de agua lógicamente se eleva a lo largo de todo el tramo en cuestión, pudiendo anegar parte o por completo las islas y zonas bajas que forman parte del mismo. Según los desbordes que se presenten –en función de la situación- y el caudal que fluya, el pelo de agua va a tener distintas pendientes longitudinales. Sobre el sistema Coronda, se colmata la depresión central y causa aportes importantes con desbordes al cauce principal sobre la margen derecha.

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).

Características sedimentológicas

El río Paraná en el tramo en estudio, tiene un gran contenido de sedimentos en suspensión, se estima que, en promedio, su carga es de más de 100 millones de toneladas por año. La fuente dominante del material fino que predomina en el río es la cuenca alta del río Bermejo, que tributa al río Paraguay, y en las cercanías de Confluencia, hace su descarga en el Paraná. Su aporte es de aproximadamente el 80% de los sólidos presente en esta zona en estudio, aunque su contribución líquida apenas represente aproximadamente el 5%.

De las distintas formas en que son transportados los sedimentos en el río, los que conforman la carga de fondo y los de fondo en suspensión están formados por el material del lecho o cauce, mientras que la carga de lavado está formada por el material que proviene de la erosión de suelos. La concentración de esta última, está determinada por la cantidad aportada por la corriente, y no por la capacidad de ésta para transportarla.

Los sólidos que conforman la carga de fondo y en suspensión, para el tramo que se estudia, se reparten en proporciones aproximadas, en función del tamaño del grano, como sigue: 28% de arcillas, 56% de limos y 16% de arenas (Pittau et al., 2005). De éstos, aproximadamente el 90% se transportan en suspensión (compuesto por 31% de arcillas, 62% de limos y 7% de arenas), y el 10% restante constituye la carga de fondo. Los limos y arcillas, en conjunto, forman la carga de lavado, que representan el 93% aproximadamente de la carga total suspendida. La carga en suspensión varía según el período que se considere, tanto en composición como en cantidad, por el hecho de que depende de las descargas sólidas del sistema fluvial y cómo éstas se combinen con los aportes líquidos de los principales afluentes. Este material

de la carga de lavado es el principal responsable de los cambios en las cotas de fondo de la planicie aluvial, al depositarse los mismos cuando la velocidad del escurrimiento disminuye.

De la carga sólida que contiene el río Paraná, específicamente el cauce principal, los materiales de granulometría más gruesa (arenas, limos gruesos y medianos) decantan mayoritariamente en la zona del albardón del cauce y adyacencias, al producirse desbordes, y luego al distanciarse del mismo se encuentra disminución del tamaño de las partículas, al reducirse las velocidades de escurrimiento (Serman & Asociados S. A., 2000).

Los sedimentos suspendidos en la zona en estudio constituyen la carga sólida principal que ingresa en el sistema, cuantificándose la carga de lavado en aproximadamente 115 a 145 millones t/año. Para el análisis de las deposiciones, sobre la planicie aluvial los escurrimientos de agua se generan por desbordes de los cursos principales, siendo la carga foránea la que subsiste a estos mecanismos, y es la principal fuente de provisión sólida al sistema, por lo que los estudios se concentran sobre el material fino. Como el análisis a realizar es fundamentalmente sobre la planicie, los principales fenómenos sobre la misma son los de deposición, por lo que no se van a tener en cuenta las erosiones ocurridas.

Las concentraciones de sedimentos finos sobre el área estudiada varían –estacionalmente- entre 50 o 60 mg/l hasta valores de 500 o 600 mg/l en los picos de caudales sólidos (que se dan entre marzo-abril-mayo). Los valores medios anuales están dentro del intervalo de los 150 a 250 mg/l. Además, las concentraciones dependen del lugar considerado, ya que sobre el cauce principal, los indicados son los valores típicos, sobre los que se han efectuado la mayoría de las mediciones, y sobre la planicie, los valores son definitivamente menores, se estima que por debajo de los 100 mg/l, las mediciones realizadas en esta zona fueron muy aisladas.

APLICACIÓN DEL MODELO HIDRODINÁMICO

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 3, 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).

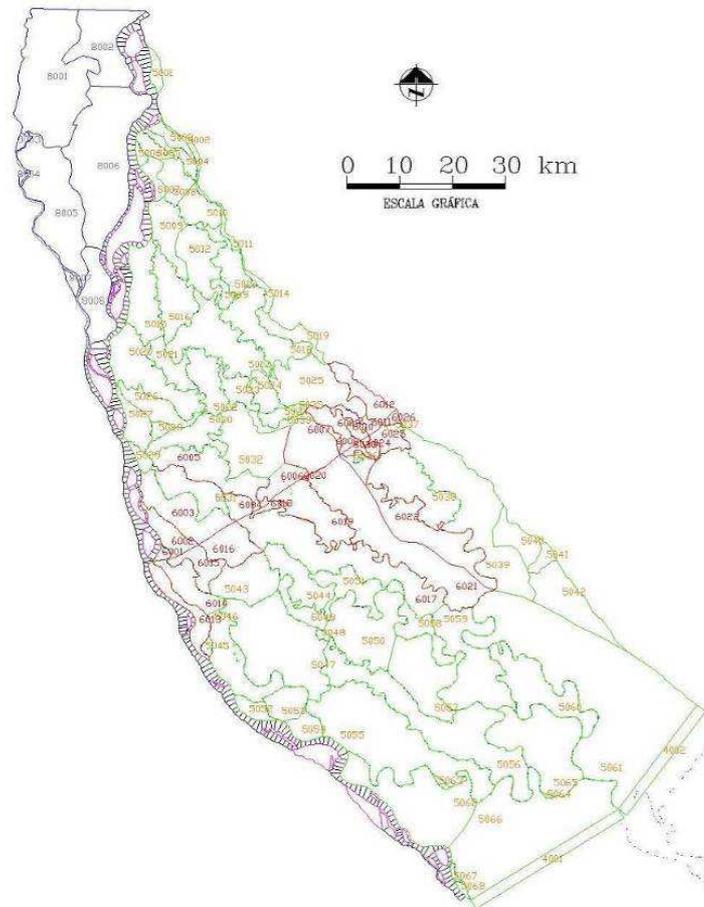


Figura 3. Visualización de la constitución del modelo matemático.

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 4, 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.

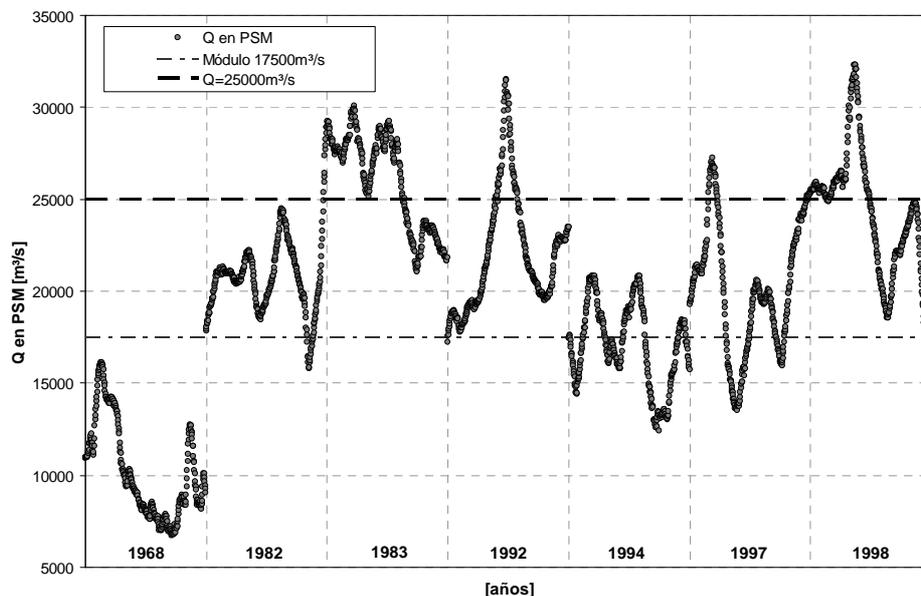


Figura 4. Hidrogramas anuales en la sección del cauce principal frente a PSM, correspondiente a las crecidas de 1982-1983; 1992; 1997-1998, aguas medias de 1994 y para aguas bajas en 1968.

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 5.

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

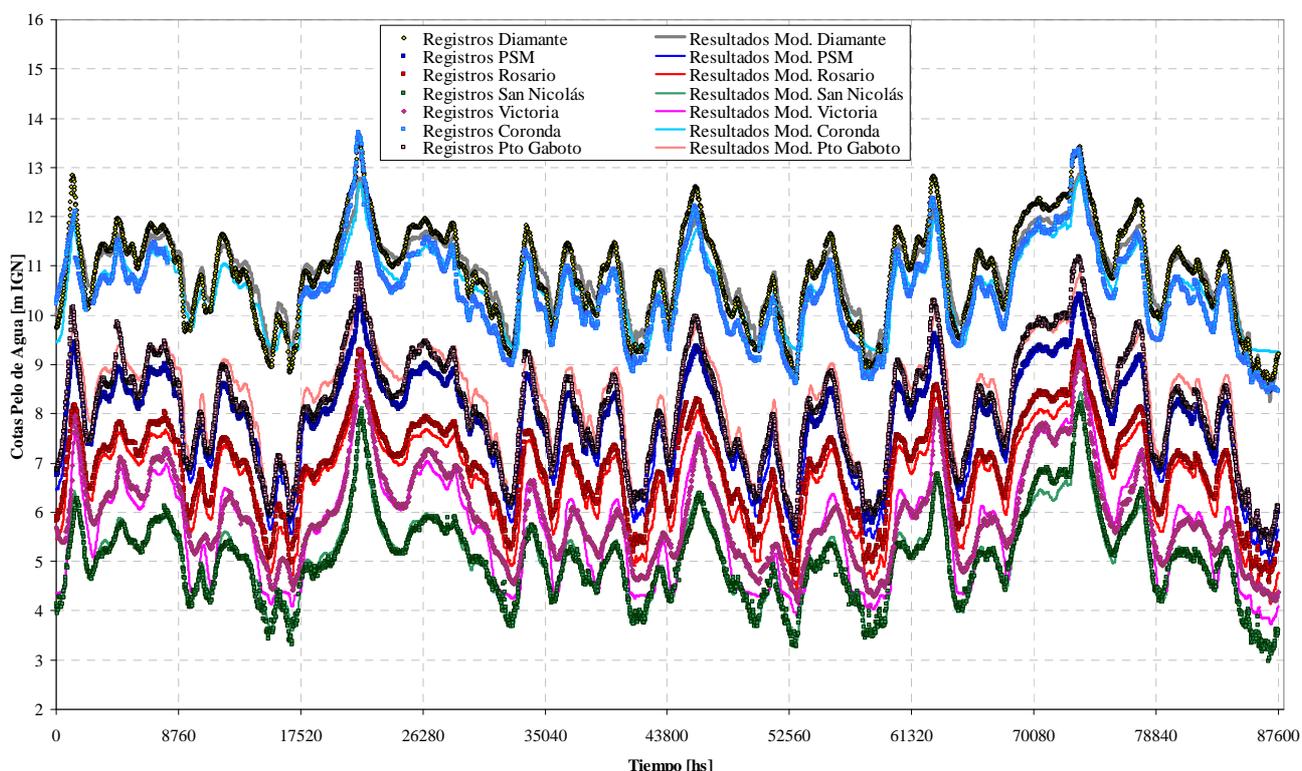


Figura 5. Comparación de limnigramas calculados y observados en los puntos de control, para el período 1990-99.

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 6 donde se presenta el sector que es reconfigurado.

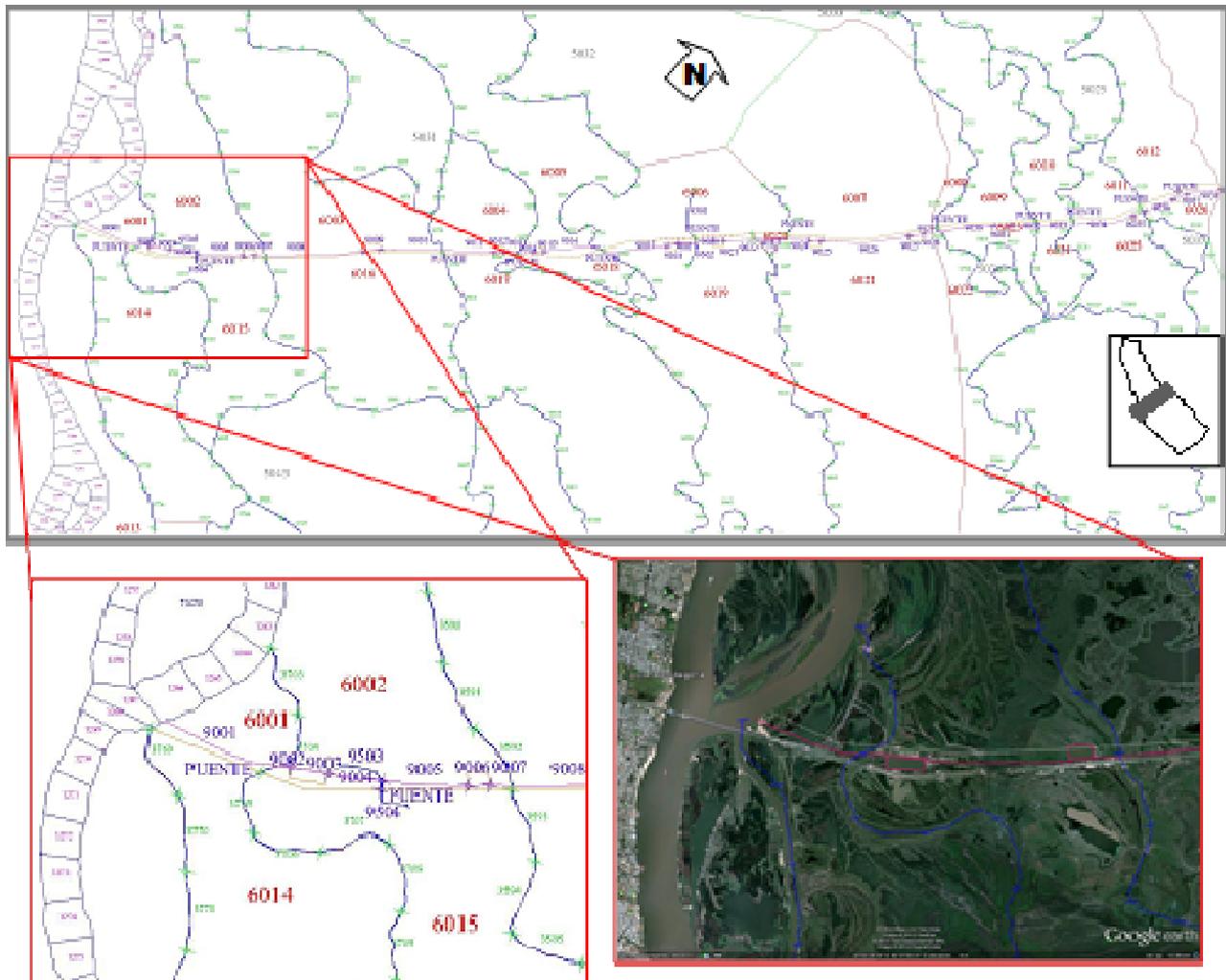


Figura 6. Sector del modelo con la incorporación de la Conexión Física Rosario-Victoria.

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-Agosto 2010 (calibración) y 2000-Agosto 2010 (validación). (*) Evaluado sólo para el período a partir de 2007, ya que no pudo conseguirse los registros anteriores.

	2007-Agosto 2010 (calibración)	2000-Agosto 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 Agosto 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 Agosto 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.

EXPLOTACIÓN DEL MODELO

Se compararon los resultados de las corridas, para el período 2000-Agosto 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 recopilaban 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 7; 8; 9 y 10.

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.

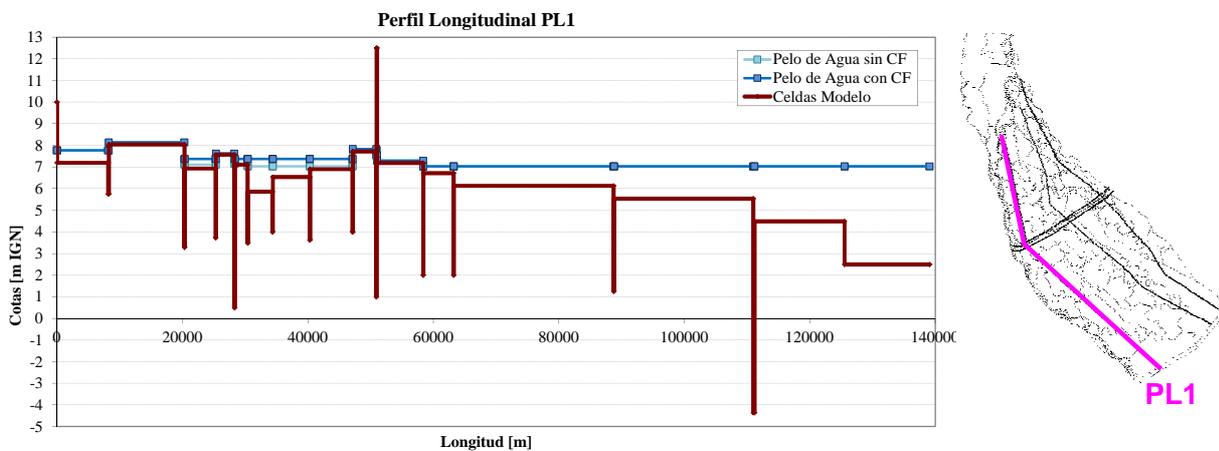


Figura 7. Perfil longitudinal PL1, con las cotas del pelo de agua, sin y con la CF, para el pico de la crecida de 2007.

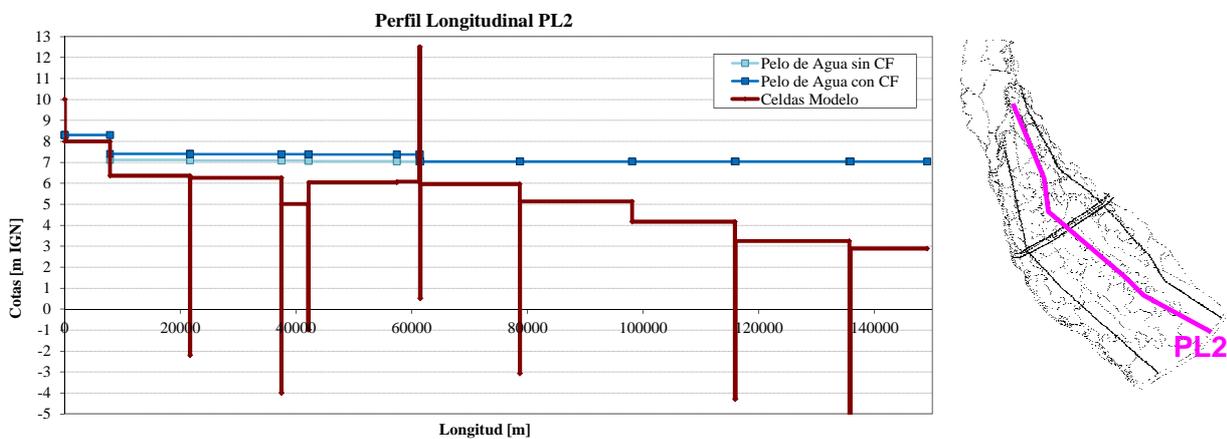


Figura 8. Perfil longitudinal PL2, con las cotas del pelo de agua, sin y con la CF, para el pico de la crecida de 2007.

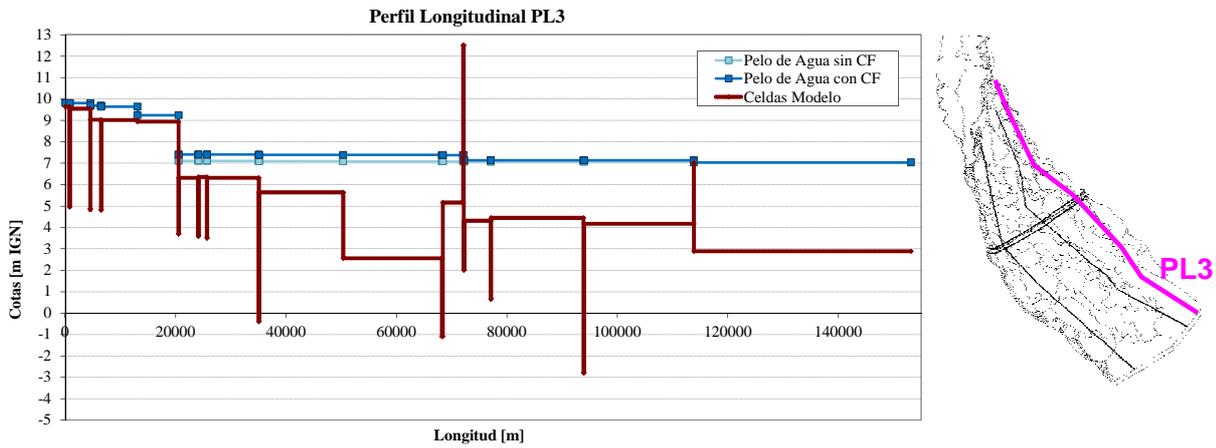


Figura 9. Perfil longitudinal PL3, con las cotas del pelo de agua, sin y con la CF, para el pico de la crecida de 2007.

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.

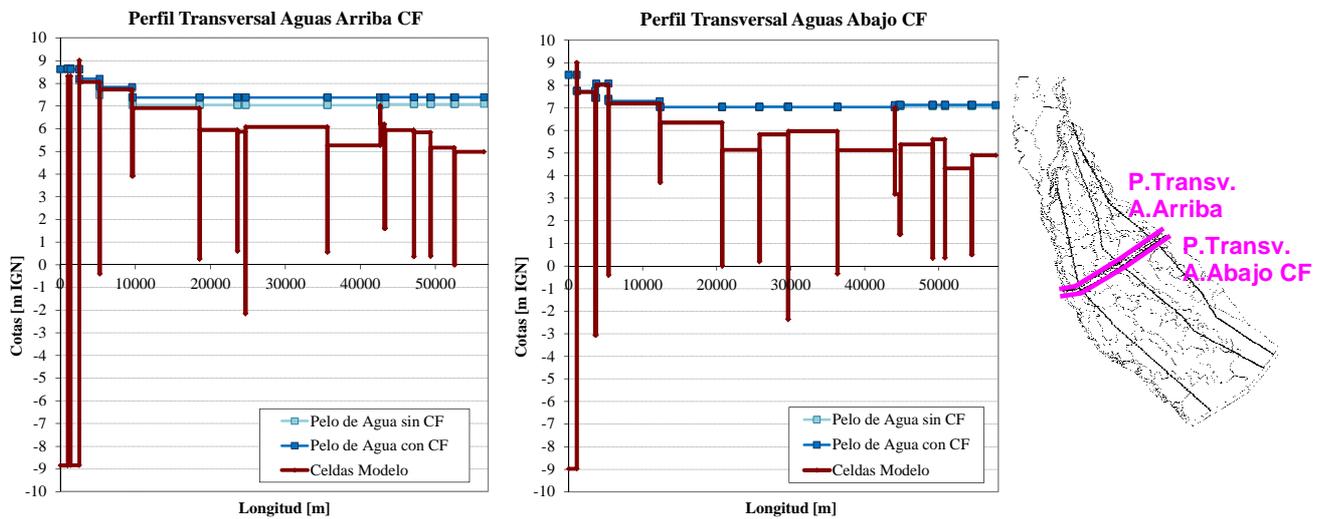


Figura 10. Perfiles transversales, Aguas arriba y Aguas Abajo de la CF, con las cotas del pelo de agua, sin y con la CF, para el pico de la crecida de 2007.

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 11, 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 11, 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.

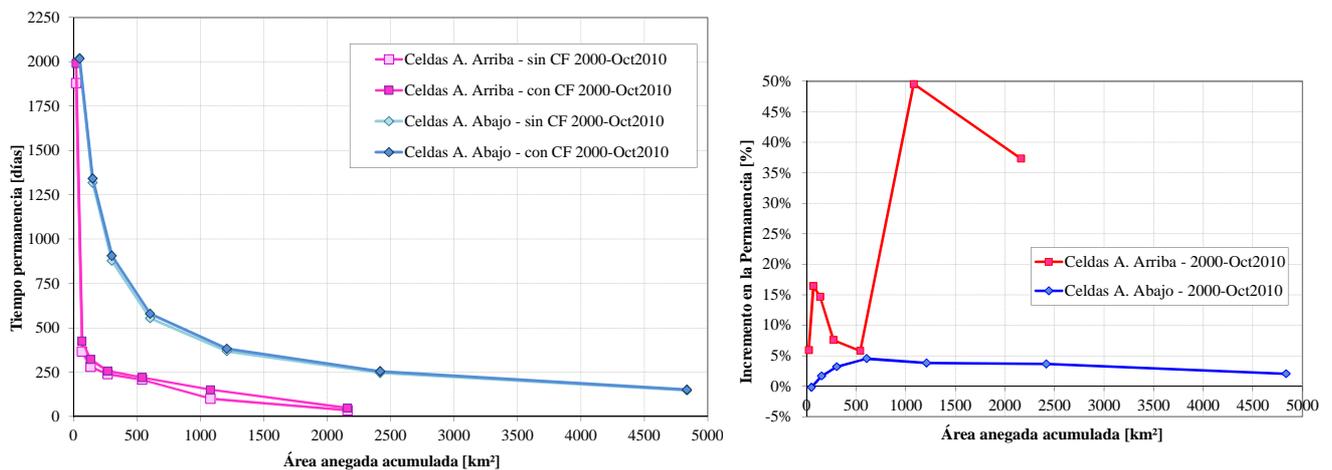


Figura 11. Curvas de Permanencias vs. Área superficial anegada (izquierda) y del Porcentaje de Incremento en la Permanencias del agua (derecha), ponderada para el conjunto de Celdas Aguas Arriba y Aguas Abajo, período 2000- Octubre 2010, sin y con la presencia de la CF.

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.

APLICACIÓN DEL MÓDULO SEDIMENTOLÓGICO

Condiciones iniciales y de borde

Para la simulación del transporte y deposición de sedimentos sobre la zona en estudio a través del módulo FLUSED, se deben definir datos de ingreso, que los principales son: concentrograma Cs(t) en borde aguas arriba, velocidad de caída de la partícula (deq) ws, velocidad crítica para el comienzo de la deposición Ucd, así como también se debe precisar la porosidad del sedimento, peso específico de la partícula, coeficientes de peso para cálculo en esquema implícito, las concentraciones iniciales, etc.

Otro de los requerimientos para realizar las simulaciones sedimentológicas, son las condiciones iniciales del sistema. Se debe indicar para cada celda la concentración inicial en el flujo de agua, desde lo cual se puede contabilizar la cantidad de sedimentos iniciales presentes en el sistema.

Para evaluar la entrada de material sólido, al no contar con registros de aforos sólidos y líquidos continuos cercanos al borde aguas arriba, se elabora un diagrama temporal de concentraciones sintético, que represente de manera acorde al material fino que ingresa al sistema. En base al análisis de datos existentes, el concentrograma confeccionado, además de basarse en máximos, mínimos, promedios y distribución anual revisada, tiene que ser acorde con la cantidad de sedimentos transportados totales en el año. Para cada ingreso de agua planteado, se confecciona un concentrograma, y es aplicado de la misma forma sobre cada año simulado, sobre las celdas del dominio aguas arriba.

En la página de la SSRH están publicados aforos líquidos y sólidos - gruesos y finos- de algunas estaciones en los cursos de agua del país. Al contar con estos aforos sólidos, y al ser escasos los registros completos anuales, se analizan los mismos a los fines de poder inferir una distribución anual de la concentración de finos, para así conformar un concentrograma sintético de entrada al modelo, aguas arriba a la altura de Diamante (km 533 de la vía navegable). El mismo tendrá que estar compuesto por dos, uno que se

corresponda con la entrada de caudales en el cauce principal, cercano a la mencionada ciudad entrerriana, y otro perteneciente al sistema del río Coronda, sobre la margen santafesina del sistema cauce-planicie. Al ser el río Bermejo la mayor fuente de sólidos (a través del río Paraguay), se analizan los aportes de los mismos a la altura de Confluencia, donde cambia radicalmente la concentración de sedimentos del río. Allí se produce la descarga al Paraná del río Paraguay, y que éste a su vez, a 75 km aproximadamente aguas arriba tiene la desembocadura del río Bermejo. Las estaciones que cuentan con aforos sólidos (además de líquido) en esta zona (Figura 12) son: sobre el río Bermejo, lugar El Colorado (Estación 2602); sobre el río Paraguay, lugar Puerto Pilcomayo (Estación 2606); y sobre el río Paraná, lugar Itatí (Estación 3862).

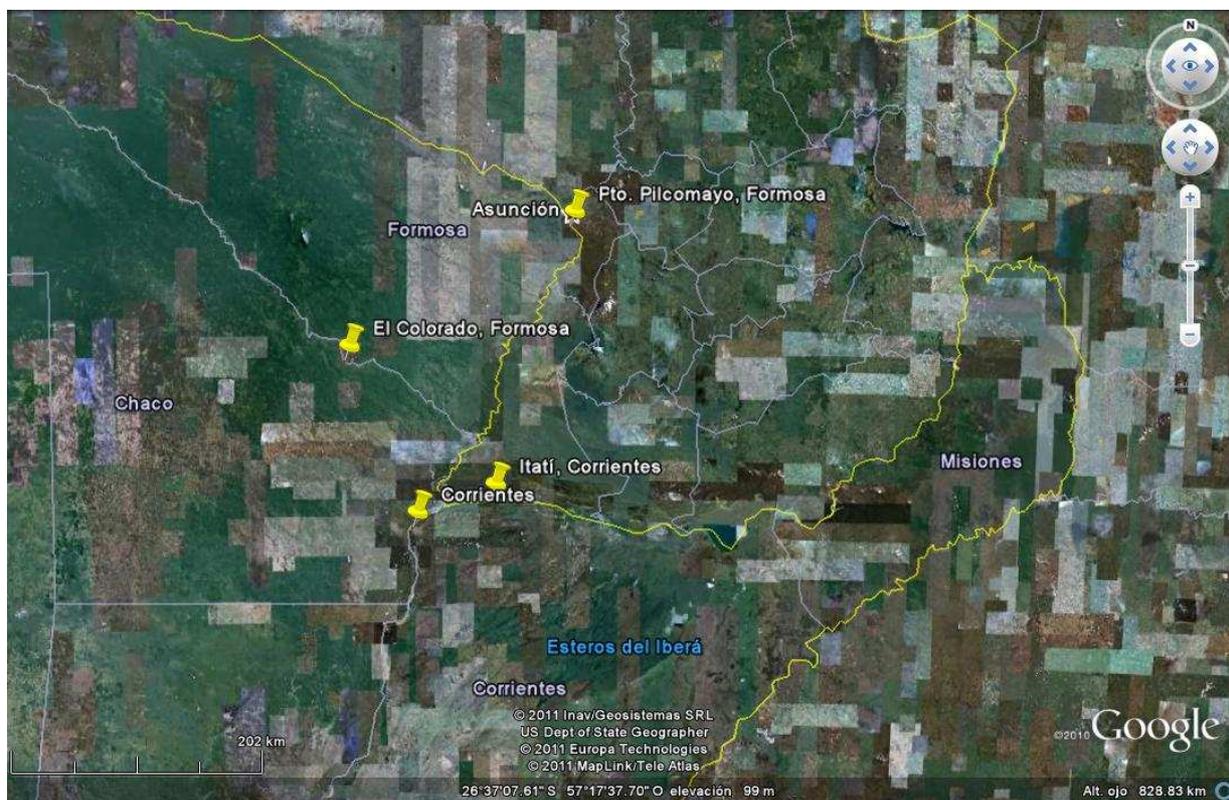


Figura 12. Imagen satelital Google Earth® para ubicación de las estaciones de registros de la SSRH.

Los valores publicados son de aforos son tomados aproximadamente una vez por mes. Se han agrupado temporalmente los que corresponden a los finos de las tres estaciones mencionadas, y se efectúa la suma. Los mismos usualmente no son aforos del mismo día, pero se considera que no hay gran variación si los registros son en días cercanos entre sí. Se logran de esta manera tener un valor mensual de caudal de sólidos finos, para cada año. Se debe indicar que aquellos meses en que no se cuenta con el aforo de las tres estaciones, no es tomado en cuenta. Los caudales sólidos se agrupan según los meses del año para visualizar la variación anual de los mismos. Para cada mes se realiza un promedio de los valores sumados (sólo de aquellos en los cuales se cuenta con los tres registros). En la ciudad de Corrientes (estación 3805), de los registros de caudales líquidos diarios de 1903-2009, se obtiene el hidrograma de los caudales medios mensuales. Con estos valores de caudales líquidos y los de caudales sólidos obtenidos anteriormente, se realiza una estimación de las concentraciones promedio mensuales de sólidos finos.

Se computa la cantidad anual promedio de los mismos, resultando de 108,3 millones de toneladas, la concentración máxima se presenta en Marzo, con un valor de 497 mg/l, los valores mínimos registrados son muy superiores a los encontrados a partir de estos aforos (de 14 a 42 mg/l), por lo que se considera prudente elevar la concentración mínima calculada promedio a 60 mg/l. Todos estos valores máximos, medios y mínimos son acordes con los registros encontrados en la zona. Así, se elabora un diagrama genérico de variación diaria de la carga de sedimentos finos, se considera un desfase temporal del pico de concentraciones, producto del traslado desde la ciudad de Corrientes hasta la altura de la localidad de Diamante. Con este concentrograma conformado (Figura 13), el valor medio anual de la carga de lavado, da como resultado 182,2 mg/l, resultando dentro del rango de concentración media anual estimada entre 150 a 250 mg/l.

Para la entrada de sedimentos en Coronda, la máxima concentración estimada por Amsler et al. (2007) en dicho río es de 195 mg/l, y la carga total de lavado se estipula dentro del entorno de 4,7 a 8,6 millones de toneladas anuales. Se va a considerar una distribución similar a la de Diamante, tomando valores diarios proporcionales, teniendo fijo el mismo valor mínimo de concentración de sedimentos y tomando el máximo indicado anteriormente. La variación diaria en el año hipotética se puede visualizar en conjunto a la de Diamante, en la Figura 13.

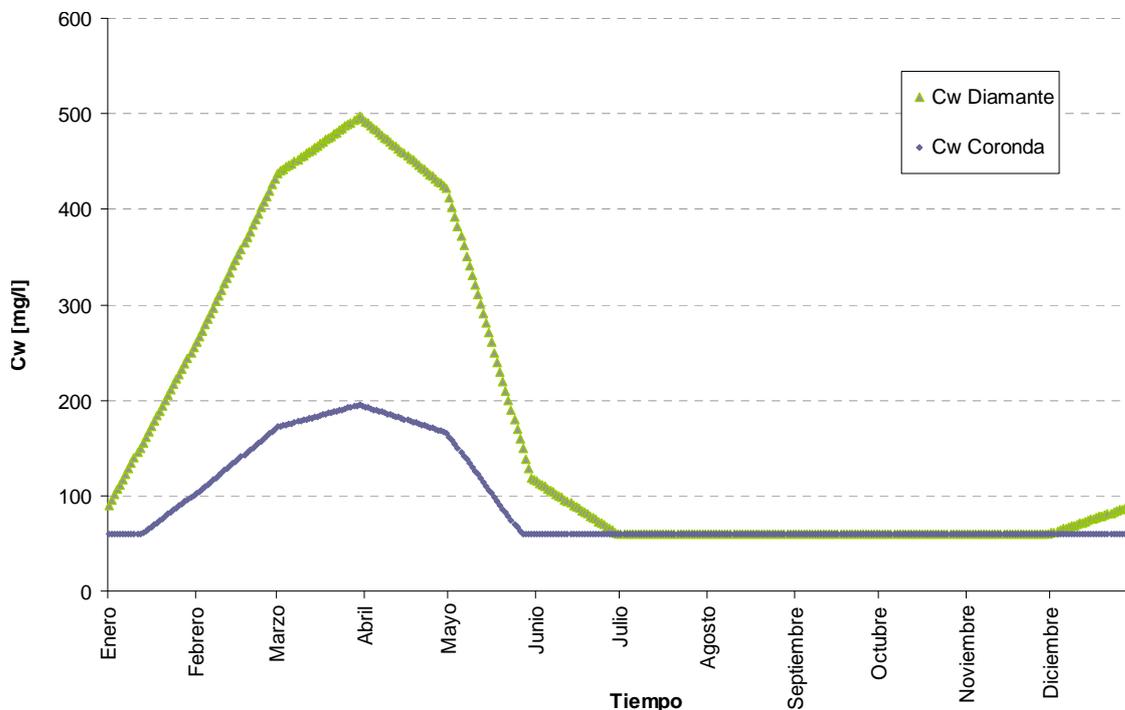


Figura 13. Concentrogramas sintéticos de entrada generados para el borde aguas arriba del modelo en Diamante y Coronda.

Para verificar la factibilidad de estos concentrogramas, se calculan para cada lugar de ingreso –sobre el cauce principal del Paraná en Diamante y Coronda- y para las décadas 1980-1989 y 1990-1999, la cantidad de sedimentos suspendidos totales anuales, teniendo en cuenta los caudales líquidos de ingreso en cada lugar, del modelo hidrodinámico. Se realiza luego un promedio por cada década, indicando adicionalmente un promedio diferenciado para los años sin crecidas importantes. Sobre el cauce principal del Paraná (Diamante), el promedio anual ('80: 112,7 millones ton/año – '90: 113,5 millones ton/año), aún considerando las crecidas históricas, dan dentro del rango establecido, incluso los máximos y mínimos también. Para el sistema Coronda, los máximos y mínimos calculados dan fuera del entorno establecido (mínimos: 3,36 millones ton/año ('80) y 3,97 millones ton/año ('90) – máximos (sin crecida): 12,74 millones ton/año ('80) – 16,41 millones ton/año ('90)), aunque los valores no se exceden en demasía a los mismos, los promedios calculados ('80: 8,16 millones ton/año (sin crecida) – '90: 9,82 millones ton/año (sin crecida)), están sobre el máximo indicado, pero no muy lejano a éste, por lo que se considera aceptable.

Recientemente, desde Abril 2012, la SSRH ha publicado registros de aforos sólidos –de gruesos y finos-, de las secciones del Túnel subfluvial, sobre el cauce principal del Paraná, cercano a la ciudad homónima, hecho que se sucedió posterior a la utilización del modelo hidrodinámico y el acople del módulo sedimentológico, y aunque no son sobre la zona de estudio, los mismos sirven para chequear entornos de trabajo de concentraciones y reforzar los valores adoptados como sintéticos. Si bien los aforos de las secciones no son exactamente en las inmediaciones de los bordes del modelo, 70 km aguas arriba, pueden tomarse como referencia las concentraciones de los sedimentos finos, para el concentrograma sintético de entrada realizado aguas arriba sobre el cauce principal, chequeando la distribución mensual de las concentraciones, en especial para aquellos meses donde se da la simultaneidad de grandes caudales líquidos y sólidos –principal fuente de sólidos del sistema-, que sería desde Febrero a Mayo. Considerando los aforos de sedimentos finos en la sección del Túnel Subfluvial (27/09/1993 a 04/01/2012) sobre el cauce principal del río Paraná (km 603 de la vía de navegación), y con los aforos líquidos, se han llevado los registros a concentraciones de sedimentos finos, luego se han agrupado los registros por mes. Para comparar los mismos con el concentrograma

El tipo de sedimentación que se considera es de los finos en suspensión, que son los que ingresan a la planicie y conforman la principal fuente de los depósitos y modificación del relieve en la misma. De realizar una revisión bibliográfica sobre la temática de sedimentación en planicies de inundación, se extrae que valores encontrados para la velocidad de caída de la partícula están entre 0,1 a $6,8 \times 10^{-5}$ m/s, y en trabajos realizados localmente sobre sistemas lagunares del Paraná Medio, la w_s es de 1×10^{-6} m/s para arcillas, 2×10^{-5} m/s para limos finos y 4×10^{-4} m/s para flocs (aglomerado de partículas). En cuanto a la velocidad de inicio de la deposición, en la bibliografía se registran valores entre 0,01 a 1 m/s, y dentro de los trabajos locales, se informan velocidades de 0,15 a 0,20 m/s. Los valores plausibles de cada variable para el análisis de sensibilidad elegidos fueron: $w_s = 1 \times 10^{-6}$ m/s - 1×10^{-5} m/s - 1×10^{-4} m/s - 4×10^{-4} m/s - 1×10^{-3} m/s,

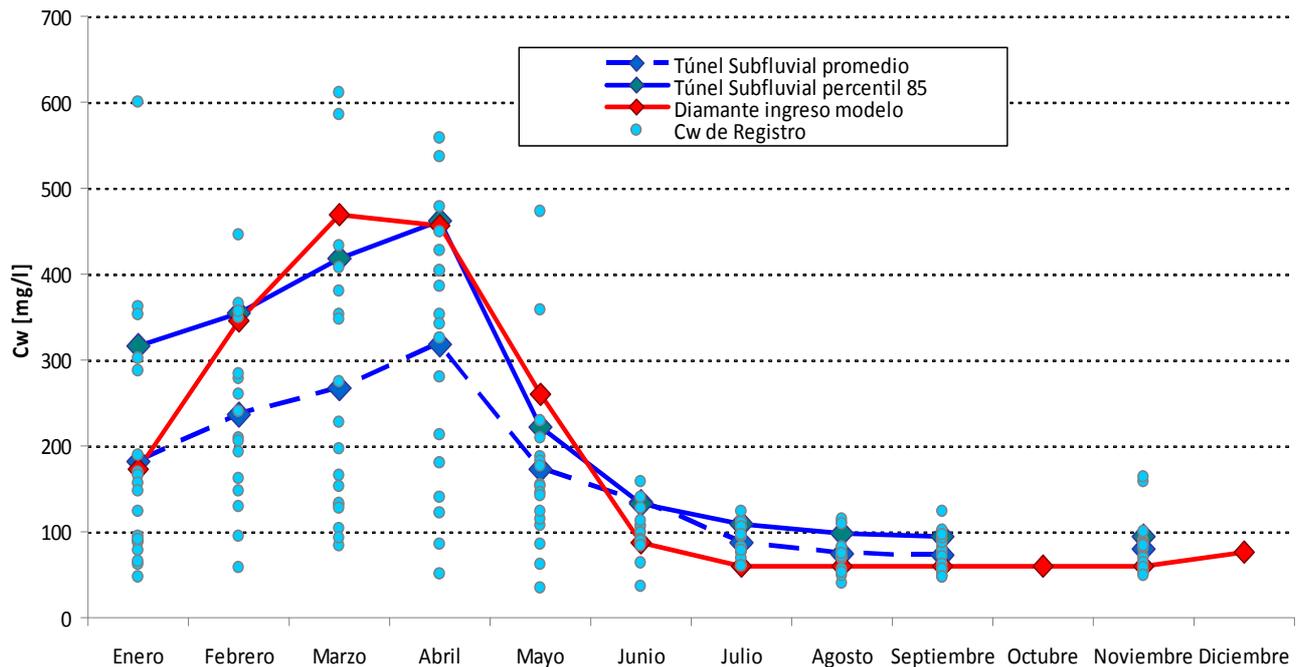


Figura 14. Concentraciones de sedimentos finos a partir de registros de aforos sólidos en Sección Túnel Subfluvial, distribución anual de promedios mensuales y percentiles 85, comparados con Concentrograma sintético adoptado.

En el concentrograma sintético elaborado, los valores indicativos mensuales están contenidos dentro del espectro de las concentraciones producto de los registros de los aforos; en particular, para los meses donde se producen los picos de sólidos –Febrero a Mayo-, el ingreso sobre Diamante planteado queda por encima del promedio y cercanos a los registros más elevados, bastante concomitante con los valores calculados de los percentiles 85; y para los meses de menores registros –Junio a Enero-, el concentrograma queda sobre los inferiores, siendo incluso ligeramente menor que el promedio mensual obtenido. De todos modos, las características generales del comportamiento de la concentración de carga de lavado son adecuadamente capturadas por el concentrograma sintético. En particular, las más relevantes, como la forma, tiempo al pico, concentración pico promedio, rama de descenso y magnitud total anual del aporte sólido. Se considera el concentrograma sintético más que aceptable para una evaluación global de la sedimentación sobre la planicie de inundación, especialmente en crecidas.

En las simulaciones sedimentológicas se va a agregar la representación del sedimento, ya que el mismo va a ser considerado representado a través de sus características sedimentológicas, que indican un diámetro característico del mismo. Las variables particulares del material que van a considerarse son: la velocidad de caída del sedimento y la velocidad crítica de deposición. Para cada una de éstas, se toman rangos plausibles y se realiza un análisis de sensibilidad, a través de las primeras simulaciones sedimentológicas. Los resultados conducirán a la definición de las características singulares del sedimento inferido reinante en la zona analizada.

donde el deq según Stokes indica partículas desde limo grueso a arcillas medianas, y para $U_{cd} = 0,10 \text{ m/s} - 0,15 \text{ m/s} - 0,20 \text{ m/s}$.

Se han tomado dos años testigos para el análisis de sensibilidad, uno correspondiente al año medio tipo, para el cual fue elegido 1994, y el otro de crecida estándar, 1997, donde se presenta gran volumen de agua sobre la planicie, sin ser la misma extraordinaria, siendo la distribución de los caudales mensuales la típica analizada, con el pico de caudales líquidos contemporáneo con el de caudales sólidos, sobre Marzo-Abril.

De los resultados obtenidos en el análisis de sensibilidad realizado, en cuanto a la velocidad crítica de deposición U_{cd} , se adopta igual a $0,15 \text{ m/s}$, ya que no hay grandes variaciones en su consideración, tomando ésta como la media entre los valores analizados, y la que proporciona resultados medios. En cuanto a la velocidad de caída, el orden de magnitud de la incertidumbre en los valores de ésta, en condiciones tan complejas como las que imperan en la planicie inundable, no hace factible establecer con precisión un valor determinado, por lo que se adoptará un rango posible a evaluar, descartando la velocidad menor, que dio sedimentaciones muy escasas, y la mayor daba excesivas deposiciones. Por lo expresado, viendo las concentraciones de sedimentos plausibles y de velocidades de caída, se decide analizar resultados para el rango de w_s desde $0,00001$ a $0,0004 \text{ m/s}$, que se asociarían a deq correspondientes a arcilla gruesa y limos medianos, respectivamente, incluyendo los flóculos que puedan tener w_s más lentas y diámetros más grandes. Luego, dentro de los parámetros necesarios para las simulaciones, se han adoptado: porosidad de $0,45$ para evaluaciones anuales, $0,44$ períodos bianuales y $0,40$ largo plazo (10 años), y concentración inicial baja en las celdas del modelo $C_s(t=0, x) = 50 \text{ ppm}$, para que no se produzcan grandes sedimentaciones iniciales hasta la entrada en régimen del modelo.

Aplicación del módulo sedimentológico

De las características sedimentológicas del material de sólidos fino de la carga de lavado que se han seleccionado, w_s y U_{cd} , los valores resultantes las simulaciones del transporte y deposición para un año de caudales medios y uno de crecida típico. A su vez, se evalúan las deposiciones de tres décadas: 1980-89; 1990-99 y 2000-Ago2010, esta última con ambas configuraciones sin y con la obra de la CF Rosario-Victoria. Éstas fueron de muy variadas sucesiones de crecidas-estiajes, y con sus análisis, se puede llegar a estimar valores generales promedios anuales indicativos de sedimentación a largo plazo. También se comparan las diferencias que sobrevienen a raíz de la implementación del terraplén vial.

Desde los resultados numéricos de las simulaciones hidrodinámicas para 1994, 1997, 1980-89; 1990-99; 2000-Ago2010 sin CF y 2000-Ago2010 con CF, se aplica el módulo sedimentológico FLUSED. Para cada caso, se realizan tres corridas, que surgen de considerar cada una de las w_s planteadas. El intervalo temporal de cálculo utilizado fue de $\Delta t = 24$ horas (un día), hasta cumplir con el tiempo de modelación total establecido. El tiempo de impresión de resultados también es de 24 horas. El tiempo real que insumió en promedio la simulación de los períodos de diez años, fue entre 10 a 12 minutos, según la corrida, y para cada año aproximadamente el tiempo fue de 1 a 2 minutos, trabajando en un equipo Intel Core 2 Quad con CPU $2,4 \text{ GHz}$ y 2 Gb de RAM.

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 5. Éstos se han extraído de la aplicación del módulo sedimentológico recientemente analizado. En los resultados se indican rangos, debido a la gama de velocidades w_s que se consideran factibles en la zona en estudio, y en los períodos de largo plazo por englobar los resultados de las tres décadas, por lo que estos valores son indicativos de lo que puede llegar a suceder realmente.

Con los almacenamientos de sólidos resultantes en cada celda, se puede calcular las variaciones en las cotas de fondo de las mismas, pudiendo obtener una deposición general dentro del valle. Para indicar un valor global, representativo en la planicie, de la evaluación de la variación anual para cada celda por m^2 , se la pondera con el área de cobertura de cada una, y se obtiene un promedio general para toda la planicie representada con las celdas valle. Para obtener este valor agregado en la celda, se han tomado en cuenta el área total de la misma por un lado, dz , y por otro el área de anegamiento que surge de la altura del flujo dentro de la misma, dz^* . En el primer caso, se considera que la distribución del sedimento depositado en la celda se realiza en toda el área de cobertura de ella, dentro de depresiones, cursos abandonados, sectores lagunares que pueden estar concentrados o esparcidos. En el segundo, es una cuantificación maximizada de

la posibilidad de los depósitos concentrados de los sólidos, sólo en el área que se definió que llega a anegarse con la altura de agua. Probablemente, lo que realmente suceda esté dentro de estas dos magnitudes determinadas, ya que los sedimentos ni se concentran totalmente ni estarán completamente diseminados en el área entera de la celda, por lo que se indicarán resultados que engloban ambos valores, ya que es un valor derivado de la cantidad de sólidos computados que se depositan.

Tabla 5. Resumen de resultados de la aplicación del módulo sedimentológico sobre el modelo, con promedios anuales y períodos de 10 años (largo plazo).

Resultado analizado	Períodos de 10 años	Estimación anual (promedio)	Resultados anuales de 1994 y 1997
Sólidos suspendidos totales que ingresan [millones ton]	1050 a 1260	105 a 126	105 a 135
Depósitos de sólidos suspendidos Φ [millones ton] en todo el dominio	150 a 465	14 a 47	16 a 54
Retención de sólidos en el tramo [%], respecto a los totales que ingresan	14% a 37%		15% a 40%
Depósitos de sólidos Φ [millones ton] sobre celdas Valle de la planicie de inundación	70 a 215	7 a 20	6 a 28
Retención de celdas Valle de la planicie [%], respecto a sólidos totales que ingresan	7% a 17%		5% a 21%
Variación en las cotas de fondo [mm] sobre las celdas Valle de la planicie	10 a 100 mm	1 a 10 mm	0,5 a 13 mm

Los valores resultantes de los depósitos anuales, pueden ser considerados variados desde 6 a 28 millones de ton/año, siendo éstos desde el 5% al 21% aproximadamente de la carga total sólida que ingresa en este tramo. Los porcentajes son bastante coherentes con los que se registran en la bibliografía en cuanto a la función de almacenamiento sólido de las planicies de inundación en ríos aluviales. A su vez, la planicie de inundación retiene entre un 5% a 21% aproximadamente de los sólidos ingresantes totales, lo cual se condice bastante bien con los porcentajes (de 10% a 60%) que se encuentran en la bibliografía mundial. Las cantidades totales de sedimentos que ingresan en el tramo también dan valores plausibles, dentro de las magnitudes cuantificadas aguas arriba. En los depósitos acumulados anualmente, en cuanto a la variación de la cota de fondo, si se agrupa tanto a las ponderaciones realizadas sobre todo el área de las celdas y sobre el área anegada, la situación que puede llegar a presentarse –como ya se indicó– es probable que esté dentro de estas dos consideraciones, por lo cual se puede estimar una variación del fondo variable de 0,5 a 13 mm/año, dependiendo la zona y magnitud de la crecida. De observaciones realizadas en cortes verticales en el suelo en el interior de la planicie y de registros en la bibliografía, los espesores van desde algunos hasta la decena de milímetros, respondiendo en este orden de magnitud los depósitos calculados anuales que pueden producirse.

Cabe recordar que estos valores, deben tomarse como de referencia de un entorno indicativo, ya que va a depender de la composición granulométrica de los sólidos suspendidos que contenga la carga de lavado, la cual fue tenida en cuenta variando w_s .

Para visualizar la distribución de los depósitos dentro del dominio del modelo, se presenta la Figura 15, para la totalidad de los depósitos en 1997, para una $w_s = 0,0001$ m/s (y la U_{cd} considerada de 0,15 m/s), y los dz^* (depósitos acumulados ponderados sobre las áreas anegadas) en las distintas celdas. Los depósitos mayores se dan a aquellas celdas correspondientes a zonas lagunares y con bajas cotas, como ser la laguna Coronda, Grande y la del Pescado, y los sectores aledaños, donde el flujo de agua escurre con menores velocidades y es más propicio a producirse deposiciones. Se puede apreciar que en todo el curso principal tanto las deposiciones como los depósitos acumulados, son nulos, indicados a través de las zonas grises en ambas imágenes. También hay algunas celdas en las cuales no hay ningún tipo de deposición en todo el año analizado, que se corresponden con las zonas de cotas más altas, por donde no hubo escurrimiento del flujo. En cuanto a las variaciones de las cotas de fondo anuales, los valores más elevados se presentan en celdas de tamaños reducidos, cercanos a las zonas lagunares indicadas, y en éstas, también hay considerable acumulación de sedimento. Se encuentran zonas donde hubo deposiciones de valores medios, pero cuando se observan las acumulaciones de sedimentos, no acusa elevación de la cota de fondo, lo que indica que las áreas anegadas en ellas eran muy grandes en comparación con las cantidades de sedimentos acumulados, que hacen que el mismo, al ser distribuido en esta superficie, quede de pequeña magnitud o insignificante. Este

caso puede notarse en la zona de la laguna del Pescado. Incluso también aparecen zonas, especialmente de celdas con las áreas más pequeñas, donde los depósitos -por la escasa superficie- no acusan grandes cantidades, pero al cuantificar las variaciones de las cotas de fondo, aparecen como significativos, ya que al ser distribuidos superficialmente, resultan de importancia.

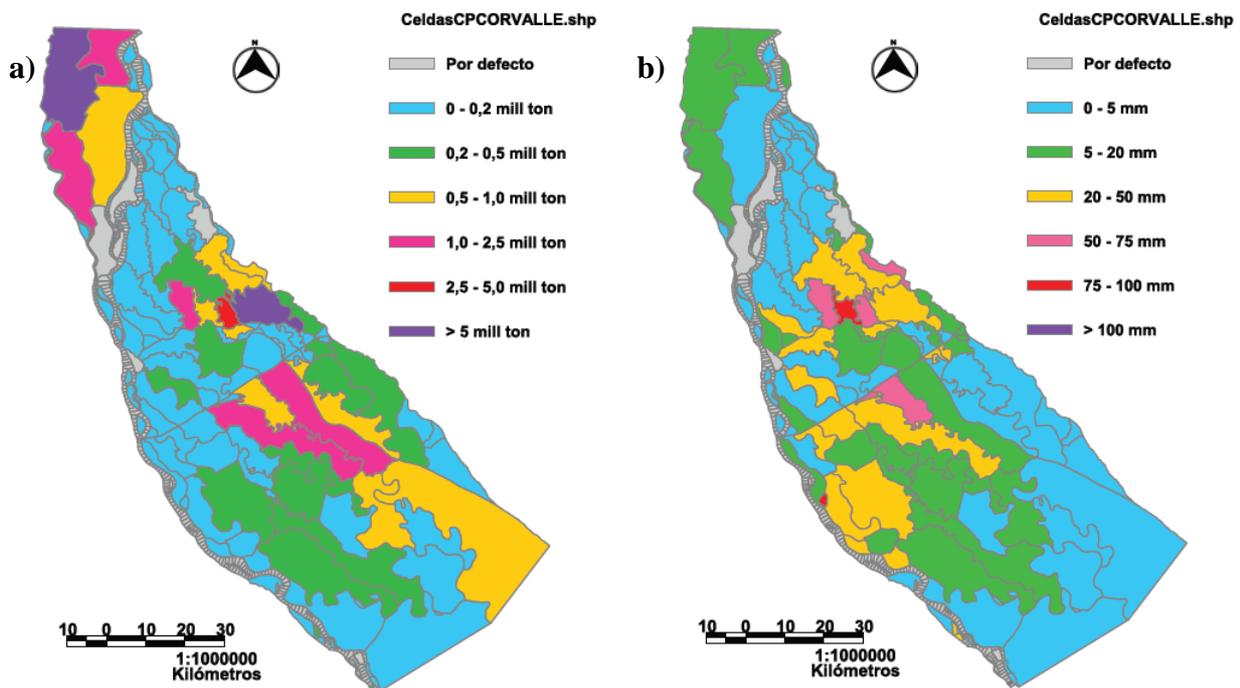


Figura 15. Visualización de gvSIG de: a) depósitos totales Φ en las celdas del dominio; b) variaciones de la cota de fondo dz^* , ponderadas con áreas anegadas (en gris, celdas con depósitos o variaciones de la cota de fondo despreciables o nullos), para año de crecida típica 1997 ($ws = 0,0001$ m/s).

Dentro de las publicaciones recientes de la SSRH de registros de aforos sólidos -de gruesos y finos-, se contó con los de dos estaciones sobre los cursos de agua en que se divide el río Paraná mismo, aguas abajo a la altura de la ciudad de Zárate, sobre el Paraná de las Palmas (estación Zárate) y sobre el Paraná Guazú (estación Brazo Largo), todos desde 1993 a la fecha. Los registros fueron publicados posteriormente a la utilización del modelo, y aunque no son sobre la zona de estudio, los mismos pueden servir para chequear entornos de trabajo de concentraciones. Si bien los aforos de las secciones son distantes del borde aguas abajo del modelo -145 km aproximadamente -, pueden tomarse como referencia las concentraciones de los sedimentos finos, para comparar con las concentraciones resultantes sobre el cauce principal, ya que las corrientes de los ríos Paraná de las Palmas y Guazú, forman parte de las continuaciones naturales del cauce principal, aguas abajo. Las mismas, no van a reflejar de hecho las concentraciones que tendrían que resultar del proceso sedimentario que ocurre en la zona, ya que sobre el Delta Inferior, hay influencia de la marea sobre estos cursos, que hacen que las concentraciones sean menores que si ésta no actuara allí. Además estos registros están afectados por la dispersión que ocurre entre los distintos ramales en que se deriva el caudal principal, y por dispersiones propias del proceso mismo de aforo.

Considerando los aforos de sedimentos finos en la sección de Zárate-río Paraná de las Palmas (km 108,5 de la vía de navegación) y de la sección Brazo Largo-río Paraná Gauzú (km 181,5 de la vía de navegación), y con los aforos líquidos correspondientes a cada una, se han llevado los registros a concentraciones de sedimentos finos, luego se han agrupado los registros por mes. Para las comparaciones, se eligieron dos de los períodos simulados: 1990-1999 y 2000-Agosto 2010 con la CF Rosario-Victoria, que fueron los correspondientes a los registros encontrados. De cada simulación, y para cada ws considerada en cada caso, se obtuvieron los concentrogramas (con valores de los promedios mensuales resultantes de todo el período) sobre el borde aguas abajo del modelo, en el cauce principal (celda 1428). Para poder equiparar los resultados con los registros, se han realizado los promedios mensuales de las concentraciones de los mismos, y también obtenido el percentil 85 mensual, como un parámetro que abarca considerablemente a todos los valores. En la Figura 16 se presenta un gráfico comparativo de lo anterior.

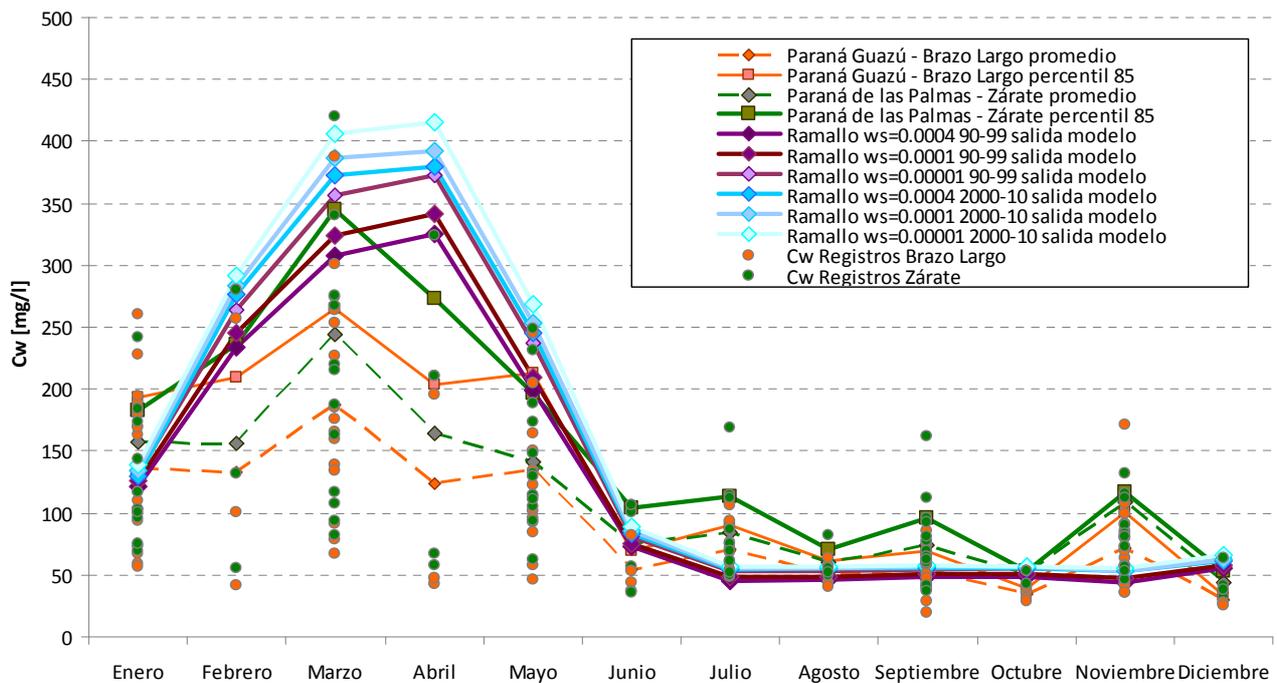


Figura 16. Concentraciones de sedimentos finos a partir de registros de aforos sólidos en Zárate y Brazo Largo, distribución anual de promedios mensuales y percentiles 85, comparados con concentrogramas resultantes sobre el borde aguas abajo del modelo, sobre cauce principal, para distintas ws.

En líneas generales, los valores de concentraciones mensuales resultantes de la aplicación del módulo sedimentológico, resultan acordes ya que están dentro de la gama de concentraciones registradas en las secciones de aforo aguas abajo. Los valores resultantes son superiores a los de los percentiles 85 de los registros, e inferiores a los promedios para los meses donde los registros son menores. Sin embargo, si se tiene en cuenta la dispersión de los registros, la lejanía de las secciones de aforo (recordar que existen 145 km de distanciamiento), la afectación de la marea sobre el contenido de sedimentos en suspensión, se considera que -sin haber contado con estos registros para la confección del modelo- los resultados de las concentraciones sobre el borde aguas abajo son más que aceptable para una evaluación global de la sedimentación.

Análisis de impactos sedimentológicos de la CF Rosario-Victoria

Si bien la presencia de la CF Rosario-Victoria produce mayores áreas anegadas y aumenta los tiempos de permanencia del agua, en los resultados entre la situación del período 2000-Agosto 2010, con y sin la obra del terraplén vial, no se observaron grandes contrastes, por ello se hace una mirada con mayor detenimiento en las diferencias que se presentan.

La presencia de la CF Rosario-Victoria, provoca que se produzcan mayores cantidades de sedimentos totales sedimentados en el tramo en estudio (sistema cauce-planicie), los que oscilan sobre los 2,5 millones toneladas. Éstos representan aproximadamente 0,23% de los totales ingresantes, constituyendo un valor de incremento muy bajo. En los resultados de los depósitos totales específicamente sobre la planicie aluvial, las diferencias son menores a los 1,4 millones toneladas, que representan el 0,12% de los depósitos que ingresan al sistema, con lo cual es valor es insignificante.

A su vez, el terraplén vial influye sobre las distribuciones del sedimento en el dominio, dando por lo general un aumento de deposiciones sobre las celdas que tienen el mayor flujo encauzado (cauce principal, cursos e islas), elevando las cantidades de los depósitos entre 0,3% a 0,95%; hace que se disminuyan los depósitos en el sistema Coronda entre un 0,3% a 0,55%, y que sea variable en la planicie de inundación, dependiendo la velocidad de caída.

En donde se observan las mayores diferencias sedimentológicas de la presencia del terraplén vial, es en cuanto a las deposiciones. Si se ponderan los incrementos de cota del fondo de celdas sobre la totalidad de las áreas de éstas, las diferencias no son significativas, llegan a ser de 0,12 mm cuando la ws es la menor

considerada. Para las ponderaciones con las áreas anegadas, al ser éstas mayores por elevar el tirante aguas arriba de la CF, se llega a cuantificar una diferencia de 1,4 mm hasta 18,6 mm, en el término de más de 10 años (anualmente variaría de 0,15 mm a 1,85 mm). Si estos valores se los comparan con los estimados anteriormente –para los períodos de 10 años y de un año, en promedio-, puede llegar a concluirse que es el equivalente a un aumento en la deposición entre un 15% al 18% sobre la planicie de inundación.

La distribución de las deposiciones (Figura 17) en el dominio son similares a la anteriormente presentada, y comparando las dos situaciones, sin y con la presencia de la CF, se puede visualizar claramente que éstas son más distribuidas sobre los sectores aguas arriba y abajo del terraplén vial cuando no está la obra, pero al considerarla, hay mayores deposiciones aguas arriba, sobre el sector de la Laguna Grande y sobre el suroeste la planicie, cerca del cauce principal, y son menores aguas abajo de la CF, en la zona cercana a ella.

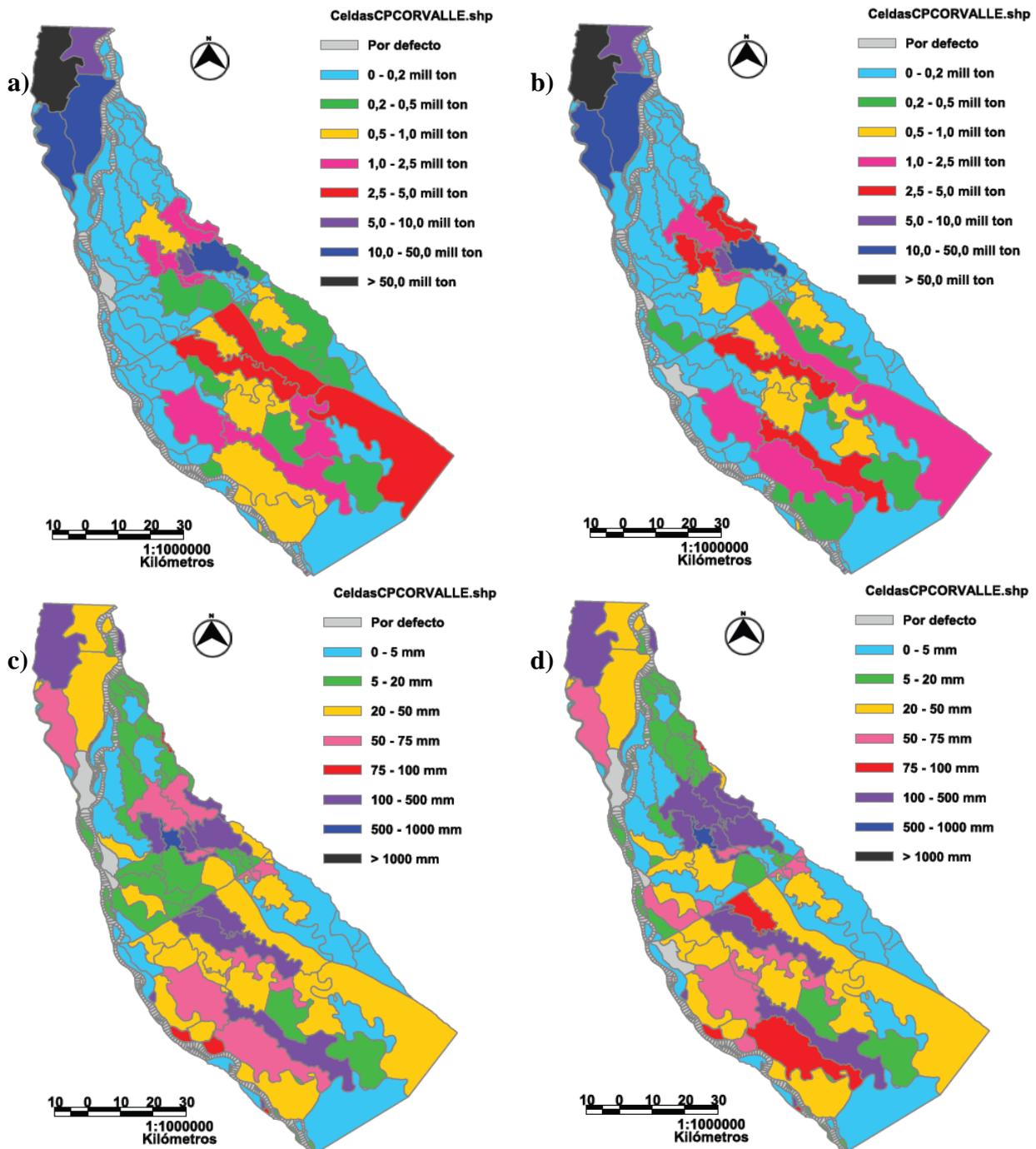


Figura 17. Visualización de gvSIG de: a) depósitos totales Φ en las celdas del dominio, sin CF; b) igual al ítem a, con CF; c) variaciones de la cota de fondo dz^* , ponderadas con áreas anegadas, sin CF; d) igual al ítem c, con CF; (en gris, celdas con depósitos o variaciones de la cota de fondo despreciables o nulos), para largo plazo, período 2000-Agosto 2010 ($w_s = 0,0001$ m/s).

Las variaciones de las cotas de fondo se comportan de manera similar a las deposiciones, habiendo un mayor depósito sobre el este de la planicie aguas arriba de la CF y menor al oeste (sin la CF era más repartida la acumulación de sedimentos), a causa de la redistribución que debe hacer el flujo para encauzarse hacia los puentes existentes.

SIMULACIONES PARA EVENTOS EXTRAORDINARIOS

Al modelo matemático hidrodinámico –calibrado y validado– junto al módulo sedimentológico implementado y calibrado marginalmente, se los utiliza para pronosticar el comportamiento del flujo y sedimentos sobre el sistema cauce-planicie, para eventos de recurrencias extraordinarias. Inicialmente se evalúan los caudales líquidos sobre el cauce principal para distintas recurrencias, de tipo centenaria, milenaria y decamilenaria. A su vez se van a considerar tres clases de crecidas, según las distribuciones mensuales de caudales: de larga permanencia, de aumento puntual de los caudales y estándar. Cada escenario se va a evaluar teniendo en cuenta las dos configuraciones para el modelo confeccionado: sin y con la CF Rosario-Victoria, para cuantificar impactos que ésta produciría con eventos extraordinarios. Primero se desarrolla todo el análisis para las simulaciones hidrodinámicas, y posteriormente se evalúan las deposiciones de sedimentos finos de la carga de lavado. Ambos estudios se focalizan sobre los efectos en la planicie de inundación del tramo en estudio.

Modelaciones hidrodinámicas de los eventos extraordinarios

Se han elegido las citadas recurrencias para los eventos extraordinarios, para conocer qué sucedería si siguen en aumento los registros históricos que se han sucedido en las últimas tres décadas. La recurrencia centenaria está asociada a la ocurrencia promedio de una vez en la vida de una persona del evento en cuestión; la milenaria se considera una situación extraordinaria de presenciarse; y la decamilenaria, estaría indicando lo excepcional de la realidad que sobrevenga.

Además de la recurrencia supuesta para el caudal pico del evento hipotético, se suponen crecidas de diferentes tipos: una de larga duración (con gran permanencia de altos caudales), otra crecida puntual repentina y un último tipo de crecida común de distribución anual estándar del flujo. Para la del primer tipo, se la denomina con la letra “L” (de larga), y se decide tipificarla a partir de la crecida de los años 1982-1983, ya que la misma corresponde con la de mayor tiempo de permanencia de agua en el valle de inundación (más de 8 meses en su ocurrencia). Para la crecida repentina, denominada con “P” (de puntual), se elige la de 1992 como patrón de conformación de la misma, ya que en este año se vieron superpuestos los dos picos anuales característicos en los caudales líquidos, sobre mitad de año, a destiempo de los mayores caudales sólidos. Para la crecida estándar, denominada “C” (de común), se toma al año 1997, donde se desarrolló una crecida importante (los caudales sobrepasaron los 25000 m³/s), y las distribuciones del flujo en el año son bastante acordes con el hidrograma de caudales líquidos medio mensuales para el Paraná, con picos sobre Febrero y Marzo, donde están en fase las máximas cantidades de sólidos.

Para la conformación de los hidrogramas hipotéticos de entrada, se adimensionalizaron los de las crecidas de los tres tipos, tomando como unidad el caudal menor sucedido en cada oportunidad, suponiendo así que éste sería un caudal de base que se mantiene, considerando amplificada la parte del escurrimiento directo, y lo que cambia es la magnitud de caudales en el resto del año, donde el máximo es el valor que para cada recurrencia se determina. Las entradas en el modelo se realizan aguas arriba de Diamante, donde se toma de entrada el mismo caudal registrado en PSM, y aguas arriba sobre el sistema Coronda, que es función del caudal de entrada en Diamante.

Para evaluar los caudales máximos correspondientes a las distintas recurrencias citadas, se procede a analizar estadísticamente los registros de los mismos. Primeramente se considera la homogeneidad de la serie, para lo cual se tomarán los caudales máximos anuales a partir de 1971 (DHIS-FCEIA, 1988; Basile, 2007), año desde el cual se considera que han aumentado los niveles, especialmente los mínimos, debido a factores anteriormente analizados.

Se consideran entonces las series 1971-2010 de los caudales máximos, obtenidos de la página oficial de la SSRH. Con los máximos anuales de dicha serie, tanto para las estaciones hidrométricas de PSM como para la de Corrientes, se calculan las probabilidades experimentales de Weibull y se toma la función de distribución de probabilidades de Gumbel, para el cálculo de los valores de caudales correspondientes a las recurrencias de 100, 1000 y 10000 años. La función de probabilidades de Gumbel representa adecuadamente la muestra de la población analizada, ya que cumple holgadamente con el test de bondad de Kolmogorov.

Una de las entradas al modelo es el hidrograma como condición de borde aguas arriba de Diamante, que se ha considerado igual al de los registros en PSM, por lo tanto se seguirá con el mismo criterio adoptado. Para el hidrograma de entrada sobre el sistema Coronda, los caudales se consideran función de los que ingresan en Diamante. Para estos valores de altas recurrencias, la función obtenida con anterioridad pierde consistencia, ya que resultan caudales excesivos sobre Coronda. Para la determinación de los hidrogramas sobre esta entrada, se utilizan los valores estadísticos obtenidos en la sección de aforo de Corrientes. Considerando que por esta última pasa prácticamente la totalidad del caudal desde aguas arriba, se adoptan como caudales máximos, para cada recurrencia considerada, la diferencia entre los valores de Corrientes y PSM, los cuales se observan en la Tabla 6.

Tabla 6. Resultados de Caudales para 100, 1000 y 10000 años de recurrencia.

Recurrencia [años]	Q Corrientes [m ³ /s]	Q PSM [m ³ /s]	Q Coronda [m ³ /s]	Q Coronda / Q PSM
100	58374,4	34211,4	24163,0	70,63%
1000	73714,9	40501,1	33213,8	82,01%
10000	89028,3	46779,6	42248,7	90,31%

Se puede observar que los porcentajes de distribución de caudales que surgen son plausibles, ya que a medida que aumenta la cantidad de escurrimiento desde aguas arriba, es lógico que haya una equiparación entre los porcentajes, dado que el sistema contiene grandes volúmenes de agua no encauzado.

A partir de estos resultados, se realiza confeccionan los ingresos de caudales sobre Diamante y el sistema Coronda, generando así las condiciones de borde aguas arriba para la explotación del modelo. A modo de ejemplo, se presentan en la Figura 18, los hidrogramas de entrada aguas arriba, para las distintas recurrencias adoptadas, y la crecida tipo P.

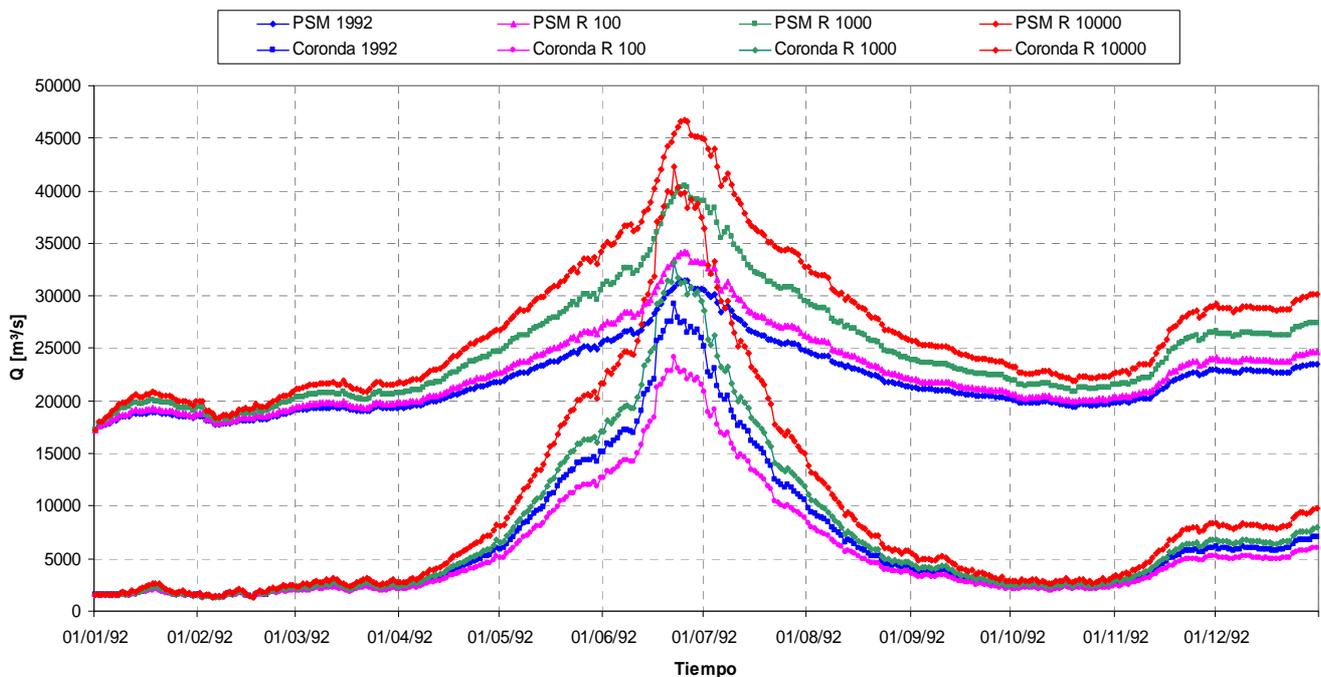


Figura 18. Hidrogramas hipotéticos de entrada sobre Diamante (PSM) y el sistema Coronda, para R = 100, 1000 y 10000 años, crecida P: Puntual.

Una vez obtenidos los hidrogramas ingresantes al dominio para los eventos extraordinarios, se procede a realizar las modelaciones hidrodinámicas sobre el modelo matemático implementado, especialmente calibrado para grandes crecidas. Primero se comienza con la generación de las condiciones iniciales –alturas de agua en las celdas, correspondiente con los caudales iniciales sobre el sistema-, a través de corridas preliminares. Posteriormente, al modelo se les impone las condiciones de caudales externos, tanto en el ingreso sobre Diamante, como sobre el sistema Coronda, y se simula, para cada recurrencia, y para cada tipo de crecida, el escurrimiento hidrodinámico del flujo. También se reiteran las mismas, con iguales condiciones, pero con la incorporación de la CF Rosario-Victoria, y se analizan los resultados. Ulteriormente, desde los valores obtenidos, se aplica el módulo sedimentológico, para la evaluación de las deposiciones.

Las corridas se realizan con un paso de tiempo máximo de 360 segundos, tanto para la situación con y sin la obra del terraplén vial entre Rosario y Victoria. Por las recurrencias estudiadas, los valores totales de caudales máximos que ingresan sobre el sistema son de aproximadamente: 58000 m³/s; 74000 m³/s y 89000 m³/s en cada caso, por lo cual se prevé que todo el modelo acuse áreas completamente anegadas para el momento del pico de la crecida. Los resultados a analizar van a ser las comparaciones entre las diferencias que se presentan en los anegamientos y cotas del pelo de agua alcanzadas, como cambios en los tiempos de permanencia del agua, especialmente sobre el valle de inundación.

De las modelaciones hidrodinámicas realizadas se pueden obtener varios resultados. En principio, al analizar los caudales, se observa que los del cauce principal, a la altura de PSM, deberían ser iguales a los ingresados en Diamante, pero no lo son; sino que, incluso en las distintas recurrencias, los valores máximos apenas sobrepasan los 30000 m³/s, indicando una capacidad máxima del cauce principal, absorbiendo el remanente el valle de inundación a través de los desbordes e ingresos hacia el mismo. Es decir, una de las primeras conclusiones es que el cauce principal, proporcionalmente, tiene una capacidad máxima frente al aumento de caudales, que son derivados por desborde y transportados por la planicie adyacente. Este valor se corresponde con los máximos históricos registrados.

Los resultados de las cotas del pelo de agua indican que en todos los casos, cuando se superan los 25000 m³/s, se superan también las cotas de los albardones costeros que separan el cauce principal del valle de inundación. Los incrementos de cotas, al aumentar los caudales, son progresivos en todas las estaciones, particularmente cercanos a los picos de caudales, hay estaciones que tienden a igualar sus cotas del pelo de agua, como ser Diamante con Coronda y Rosario con Victoria, ya que en estas situaciones el valle está completamente lleno de agua, de margen a margen, lo que tiende a unificar las cotas hídricas en ambas orillas; situación que se hace cada vez más evidente con el incremento de la recurrencia.

A modo de resumen, se indican en la Tabla 7, las cotas del pelo de agua máximas resultantes, en las distintas estaciones hidrométricas del dominio, para las recurrencias de caudales máximos que fueron simuladas. Todas las cotas sobrepasan los niveles de evacuación de cada lugar, incluso para el evento de 100 años de recurrencia, siendo Diamante la estación que tiene menor diferencia, y hacia aguas abajo, es mayor la superación de este nivel, llega incluso a excederlo en 2,83 m en Victoria y en 1,73 m en San Nicolás.

Tabla 7. Cotas del pelo de agua máximas resultantes [m IGN], en las estaciones hidrométricas del dominio, para las recurrencias de caudales R = 100 – 1000 - 10000 años.

Estaciones hidrométricas	R = 100 años	R = 1000 años	R = 10000 años	Nivel evacuación (PNA)
Diamante	12,88	13,32	13,89	12,26
Coronda	12,77	13,18	13,74	---
Puerto Gaboto	10,85	11,22	11,72	---
PSM	10,43	10,80	11,31	9,33
Rosario	9,57	10,02	10,57	8,34
San Nicolás	8,71	9,20	9,72	6,98
Victoria	9,39	9,91	10,49	6,56

Con los resultados obtenidos, se han confeccionado imágenes para visualizar las áreas anegadas para el pico de cada crecida, para determinar si es que se desarrollan diferencias entre las distintos tipos de crecidas evaluados. Se presentan en la Figura 19 una comparación entre las tres clases, todas para una recurrencia centenaria, y para la crecida tipo L, la situación sin y con la CF Rosario-Victoria.

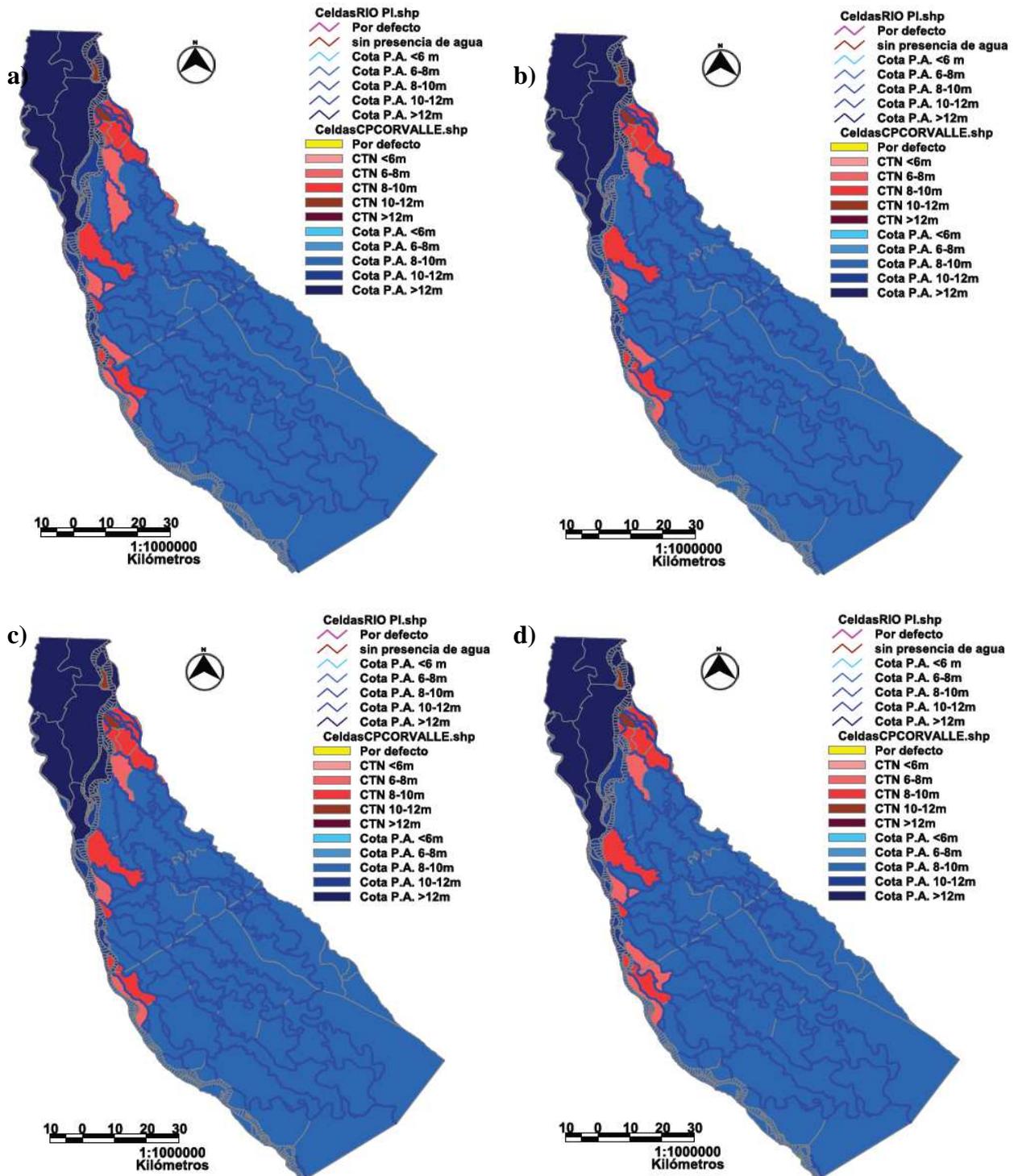


Figura 19. Visualización de gvSIG de áreas anegadas para el pico de las crecidas, con recurrencia R = 100 años: a) crecida tipo L, sin CF; b) crecida tipo L, con CF; c) crecida tipo P, con CF; d) crecida tipo C, con CF.

Evaluando los resultados de las imágenes, como habíamos previsto, casi la mayoría del valle aluvial y el sistema Coronda tiene presencia importante de agua. Si comparamos los dos gráficos superiores, podemos apreciar que la presencia de la CF produce un incremento de áreas anegadas para el pico de la crecida, aguas arriba del terraplén vial. Posteriormente, si comparamos la última imagen con las dos inferiores correspondientes a las crecidas tipo P y C, vemos que por muy poca diferencia, la de mayor anegamiento es la que tiene un incremento repentino en los caudales, y la que deja mayores áreas sin cubrir es la de tipo

común, estando la de larga permanencia en situación intermedia. Los sectores diferenciales entre ellas se ubican al norte y al oeste de la planicie, lindante con el cauce principal. De todas formas, los contrastes encontrados son de menores magnitudes, ya que las celdas involucradas en las diferencias no son de grandes superficies.

Cabe recordar que el anegamiento indicado en las celdas del modelo, está directamente vinculado a una altura de agua sobre el fondo de cada celda, donde las áreas superficiales anegadas son variables hasta los 3 m para computar los volúmenes almacenados en ella, ya que se considera que se van inundando distintos sectores –cursos interiores de pequeña magnitud, depresiones, lugares bajos- que quedan incluidos en la agregación de las celdas. Así, la representación del anegamiento en cada celda, no implica una cobertura total de la misma en la realidad, que está asociado a la agregación en la discretización de los elementos del modelo.

Efectos sobre el valle de inundación de la CF Rosario-Victoria, frente a eventos extraordinarios.

Las modelaciones hidrodinámicas realizadas han insumido un lapso más extenso que las anteriores, ya que deben resolverse mayor cantidad de vinculaciones tipo Vertedero. El máximo paso de tiempo utilizado fue el mismo, de 360 segundos, y los tiempos se extendieron a aproximadamente 10 horas por cada año calendario simulado (en el equipo ya mencionado anteriormente).

Los resultados de los limnigramas en las estaciones de registro indican que se produce una elevación mayor del tirante sobre el cauce principal y valle de inundación aguas arriba de la conexión vial, y disminución del pelo de agua aguas abajo del puente sobre el cauce principal, y oscilaciones pequeñas en el valle, no teniendo una tendencia definida en algunos casos, y en otros, como el sector de la llanura de avenamiento impedido - por la redistribución aguas arriba del flujo-, incluso puede llegar a aumentar sus cotas, ya que recibe mayores aportes este sector, de todas maneras, sin importantes incrementos.

En la Figura 20, se presentan las imágenes de áreas anegadas para la situación del pico de la crecida tipo L, con la CF Rosario-Victoria, para las recurrencias de 1000 y 10000 años. Se puede apreciar en ellas que la superficie cubierta con agua, para estas situaciones, es cada vez mayor, para la recurrencia milenaria se cubren más áreas sobre la planicie, a la altura de PSM, y es de notar el contraste en la tonalidad del color entre las cotas aguas arriba y abajo de la CF (azul más oscuro arriba), indicando la diferencia de cotas que provoca el terraplén vial. Para la recurrencia decamilenaria, prácticamente toda la planicie es anegada, se elevan las cotas del agua también aguas abajo de la CF, quedando solamente el sector norte, de relieve más elevado.

En las estaciones hidrométricas controladas, la que mayor porcentaje de variación en alturas ante la situación con y sin la CF, se da en PSM, y la de menor altura en San Nicolás (SN). Los resultados para las crecidas con caudales máximos de Recurrencia 100 años van desde 0,23% (1,8 cm) en PSM a -1,52% (10 cm) en SN, para una Recurrencia de 1000 años son de 0,45% (4,8 cm) en PSM a -1,34% (8,8 cm) en SN, y para las crecidas decamilenarias los porcentajes están entre 1,56% (17,4 cm) en PSM y -1,07% (7,2 cm) en SN. Estos resultados donde en PSM se dan mayores alturas, con aumentos a medida que la recurrencia de las crecidas aumentan, es lógico al incrementar los caudales y encontrarse en el cauce principal la restricción en el flujo por la presencia del puente, al N de la ciudad de Rosario. En SN las alturas por este hecho son menores que si la CF no estuviera, siendo coherente con el estrechamiento y acumulación aguas arriba de la obra vial; a medida que la recurrencia de las crecidas aumenta, esta diferencia va disminuyendo, ya que al existir flujo de retorno desde el valle al cauce principal aguas arriba de SN, este volumen es cada vez mayor (recordar que la capacidad del cauce principal prácticamente no varía al incrementarse la recurrencia, y que los caudales los absorbe el valle), por lo que las diferencias son a su vez menores.

Con respecto a las diferencias en el valle, se dividió la situación entre las celdas aguas arriba de la conexión vial y las de aguas abajo, con igual procedimiento anterior. En cada lugar se recopilaron los resultados, en donde hubo algunas celdas que tuvieron en algún momento de la crecida disminución respecto a la situación sin la CF, y en otros aumentos. En la Figura 21 se resumen, para los tres tipos de crecidas –Larga, Puntual y Común- y para cada recurrencia, las diferencias máximas y mínimas, tanto para el conjunto de celdas aguas arriba y para aguas abajo.

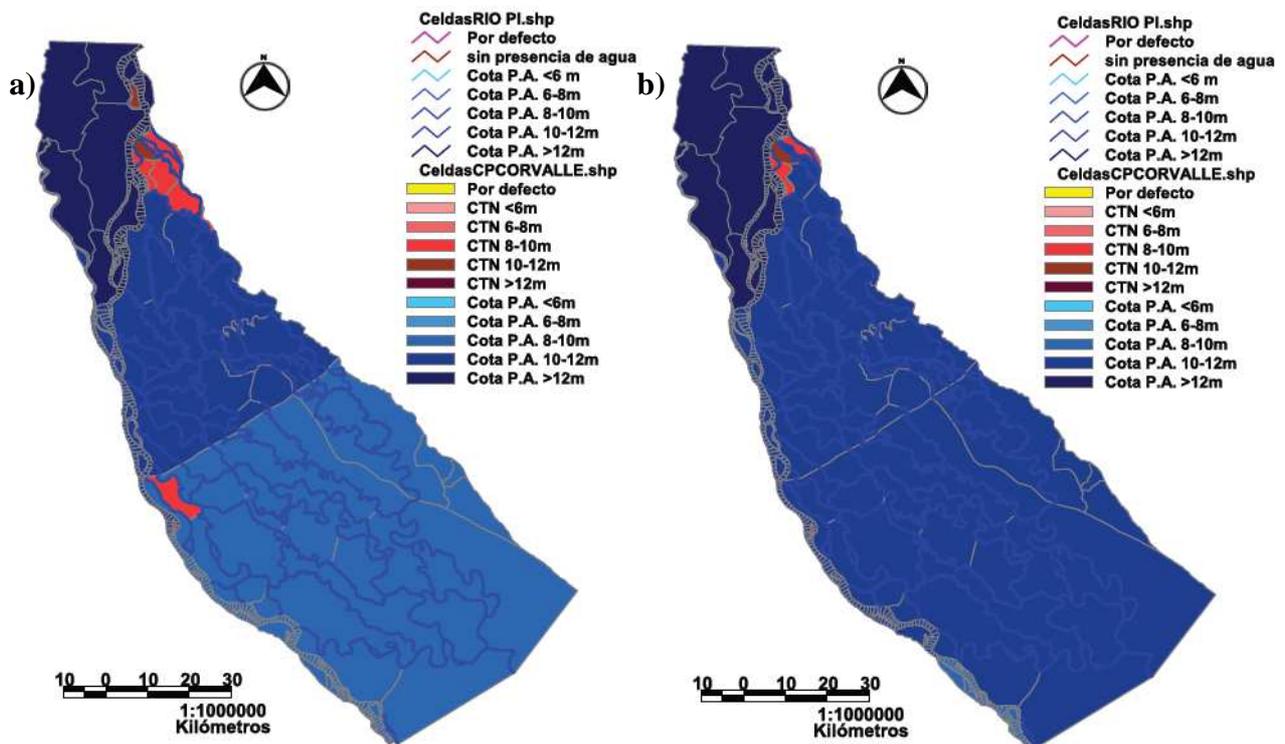


Figura 20. Visualización de gvSIG de áreas anegadas para el pico de las crecidas, crecida tipo L, con CF, para: a) recurrencia R = 1000 años; b) recurrencia R = 10000 años.

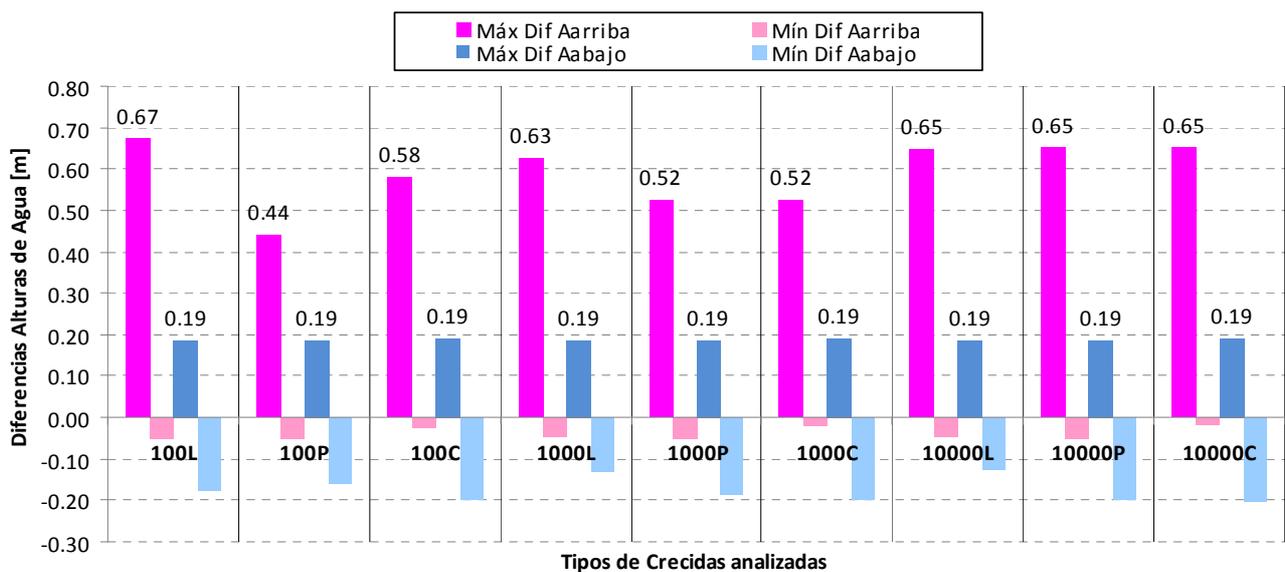


Figura 21. Diferencias Máximas y Mínimas en Alturas de agua, con y sin CF, para conjunto de celdas del valle aguas arriba y aguas abajo, crecidas tipo L, P y C, y recurrencias 100, 1000 y 10000 años.

Como primera conclusión se puede decir que las máximas diferencias están entre los 0,50 y 0,70 m, aguas arriba de la CF, prácticamente independientes de la crecida que se trate, notándose un pequeño incremento cuando las crecidas son de gran permanencia. Los mínimos aguas arriba son del orden de los -5 cm aproximadamente, que pueden responder a las oscilaciones de los vertederos al ponerse en funcionamiento. Aguas abajo, las máximas diferencias son del mismo orden que las mínimas, menores a 0,20 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.

Teniendo en cuenta para cada tipo de crecida -Larga duración, Puntual y Común- el instante de tiempo del pico -días 446; 178 y 68, respectivamente-, se evaluaron perfiles transversales y longitudinales, para la situación con y sin CF Rosario-Victoria, donde se incluyen los resultados del pelo de agua para las crecidas centenaria, milenaria y decamilenaria. En cada uno se presentan a escala las cotas de fondo de las celdas del

modelo –las tipo Valle como las Río-, incluyendo los cursos de agua interiores a la planicie. Se representa a modo ejemplificador en la Figura 22 el perfil longitudinal PL2 (ubicación en Figura 8 anterior), incluyendo la situación presente durante el pico de cada recurrencia, para la crecida de tipo P.

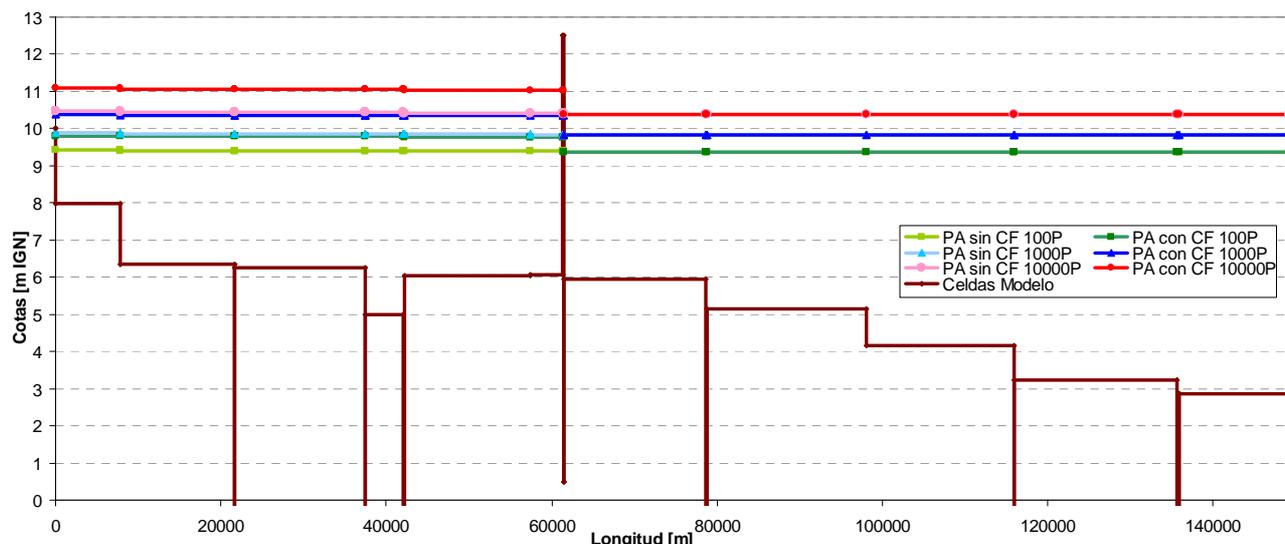


Figura 22. Perfil longitudinal PL2, para el pico de la Crecida tipo P, para recurrencias de 100, 1000 y 10000 años, sin y con la CF Rosario-Victoria.

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 hacia aguas arriba del terraplén vial, para una recurrencia de crecida de 100 años, llega a ser de 61,3 km aproximadamente, para 1000 años de recurrencia, de 65,5 km aproximadamente, y para 10000 años de recurrencia de la totalidad del área aguas arriba hasta encontrarse con el cruce del cauce principal sobre la planicie, de 72,5 km aproximadamente.

Al observar los perfiles longitudinales, especialmente para las crecidas tipo P, se puede concluir que la elevación del pelo de agua por la conexión vial es prácticamente coincidente con el perfil del pelo de agua para la situación sin la CF, pero para la crecida de un orden mayor, esto sucede especialmente entre las cotas del pelo de agua del pico de la crecida entre recurrencias de 1000 años con CF y de 10000 años sin CF. Es decir, que en el pico de la crecida centenaria, por la presencia del terraplén, eleva el pelo de agua aguas arriba como si la crecida fuera milenaria. Cuando la crecida es milenaria, el pelo de agua cuando se da el pico de la crecida con la presencia del terraplén vial, se elevaría hasta casi la cota de la crecida decamilenaria. Aguas abajo no hay casi variación, detectándose una muy leve disminución en las cotas del pelo de agua en algunas celdas.

Cuando se presentan estas 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 aguas arriba y pudiendo disminuir aguas abajo. Esta cuestión es importante para el ecosistema del Paraná y sus islas, ya que muchas comunidades de la flora y fauna son dependientes de los ciclos hídricos, los que conforman el llamado régimen de “pulso” (Neiff, 1999), que es la recurrencia periódica de las fases de creciente y bajante. Este régimen involucra también movimientos de materia (sedimentos y nutrientes) por lo que puede hablarse de regímenes pulsátiles hidrosedimentológicos, cuyos atributos en términos de frecuencia, tiempo de duración e intensidad, entre otros, ayudan a interpretar las características bióticas y ecológicas de los humedales fluviales (Neiff, 1999). Si se modifican estas permanencias, podría llegar a influir sobre las comunidades que de ellas dependen.

Para evaluar los cambios de la presencia del agua en las celdas, se las agrupa como se ha indicado anteriormente: las de aguas arriba de la CF y las de aguas abajo. Se fueron tomando las permanencias del agua en todo el período simulado, para cada celda, en términos de días, y se las ponderó de acuerdo al área superficial total de las celdas, para así determinar una permanencia global de la zona aguas arriba (AAb) y aguas abajo (AArr). Esto se realizó para cada tipo de crecida y con cada recurrencia analizada. Para

cuantificar la presencia de agua en una celda, se han tomado la cantidad de días que sobre la misma se sobrepasa determinada altura de agua. Cada una, en el modelo hidrodinámico, tiene asignada una función almacenamiento (el tirante presente en la misma es el que determina el área superficial cubierta de agua), entonces se cuantifica sobre cada celda las variaciones en permanencia que va teniendo de acuerdo a la superficie anegada (o lo que es lo mismo, tirante que en ella se genera). Posteriormente se pondera sobre el conjunto de las celdas de cada grupo –AAb y AArr-, y se evalúa para la situación sin y con la CF, y para cada recurrencia estudiada. Las permanencias que se determinan, se evalúan para áreas anegadas que se van acumulando, hasta el área superficial completa de cada sector AAb y AArr. A modo de ejemplo, se presentan en las Figuras 23 y 24 los resultados de la crecida tipo L, para las celdas de aguas arriba y las de aguas abajo.

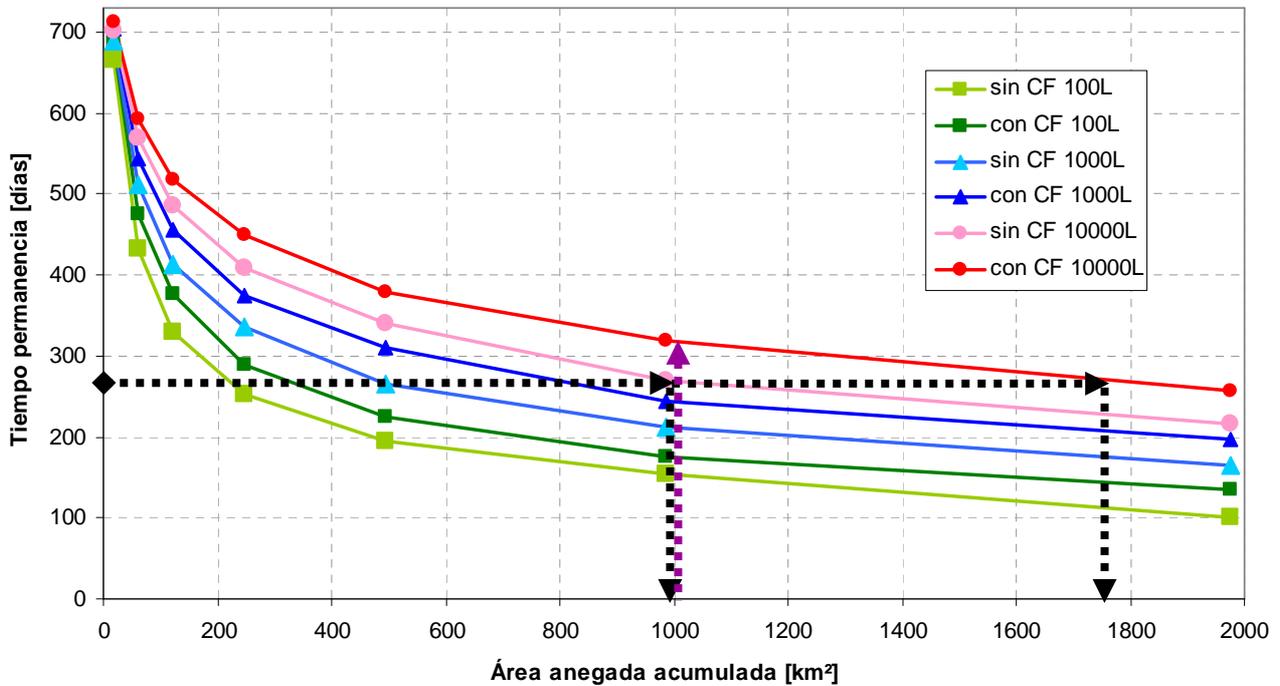


Figura 23. Curvas de Permanencias versus Área superficial anegada, conjunto de Celdas Aguas Arriba, para crecida tipo L, para recurrencias de 100, 1000 y 10000 años, sin y con la CF Rosario-Victoria.

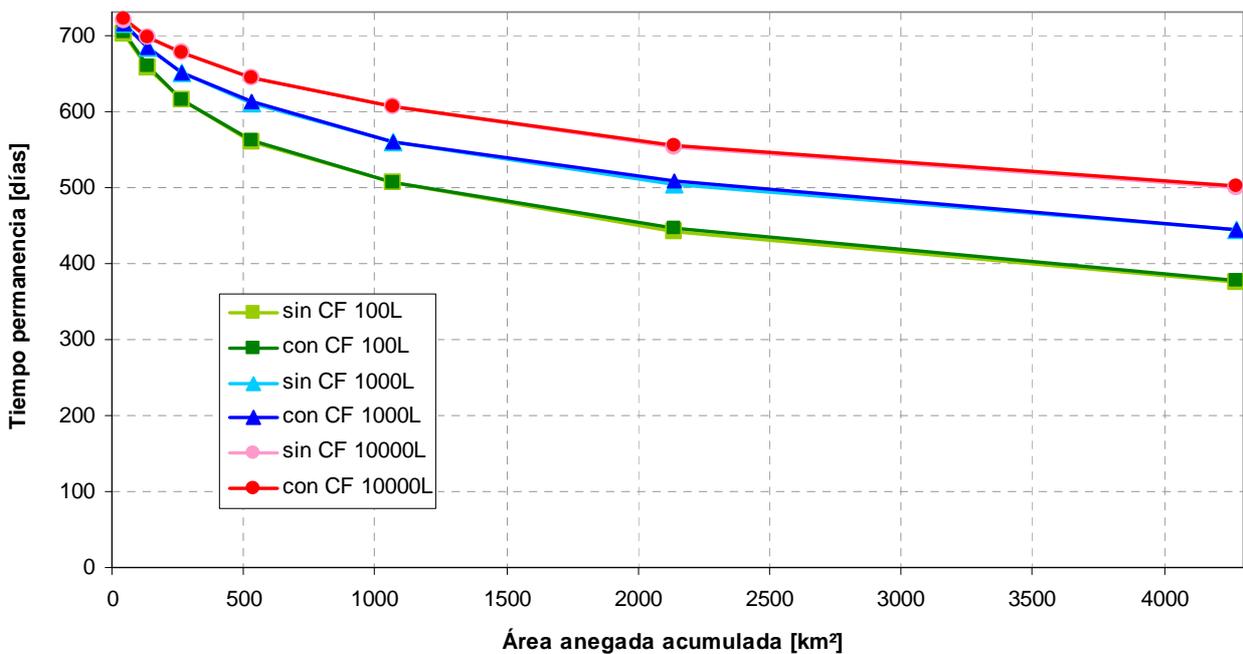


Figura 24. Curvas de Permanencias versus Área superficial anegada, conjunto de Celdas Aguas Abajo, para crecida tipo L, para recurrencias de 100, 1000 y 10000 años, sin y con la CF Rosario-Victoria.

Como ejemplo representativo, si consideramos el caso de una crecida tipo L, de recurrencia decamilenaria, y tomamos una determinada permanencia, por ejemplo 270 días (9 meses aproximadamente), el área anegada sobre el sector aguas arriba, sin la presencia de la CF, sería de casi 1000 km², pero la presencia del terraplén vial elevaría esta superficie a 1750 km² aproximadamente (flechas de color negro), un incremento en el anegamiento del 75%. Si consideramos el mismo caso, para evaluar el incremento de la permanencia con la misma área anegada acumulada, de 270 días se aumentaría a 318 días (10 meses y medio aproximadamente), casi un incremento del 18% (flecha color violeta).

Se han calculado los porcentajes de incremento de la permanencia del agua en el conjunto de celdas, por la incorporación de la CF Rosario-Victoria, para todas las recurrencias y tipos de crecidas, y se presentan en conjunto en las Figuras 25 y 26. En las gráficas de cada conjunto de celdas, se incorpora una curva de tendencia para cada situación.

Es notoria la diferencia entre el conjunto de celdas aguas arriba y aguas abajo. Para el primer caso el aumento es de hasta un 20% en líneas generales, y llega incluso hasta casi 35%, y en el segundo caso, el aumento es de hasta 1,2% como máximo. Es de notar que no hay una tendencia definida en los porcentajes con los distintos tipos de crecidas, ni tampoco con las distintas recurrencias. Hay una aparente mayor disparidad en los incrementos para el conjunto de celdas aguas abajo, pero al ser el porcentaje muy bajo, se podría considerar de pequeña variación, posiblemente producto de las fluctuaciones citadas.

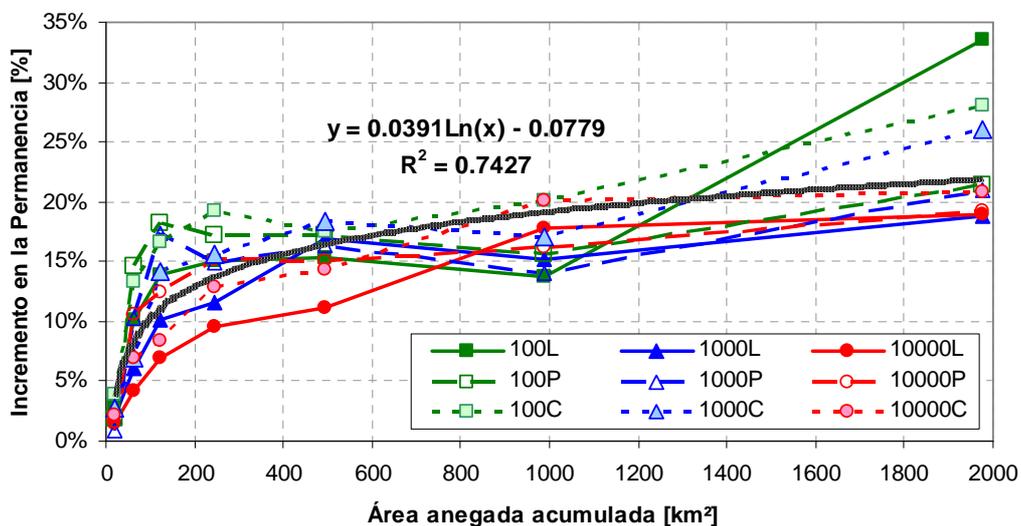


Figura 25. Porcentajes de incremento en la Permanencia del agua en el conjunto de celdas aguas arriba por la presencia de la CF Rosario-Victoria, para recurrencias de 100, 1000 y 10000 años, para todas las crecidas.

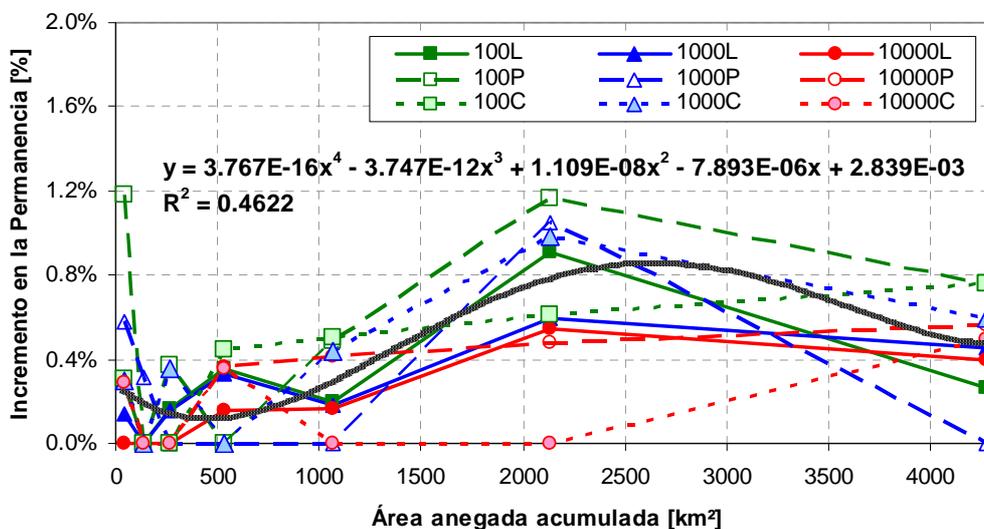


Figura 26. Porcentajes de incremento en la Permanencia del agua en el conjunto de celdas aguas abajo por la presencia de la CF Rosario-Victoria, para recurrencias de 100, 1000 y 10000 años, para todas las crecidas.

Aguas arriba del terraplén vial, hay un rápido incremento para las áreas anegadas menores hasta 200 km², y a partir de los 500 km² el incremento puede considerarse que varía desde el 10% o 15% hasta un 35% con el aumento de las áreas anegadas.

Análisis sedimentológico para los eventos extraordinarios

A partir de los resultados de las corridas hidrodinámicas para cada tipo de crecida, se aplica posteriormente el módulo sedimentológico, para simular el transporte y deposición de los sedimentos finos ($d < 62\mu\text{m}$) transportados como carga foránea.

Las propiedades del material fino contenido en el flujo de agua, son las mismas que ya se han utilizado anteriormente, se va a considerar que la carga de lavado que constituye la fuente de sólidos del sistema tiene velocidades de caída representativas que varían entre 0,00001 m/s o 0,0001 m/s o 0,0004 m/s. Es decir, se va a analizar con un rango de características del sedimento factible contenido en suspensión en el flujo. La velocidad de comienzo de la deposición U_{cd} se supone de 0,15 m/s, y la porosidad del sedimento –del análisis previo realizado al respecto- es de $p = 0,44$ para la crecida tipo L (que involucra dos años) y $p = 0,45$ para las crecidas tipo P y C. Las concentraciones del flujo que ingresa aguas arriba, se consideran iguales para cada año –centrograma sintético-, con la distribución anual ya analizada. Las concentraciones iniciales de sedimentos suspendidos se toman en cada celda igual a 50 ppm, concentración inicial baja.

Desde los resultados numéricos de las 18 simulaciones hidrodinámicas para las crecidas tipo L, P y C, sin y con la CF Rosario-Victoria, y para las recurrencias de 100; 1000 y 10000 años; se aplica el módulo sedimentológico. A su vez, para cada caso, se realizan tres corridas, que surgen de considerar cada una de las ws planteadas, con lo que contabilizan 54 corridas sedimentológicas.

El intervalo temporal de cálculo utilizado fue de $\Delta t = 24$ horas (un día), hasta cumplir con el tiempo de modelación total establecido. El tiempo de impresión de resultados también es de 24 horas. El tiempo real que insumió en promedio la simulación de un año calendario, fue entre 5 a 15 minutos, según la corrida, trabajando en un equipo Intel Core 2 Quad con CPU 2,4 GHz y 2 Gb de RAM.

Los resultados obtenidos pueden resumirse en la Tabla 8, que contiene las cantidades de depósitos que se pueden llegar a desarrollar sobre el tramo en estudio, del sistema de río cauce-planicie, de aproximadamente 200 km, desde Diamante aguas arriba a Ramallo aguas abajo; para los eventos extraordinarios de recurrencia centenaria, milenaria, y decamilenaria. Los valores de los promedios anuales inferidos desde los resultados para los eventos extraordinarios, se los comparó con los que anteriormente se obtuvieron para las crecidas ordinarias, dando el rango de valores de este análisis realizado sobre los márgenes superiores –o incluso mayores- del entorno de los anteriormente obtenidos, ya que se trata de grandes crecidas.

Las cantidades de sólidos totales considerados en la carga de lavado, que ingresan al sistema durante los eventos extraordinarios, fueron entre 138 a 244 millones ton/año, los que superan los 115 a 145 millones t/año, ya que éste rango fue considerado para condiciones habituales de caudales. Anteriormente se concluyó que las deposiciones en una década variaron en un entorno de 70 a 213 millones de toneladas, y dados lo volúmenes sólidos que ingresan al sistema en condiciones extraordinarias, éstos están en el rango de lo que puede llegar a depositarse en el valle en 10 años aproximadamente.

El tipo de crecidas que más sedimentación producen es el L, ya que la larga permanencia del agua en la planicie, hace que haya más cantidad de sedimentos por más tiempo que pueda depositarse en ella; siguiendo el mismo razonamiento, es lógico que se encuentre como la que le sigue la de tipo C, donde estaban en fase los picos de caudales sólidos y líquidos y tenía una distribución mensual de tipo estándar; y finalmente la tipo P, al ser repentina la elevación de caudales y desfasada con los picos líquidos, es la de menores deposiciones. Obviamente, todas en su tipo, siguen deposiciones crecientes con respecto al incremento de la recurrencia que se trate. Los depósitos anuales promedio en las décadas evaluadas, son de valores menores que incluso la de tipo P de recurrencia centenaria, aún cuando en dichas décadas se sucedieron crecidas importantes.

Tabla 8. Resumen de resultados de la aplicación del módulo sedimentológico sobre el modelo, con promedios anuales para los eventos extraordinarios.

Resultado analizado	R = 100 años	R = 100 años	R = 10000 años	Resultados anuales de crecidas ordinarias
Sólidos suspendidos totales que ingresan [millones ton]	138 a 180	148 a 210	160 a 244	105 a 135
Depósitos de sólidos suspendidos Φ [millones ton] en todo el dominio	31 a 95	35 a 126	40 a 156	16 a 54
Retención de sólidos en el tramo [%], respecto a los totales que ingresan	23% a 52%	24% a 60%	25% a 64%	15% a 40%
Depósitos de sólidos Φ [millones ton] sobre celdas Valle de la planicie	22 a 66	26 a 95	32 a 123	6 a 28
Retención de celdas Valle de la planicie [%], respecto a sólidos totales que ingresan	16% a 36%	18% a 45%	20% a 50%	5% a 21%
Variación en las cotas de fondo [mm] sobre las celdas Valle de la planicie	2 a 24 mm	2,5 a 24 mm	3 a 25 mm	1 - 10/13 mm

Si observamos los valores totales depositados en las crecidas evaluadas, frente a los que se han contabilizado para las tres décadas, vemos que las crecidas L para R = 1000 y 10000 años, llegan a igualar y superan a los sedimentos totales sobre el valle de los períodos de 10 años; incluso si observamos el período de los '2000, es superado por cualquiera de las tipo L, y alcanzado por las tipo C, para R = 1000 y 10000 años. Por lo tanto, los depósitos que se acumulan en el valle de inundación durante una crecida extraordinaria, puede llegar a alcanzar los que se generan a lo largo de 10 años, o incluso superarlos ampliamente.

En términos de porcentajes retenidos –en la planicie- de los sólidos que ingresan al sistema, son bastante disímiles, ya que varían desde el 16% hasta el 50% aproximadamente, según el tipo de crecida y la recurrencia. Para cada recurrencia, las mayores retenciones se dan en la crecida tipo L, luego la C y finalmente la P. Si se analiza que la retención en las celdas valle en períodos de largo plazo fue entre 7% a 17%, los valores son inferiores a los de la recurrencia centenaria, incluso hasta para la crecida de tipo P. Por lo tanto, se puede indicar que al aumentar la recurrencia de los caudales máximos de crecidas, el porcentaje de retención por parte de la planicie puede llegar a aumentar hasta un 50%. En la bibliografía, algunos trabajos indican valores hasta del 60%, aunque la mayoría de ellos son en ambientes diversos y de menores dimensiones que el que aquí se analiza, se da una idea de la magnitud probable, con lo cual, los valores obtenidos pueden llegar a ser factibles.

Los valores de incremento de las cotas de fondo sobre la planicie para estas situaciones de crecidas extraordinarias, se pueden comparar con las determinadas para eventos anuales ordinarios (promedios de las determinaciones sobre largo plazo y en crecidas comunes), los cuales variaban desde 1 a 10 o 13 mm, en general. Los resultados en las grandes crecidas arrojan variaciones entre 2 a 25 mm, concluyendo en que puede llegar entonces a generarse un aumento en las cotas de fondo de prácticamente el doble de lo analizado para un año estándar, siempre dependiendo el tipo de crecida que suceda, pero prácticamente independiente de la recurrencia que se considere.

Para comparar las cantidades totales que se depositan con respecto al total de sólidos que ingresan, y entre las distintas crecidas y escenarios, se presenta la Figura 27. Se puede observar que si se desarrolla una crecida tipo L (considerada que se produce sobre 2 años, con similar distribución a la de los años 1982-83), para una recurrencia decamilenaria, la cantidad de sedimentos suspendidos que ingresa en el sistema, es casi la mitad de la que ingresaría en una década, y los depósitos pueden llegar a ser mayores que los del período

de los '2000. Esta gráfica, además, resalta la magnitud de este tipo de crecida –L– en términos sedimentológicos, frente a los otros tipos analizados.

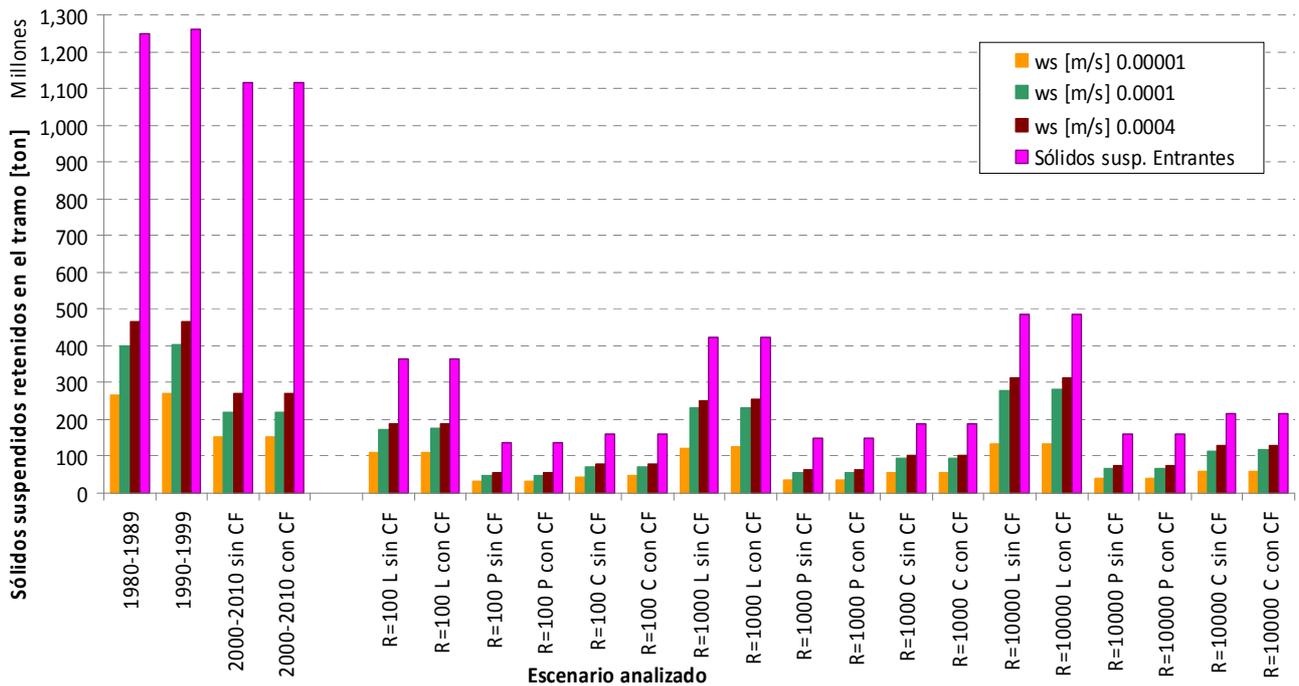


Figura 27. Sólidos suspendidos retenidos en el tramo [ton], para períodos eventos extraordinarios y períodos de largo plazo.

La influencia de tener una ws del sedimento mayor o menor, frente a eventos extraordinarios, es grande, presentándose mayor cantidad depositada en todo el dominio cuando la ws es la mayor. En cada caso analizado (para los tres tipos de crecidas y recurrencias), los depósitos totales llegan a ser casi del doble si se pasa de una ws de 0,00001 m/s a 0,0004 m/s, es decir considerar que el deq está en el entorno de arcilla gruesa a limo mediano.

Para visualizar la distribución de los depósitos dentro del dominio del modelo, se presenta la Figura 28, para la totalidad de los depósitos en las distintas crecidas centenarias (para la tipo L se promedió a un año los valores), para una ws = 0,0001 m/s (Ucd = 0,15 m/s); y en la Figura 29, los dz* (depósitos acumulados ponderados sobre las áreas anegadas) en las distintas celdas.

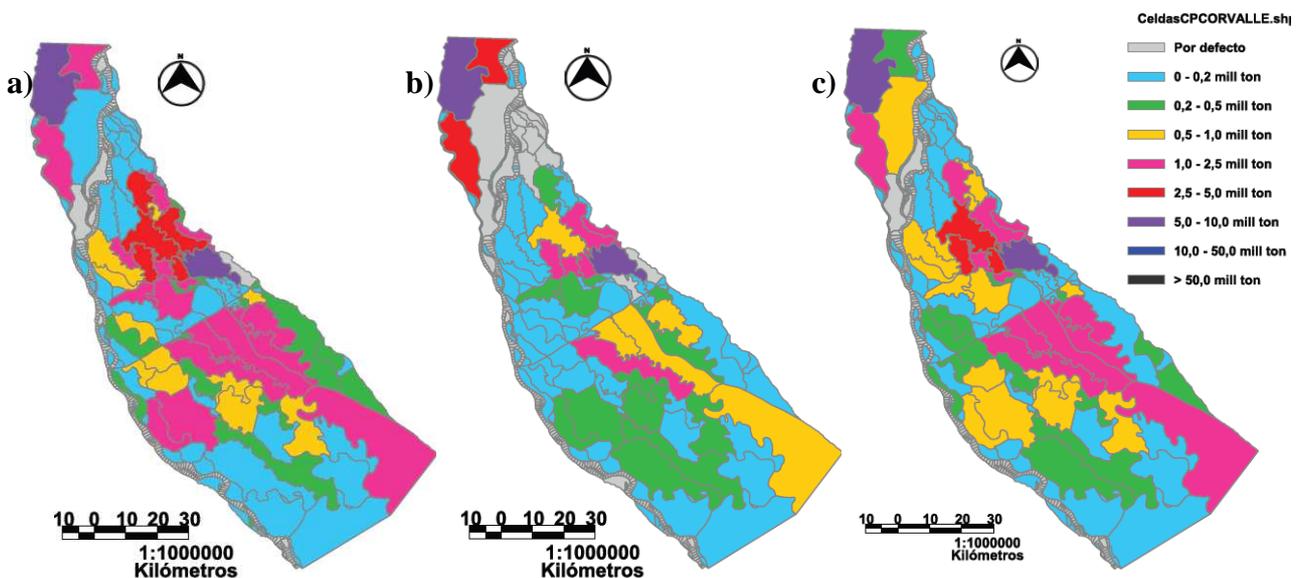


Figura 28. Visualización de gvSIG de depósitos totales Φ en las celdas del dominio: a) Crecida tipo L; b) Crecida tipo P; c) Crecida tipo C (en gris, celdas con depósitos despreciables), con CF, para R = 100 años (ws = 0,0001 m/s).

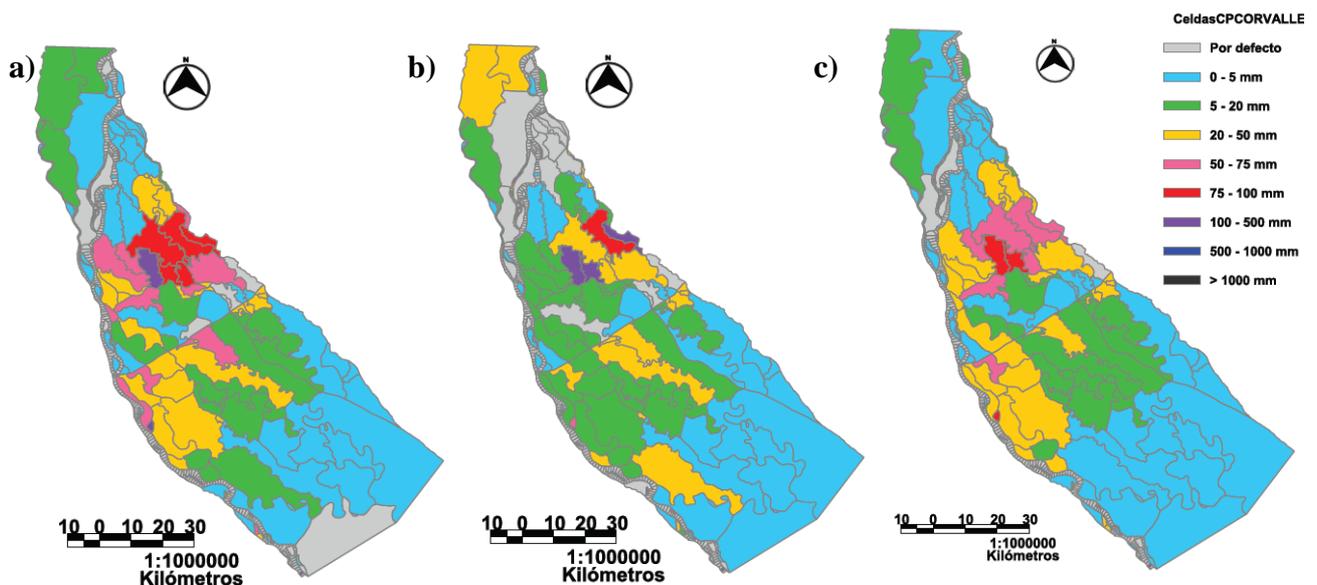


Figura 29. Visualización de gvSIG de las variaciones de la cota de fondo dz*, ponderadas con áreas anegadas en las celdas del dominio: a) Crecida tipo L; b) Crecida tipo P; c) Crecida tipo C (en gris, celdas con variaciones de la cota de fondo despreciables o nulos), con CF, para R = 100 años (ws = 0,0001 m/s).

Los depósitos mayores se dan a aquellas celdas correspondientes a zonas lagunares y con bajas cotas, como ser la laguna Coronda y la Grande sobre el valle, y los sectores aledaños a éstas, donde el flujo de agua escurre con menores velocidades y es más propicio a producirse deposiciones. Se puede apreciar que en todo el curso principal tanto las deposiciones como los depósitos acumulados, son nulos, indicados a través de las zonas grises en las imágenes. También hay algunas celdas en las cuales no hay ningún tipo de deposición en todo el año analizado, que se corresponden en la mayoría de los casos a zonas de cotas altas. A nivel general, las deposiciones se concentran, además de las zonas lagunares indicadas, en el entorno del albardón interno entre la llanura de avenamiento impedido y las playas de regresión, y sobre la faja de bancos y llanura de meandros que existe al sur de la CF, al norte de donde comienza el río Pavón de la planicie, que corresponde también a una zona de depresiones –cotas bajas- interiores en el valle.

En cuanto a las acumulaciones de sedimentos anuales, se nota que aguas abajo de la CF se produce una zona importante de variaciones en las cotas del fondo, especialmente al oeste, ya que el flujo –por la presencia de ella- es redistribuido y se generan mayores concentraciones de éste sobre el este. De todas maneras, las mayores elevaciones del fondo se corresponden con el sector aguas arriba, donde se acumula volumen de agua y encontrarse una zona lagunar, propicia para la sedimentación.

Comparando las distribuciones de sedimentos y magnitudes de las deposiciones con respecto a los distintos tipos de crecidas, en la del tipo L se producen las mayores sedimentaciones, pero más concentradas, que en la del tipo C, que también cuenta con importantes valores, pero son más distribuidos en mayor cantidad de celdas. La del tipo P, tiene menores depósitos y más concentrados aún en menos celdas. Las variaciones de las cotas de fondo, entre la del tipo L y C, responden a la inversa que con los depósitos, ya que la L tiene mayor distribución de aumento de cotas que la C, donde se concentran las variaciones cercanas a la CF, y la del tipo P acusa más cantidades de celdas con importantes elevaciones del fondo.

Para las distintas recurrencias, los depósitos incrementan sus magnitudes, reforzando las zonas donde se alojan las mayores cantidades de sedimentos, fundamentalmente sobre el valle de inundación. Las distribuciones permanecen de forma similar en las distintas recurrencias, dentro de cada tipo de crecida. Siempre resultan mayores los valores sobre la planicie para la crecida tipo L.

Impactos sedimentológicos de la CF Rosario-Victoria, con eventos extraordinarios.

Cuando se considera la presencia de la CF Rosario-Victoria, para los valores de los depósitos sobre el valle, las diferencias no son apreciables, detectándose algo mayores cuando existe el terraplén vial (que genera

menores velocidades aguas arriba del mismo al retener mayor volumen de agua), son menores a los 2,65 millones ton/año, que representan el 1,25% de los depósitos que ingresan al sistema.

A su vez, también se producen mayores cantidades de sedimentos totales sedimentados en el tramo en estudio, los que resultan menores a 1,05 millones ton/año. Éstos representan aproximadamente 0,43% de los totales ingresantes, constituyendo un valor de incremento bajo.

En donde se observan las mayores diferencias sedimentológicas por la presencia del terraplén vial, es en cuanto a las deposiciones sobre la planicie (sobre el sistema Coronda no se percibe prácticamente ninguna diferencia). Las mayores diferencias se presentan casi siempre para la crecida tipo L. Si se ponderan los incrementos de cota del fondo de celdas sobre la totalidad de las áreas de éstas, las diferencias llegan a ser de 0,22 a 4,93 mm para $R = 100$ años, de 0,26 a 5,00 mm para $R = 1000$ años, de 0,11 a 5,11 mm para $R = 10000$ años, todas alrededor de un mismo valor máximo de 5 mm, independientemente de la recurrencia. Por lo evaluado, podemos expresar que la presencia de la CF produce como máximo, en grandes crecidas, un adicional en el incremento de la cota de fondo de 0,2 a 5 mm por año. Si a estos valores se los comparan con las deposiciones acumuladas promedio estimadas anteriormente –de 2 a 25 mm en términos globales-, puede llegar a concluirse que es el equivalente a un aumento máximo en la variación de la cota del fondo entre un 10% al 20% sobre la planicie de inundación, por la presencia del terraplén vial. Estos valores son acordes a los encontrados en la evaluación sobre largo plazo, en los cuales los incrementos eran de un máximo entre el 15% a 18% por la CF.

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 2000-2010, 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 2000-2010, 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. Esta obra antrópica 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.

Para la evaluación sedimentológica, el inconveniente en el establecimiento de concentraciones de carga de lavado representativas en el río Paraná, fue superado con la confección de un concentrograma sintético, realizado a partir de aforos sólidos cercanos a Confluencia (Corrientes), donde desemboca el río Paraguay en el Paraná, que trae los mayores aportes sólidos desde el río Bermejo. El concentrograma confeccionado, además de basarse en máximos, mínimos, promedios y distribución anual revisada, al integrarlo con los caudales líquidos, resulta acorde con la cantidad de sedimentos transportados totales en el año. También se contrastó éste con las concentraciones que resultan de aforos sólidos recientemente publicados por la SSRH, en la sección del Túnel Subfluvial, siendo satisfactoria la comparación.

Para aplicar el modelo sedimentológico, se ha recopilado y analizado gran cantidad de información sobre las características del material sólido suspendido. Se ha realizado un análisis de sensibilidad del modelo para la w_s (desde 10^{-6} a 10^{-3} m/s) y la U_{cd} (de 0,10 a 0,20 m/s), en entornos plausibles que surgen de los valores anteriores, para un año de caudales medios y otro de crecida ordinaria. De lo evaluado, se opta por elegir la U_{cd} intermedia de 0,15 m/s, no evidenciando este parámetro grandes diferencias en los resultados. En cuanto a la w_s , se ha elegido seguir considerando un entorno de aplicación de 0,0001 a 0,001 m/s, ya que los resultados a partir de ellas son plausibles; así la w_s representaría desde partículas de arcilla gruesa a limos medianos, incluyendo los flóculos que puedan tener velocidades de caída más lentas y diámetros más grandes.

Se aplicó satisfactoriamente el módulo sedimentológico, desde el cual se extraen resultados de deposiciones anuales –un rango de las mismas, dado el entorno de w_s analizado- sobre la zona en estudio. Los depósitos anuales sobre la planicie de inundación varían entre 5,5 a 28,5 millones de ton/año, siendo éstos desde el 5% al 21% aproximadamente de la carga total sólida que ingresa en este tramo, valores coherentes con los que se registran en la bibliografía. A su vez, en el valle aluvial se deposita de la carga sólida total que ingresa entre un 20% a 75% aproximadamente. En los depósitos acumulados anualmente, la variación anual de la cota de fondo promedio se estima entre 0,5 a 13,3 mm; siendo valores contemplados dentro de la bibliografía revisada, y también en estimaciones realizadas sobre fotografías de la zona.

Se han podido contrastar las concentraciones de sedimentos suspendidos resultantes sobre la salida del modelo, con las publicaciones recientes de la SSRH de aforos sólidos sobre el río Paraná de las Palmas (estación Zárate) y sobre el Paraná Guazú (estación Brazo Largo), desde 1993 a la fecha, que aunque no son sobre la zona de estudio -y allí hay influencia de la marea-, los mismos son útiles para examinar entornos de concentraciones. En líneas generales, los valores resultantes mensuales resultan acordes.

En cuanto a la distribución de los depósitos en el dominio, los mayores se dan en correspondencia con las zonas lagunares y con cotas bajas, como la laguna Coronda, Grande y la del Pescado, y los sectores aledaños, donde el flujo de agua escurre con menores velocidades y es más propicio a producirse deposiciones. En el curso principal, tanto las deposiciones como los depósitos acumulados, son nulos. En las variaciones de las cotas de fondo anuales, los valores más elevados se presentan en celdas de tamaños reducidos, cercanos a las zonas lagunares indicadas, y en éstas, también hay considerables tasas de acumulación de sedimento.

El efecto sobre el valle de inundación de la presencia de la CF Rosario-Victoria, es mayoritariamente a nivel hidrodinámico. Los efectos sobre la sedimentación son menores, la cual se ha estimado que como máximo puede llegar a producir un incremento de las variaciones de las cotas de fondo (depósitos acumulados) hasta un 15% o 18%, que implican un aumento de las mismas de 1,4 mm hasta 18,6 mm, en el término de más de 10 años. También la CF provoca que se produzcan mayores cantidades de sedimentos depositados, los que oscilan sobre los 2,5 millones toneladas, que representan aproximadamente 0,23% de los totales que ingresan, constituyendo un incremento muy bajo.

Se ha utilizado el modelo hidro-sedimentológico para realizar pronósticos sobre el comportamiento del flujo y sedimentos sobre el sistema cauce-planicie, para eventos de recurrencias extraordinarias. Se analizaron crecidas con caudales máximos de recurrencias centenaria, milenaria y decamilenaria. A su vez, se consideraron tres clases de crecidas, según las distribuciones mensuales de caudales: de larga permanencia (tipo L), de aumento puntual de los caudales (tipo P) y estándar (tipo C). A cada escenario, se lo evaluó sin y con la CF Rosario-Victoria, para cuantificar impactos que ésta produce con eventos extraordinarios.

De los resultados hidrodinámicos, se extrae que sobre el cauce principal los valores máximos de caudales llegan a 30000 m³/s, indicando una capacidad máxima del mismo, absorbiendo el remanente el valle de

inundación a través de los desbordes hacia éste. En todas las recurrencias evaluadas, durante el pico de las crecidas, las cotas del pelo de agua sobrepasan los niveles de evacuación de cada lugar, incluso para el evento de 100 años de recurrencia. El tipo de crecida que produce las mayores áreas inundadas en el valle –cualquiera sea la recurrencia- es la que tiene un incremento repentino en los caudales (tipo P), y la que deja mayores áreas sin cubrir es la de tipo común C, estando la de larga permanencia L en una situación intermedia.

Frente a eventos extraordinarios, como consideración general se puede indicar que la presencia de la CF Rosario-Victoria hace que la permanencia de agua en la zona en el conjunto aguas arriba de la misma se eleve entre 15 y 35%, si el área anegada supera los 500 km² (1/4 de la totalidad del valle aguas arriba). El aumento de tirante, como máximo puede estar en el entorno de los 0,60 y 0,70 m. Por la presencia de esta obra, las cotas a las cuales llega el pelo de agua en el pico de las crecidas equivalen aproximadamente a haber incrementado un orden la recurrencia de los caudales máximos. Para las celdas aguas abajo, no hay cambios significativos, resultando el incremento de la permanencia menor al 1%, dando aumentos y disminuciones máximas del pelo de agua del orden de los 0,20 m. En cuanto a las cotas del pelo de agua en el pico de la crecida, prácticamente no se encuentran diferencias por la presencia o no de la obra vial.

De los resultados sedimentológicos generales anuales, para los eventos extraordinarios, se extrae que los depósitos sobre el valle para la R = 100 años varían entre 22 a 66 millones de ton/año aproximadamente, para R = 1000 años varían entre 26 a 95 millones de ton/año aproximadamente, y para R = 10000 años varían entre 32 a 123 millones de ton/año aproximadamente. El tipo de crecidas que más sedimentación producen es el L, ya que la larga permanencia del agua en la planicie, hace que haya más cantidad de sedimentos por más tiempo que pueda depositarse en ella; la que le sigue en deposición es la tipo C, donde están en fase los picos de caudales sólidos y líquidos y con distribución mensual de tipo estándar; y finalmente la tipo P, al ser repentina la elevación de caudales y desfasada con los picos líquidos, es la de menores deposiciones. Todas en su tipo, siguen deposiciones crecientes con respecto al incremento de la recurrencia que se trate. Los depósitos anuales promedio para las décadas evaluadas, resultan de menores valores que incluso la de tipo P de recurrencia centenaria, aún cuando en dichas décadas se sucedieron crecidas importantes. Además, los depósitos que se acumulan en el valle de inundación durante una crecida extraordinaria, puede llegar a alcanzar los que se generan a lo largo de 10 años, o incluso superarlos ampliamente.

En términos de porcentajes retenidos –en la planicie- de los sólidos que ingresan al sistema, varían desde el 16% hasta el 50% aproximadamente, según el tipo de crecida y la recurrencia. Éstos resultan mayores a los calculados que se retienen habitualmente en un año de evento no extraordinario, ya que se variaba entre 7% a 17%, es decir que con el aumento de recurrencia del caudal máximo, se incrementa el carácter almacenador de la planicie. Estos valores, aún con eventos extraordinarios, con acordes con los encontrados en la bibliografía, hasta del 60%.

La retención de sólidos del tramo estudiado, frente a estos eventos, es de 30 a 155 millones ton/año aproximadamente, que representan desde el 23% al 64% de los sólidos que ingresan, dependiendo del tipo de crecida y recurrencia. Estas variaciones dependen más de la recurrencia que se trate, no tanto del tipo de crecida analizada.

Los valores de incremento de las cotas de fondo sobre la planicie para crecidas extraordinarias, indican variaciones promedios entre 2 a 25 mm, no habiendo prácticamente diferencias en cuanto a las distintas recurrencias del evento. Al comparar estos resultados con los determinados para eventos anuales ordinarios, los cuales variaban desde 1 a 10 o 13 mm, se indica que pueden generarse aumento en las cotas de fondo de prácticamente el doble de lo analizado para un año estándar, dependiendo del tipo de crecida sucedida.

El efecto sobre el valle de inundación de la presencia de la CF Rosario-Victoria, es mayoritariamente a nivel hidrodinámico, generando su mayor impacto frente a grandes crecidas -de los aquí evaluados- sobre la permanencia del agua y en el incremento del tirante durante el pico de la crecida en las zonas anegadas. A su vez, esto hace que se generen efectos sobre la sedimentación, la cual se ha estimado que como máximo puede llegar a producir un incremento de las variaciones de las cotas de fondo (depósitos acumulados) entre un 10% a 20%, que implican un aumento de las mismas, promedio ponderado en todo el sector de la planicie, de 0,2 mm hasta 5 mm en un año de evento extraordinario, independientemente de la recurrencia.

REFERENCIAS

- Amsler, M. L.; Drago, E. C. y Paira, A. R. 2007. *Fluvial sediments: Main channel and floodplain interrelationships*. Capítulo 5, en: *The Middle Paraná River: Limnology of a Subtropical Wetland*, de Iriondo, M. H.; Paggi, J. C. y Parma, M. J. (Eds.). Heidelberg, New York. Parte I, pp. 123 – 142.
- 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. 2007. *Cambios Hidro-Morfológicos Históricos del río Paraná Frente a Rosario: Implicancias Antrópicas y Naturales*. V Jornadas de Conmemoración del Día del Medio Ambiente. Instituto de Fisiografía y Geología, FCEIA-UNR. Rosario, Argentina.
- Basile, P. A. y Riccardi, G. A. 1998. Desarrollo y aplicación de un modelo matemático morfológico cuasi-2D para simular numéricamente los procesos dinámicos de erosión y sedimentación en ríos aluviales. XVII Congreso Nacional del Agua, Santa Fe, Argentina, Tomo III, pp. 472-482.
- Basile, P.A. y Riccardi, G.A. 2002. A Quasi-2D Hydro-Morphological Mathematical Model: An Application to the Argentinean Paraná River. *International Journal of Sediment Research*, 17 (1), 20-30.
- Basile, P. A.; Riccardi, G. A., Garcia, M. L. y Stenta, H. R. 2007. *Quasi-2D modeling of hydro-sedimentological processes in large lowland river-floodplain systems*. Workshop on Morphodynamics Processes in Large Lowland Rivers. Santa Fe, Argentina.
- Bates, P.D., 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.
- DHIS-FCEIA. 1988. *Estudio del tramo comprendido entre los km. 410-440 de la ruta de navegación*, Departamento de Hidráulica e Ingeniería Sanitaria, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario, Argentina.
- Feldhaus, R.; Höttges, 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.
- Iriondo, M. H. 1972. *Mapa geomorfológico de la llanura aluvial del Río Paraná desde Helvecia hasta San Nicolás, República Argentina*. Revista Asociación Geológica Argentina, tomo XXVII (2), pp. 155-160.
- Iriondo, M. y Scotta, E. 1978. *The Evolution of the Paraná River Delta*. Proceedings of the 1978 International Symposium on Coastal Evolution in the Quaternary. Sao Paulo, Brasil. pp. 405-418.
- 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, Universidad de California de Berkeley, EEUU.
- Malvárez, A. I. 1999. *El Delta del río Paraná como mosaico de humedales*. En: Malvárez, A. I. [Ed] *Tópicos sobre humedales subtropicales y templados de Sudamérica*. Oficina Regional de Ciencia y Tecnología de la Unesco para América Latina y el Caribe. SBN 92-9089-064-9. Montevideo, Uruguay, MAB-ORCYT, pp. 35-53.
- Narinesingh, P.; Klaassen G. J. y Ludikhuizen D. 1999. *Floodplain sedimentation along extended river reaches*. *Journal of Hydraulic Research*, Volume 37, Issue 6, pp. 827-845.
- 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.

- Neiff, J. J. 1999. *El régimen de pulsos en ríos y grandes humedales de Sudamérica*. En: A. I. Malvárez y P. Kandus (Eds.), Tópicos sobre grandes humedales sudamericanos ORCYT-MAB (UNESCO), Montevideo, Uruguay, pp. 1-49.
- 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.
- Pittau, M.; Sarubbi, A. y Menéndez, A. 2005. *Análisis del avance del frente y del incremento areal del delta del río Paraná*. XX Congreso Nacional del Agua, Mendoza, Argentina.
- 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, FCEfYN, 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.
- Serman & asociados S. A. 2000. *Estudio hidráulico del puente principal y viaducto Este. Modelación matemática bidimensional*. Informe de Puentes del Litoral S.A., Convenio Gobierno Nacional – Provincias de Santa Fe y Entre Ríos para la obra Conexión Física Rosario-Victoria. Argentina.
- Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) <ftp://edcsgs9.cr.usgs.gov/pub/data/srtm/>
- Soong, T. 1999. Fine Sediment of the Upper Mississippi and Illinois Rivers and Its Disastrous Consequences. International Journal of Sediment Research. Vol. 14, N° 2, pp. 171-177.
- 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.
- Walling, D. E., He, Q. & Nicholas, A. P. 1996. *Floodplains as suspended sediment sinks*. En: Anderson, M.G., Walling, D.E., Bates, P.D. (Eds.) Floodplain Processes. Wiley, Chichester, U. K., pp. 399-440.
- Werner, M.G.F., Hunter, N.M., 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.
- Zapata, C. 1999. *Estudio de la dinámica hídrica del Río Paraná en la transecta Rosario-Victoria*. 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.