

CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL Y NUMÉRICA DE EVENTOS DE CRECIDA EXTRAORDINARIOS EN LA CUENCA DEL RÍO CARCARAÑÁ, ARGENTINA

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL CHARACTERIZATION OF EXTRAORDINARY FLOOD EVENTS IN CARCARAÑÁ RIVER BASIN, ARGENTINA

Díaz Lozada, José Manuel¹; García, C. Marcelo^{1,2}; Herrero, Horacio¹, Heredia Ligorria, Ana I.^{1,2}; Lopez, Fabián³; Castelló, Edgar³ y Brarda, Juan P.³

Resumen

La cuenca del Río Carcarañá (subcuenca de la Cuenca del Plata), es un importante sistema fluvial ubicado en la región central de la República Argentina, que posee un área de más de 50.000 km². La cuenca se extiende sobre el centro-sudeste de la provincia de Córdoba y el sur de la provincia de Santa Fe, siendo esta región unos de los sitios agrícolas más productivos del país y del mundo. El río Carcarañá posee tres importantes tributarios: (a) río Tercero o Ctalamochita, (b) río Saladillo y (c) arroyo Tortugas. Dichos tributarios contribuyen al escurrimiento total del río Carcarañá, con una gran variabilidad estacional de caudales. En los años 2014 y 2015 se registraron en la cuenca importantes crecidas que provocaron la inundación de numerosas ciudades y campos en el sudeste de la provincia de Córdoba y sur de la provincia de Santa Fe (más de un millón de hectáreas inundadas). Frente a esta problemática fue necesario generar un conocimiento más detallado del comportamiento de la cuenca frente a eventos de crecida, para brindar a los organismos de gestión la información necesaria para la toma de decisiones. Es por ello que el objetivo del presente trabajo es caracterizar, de forma experimental y numérica, el escurrimiento superficial de este sistema fluvial para los eventos de crecida de los años 2014 y 2015, con el fin de desarrollar herramientas que permitan a las autoridades de gestión tomar las medidas necesarias para mitigar los efectos de este tipo de eventos extraordinarios. Para cumplir con esto se realizó la cuantificación de caudales en diferentes puntos de la cuenca (que incluyó la evaluación del funcionamiento de los órganos de descarga de la presa de Embalse de Río Tercero), mediante el uso de un ADCP diseñado para aguas poco profundas. Con la información obtenida, se determinaron los parámetros hidráulicos del flujo y se realizó el ajuste de curvas Altura-Caudal para nueve secciones en toda la cuenca y se analizó la evolución de los hidrogramas en diferentes secciones en donde se refleja cómo impacta la operación de los órganos de evacuación del embalse en los caudales escurridos. Finalmente, utilizando la información obtenida de las mediciones de campo se implementaron y calibraron dos modelos hidráulicos unidimensionales del escurrimiento en el cauce del río Tercero en las localidades de Bell Ville y Villa María (ubicadas en la provincia de Córdoba-Argentina). Los resultados obtenidos fueron utilizados en el período 2015/2016 por los organismos de gestión para determinar medidas estructurales y no estructurales a implementar.

Palabras clave: Hidráulica Fluvial, Métodos experimentales, Trabajos de campo, ADCP, Simulaciones Numéricas

Abstract:

Carcarañá River basin (a sub-basin of La Plata River basin), is an important fluvial system in the central region of Argentina with area of over 50.000km². The basin extends over the center-south-east region of the Santa Fe province and center of Cordoba province in one of the most productive agricultural sites of both, the country and the world. The Carcarañá River has three major tributaries: (a) Tercero (Ctalamochita) River, (b) Saladillo River and (c) Tortugas Creek. These tributaries contribute in a different way to the discharge of Carcarañá River with a great seasonal variability of the flows. Major flooding have occurred in the basin in 2014 and 2015 and caused important damages in many towns and farmlands in the southeast region of the Córdoba province and south of Santa Fe province, and about one million of hectares were flooded. Flooding management requires a detailed characterization of the behavior of the fluvial system during flood events. Thus, the objective of this work is to characterize experimentally and numerically the surface flows in the basin for 2014 and 2015 floods events. To achieve this objective, a quantification of flow discharge was performed in different tributaries of the basin (including the quantification of effluent flow discharge of the Río Tercero Dam valves) using an ADCP YSI/SonTek RiverSurveyor S5 designed for shallow waters. The information obtained from field measurements was used to calibrate one-dimensional hydraulic models for two Tercero River reaches at Bell Ville and Villa Maria cities (located in the province

¹ Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA), Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba.

Av. Filloy s/n, Ciudad Universitaria, CP 5000, Córdoba, Argentina

² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina

³ Secretaría de Recursos Hídricos del Gobierno de la Provincia de Córdoba.

Email: jmdiazlozada@gmail.com

of Córdoba, Argentina). In addition rating curves for nine river cross sections were calibrated for different tributaries in the basin. Using this information, the evolutions of the hydrographs in different cross sections were analyzed; thus it has been possible to evaluate how the early reservoir operation of the dams in the upstream basin impacts on the observed flow. The results obtained in this work were used by the government agencies for flood management regulating outflow from the dam and designing the infrastructure for flood mitigation, etc.

Keywords: Fluvial Hydraulics, Experimental Methods, Fieldwork, ADCP, Numerical Simulations.

1. INTRODUCCIÓN

La cuenca del río Carcarañá es una de las principales cuencas superficiales del centro de Argentina que abarca una superficie de más de 50.000 km², la cual es compartida entre las provincias de Córdoba y Santa Fe. El río Carcarañá nace en la provincia de Córdoba por la confluencia de los ríos Tercero (Ctalamochita) y Saladillo (nombre del curso inferior del río Cuarto). Luego, este río ingresa en la provincia de Santa Fe, a la que cruza desembocando en la localidad de Gaboto en el río Coronda, que a su vez lo hace en el río Paraná (**Figura 1**).

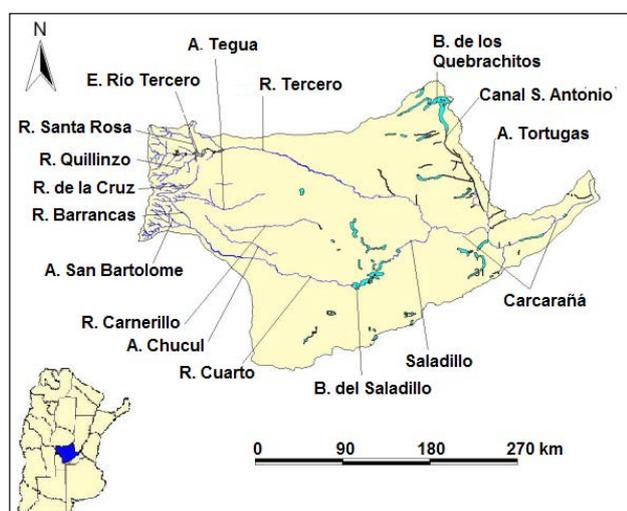


Figura 1.- Cuenca del río Carcarañá

La cuenca de estudio, posee tres importantes subcuencas: (a) subcuenca del río Tercero, (b) subcuenca del río Saladillo y (c) subcuenca del arroyo Tortugas. La subcuenca del río Tercero (Ctalamochita) constituye un sistema de alimentación pluvial con régimen permanente y es la cuenca más regulada de la Provincia de Córdoba (Saldaño, 2010) por seis embalses: (a) Embalse Cerro Pelado, (b) Embalse Arroyo Corto, (c) Embalse de Río Tercero (el cual es el que posee mayor capacidad de almacenamiento: 550 hm³), (d) Embalse Ingeniero Cassaffousth, (e) Embalse Ingeniero Benjamín Reolín y (d) Embalse Piedras Moras (Lenarduzzi, 2012).

En el año 2014 se registró en la cuenca alta del río Tercero o Ctalamochita, una secuencia de precipitaciones, destacándose entre ellas la del día 14 de febrero superior a los 200 mm en 12 horas (**Figura 2**), que generaron una gran volumen

escurrido hacia los embalses y luego una crecida significativa de ese río aguas abajo, la cual inundó varias localidades del sudeste de la provincia de Córdoba, entre las que se encuentran las ciudades de Villa María, y Bell Ville. En el año 2015, los eventos de precipitaciones (**Figura 3**), con láminas de lluvia normales poco espaciadas en el tiempo, produjeron que el escurrimiento superficial fuera importante, lo que obligó a la erogación de grandes caudales, pero de menor magnitud que el año 2014 debido al trabajo de regulación llevado a cabo en los embalses con antelación.

La subcuenca del río Saladillo (nombre del curso inferior del río Cuarto o Chocancharava) es la segunda en importancia dentro de la cuenca del Carcarañá. En dicha cuenca, se encuentran los “Bañados del Río Saladillo”, los cuales fueron seriamente afectados debido a dos grandes canales, el canal del río Cuarto y el canal de La Brava realizados con el objeto de mitigar las inundaciones producidas en el año 2001. Dichas canalizaciones provocaron una disminución significativa del área original de los bañados (Brandolin et al., 2013), por lo cual el río Saladillo aporta en la actualidad mayores caudales al río Carcarañá. En el año 2015, las sustanciales precipitaciones registradas sobre la cuenca (especialmente cuenca baja), sumado a las numerosas canalizaciones produjeron grandes crecidas en el río Saladillo, que ocasionaron inundaciones en las zonas rurales del sudeste de la Provincia de Córdoba.

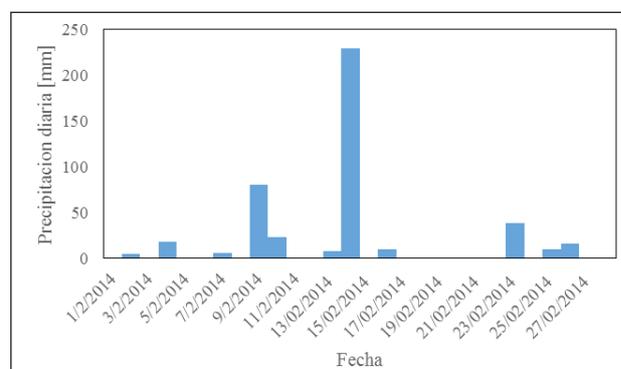


Figura 2.- Precipitación diaria en el mes de febrero de 2014 en la estación CERRO BLANCO (Lat. 32° 13' 60,00", Long 64° 46' 60,00") ubicada en la cuenca alta del río Tercero o Ctalamochita. Fuente: SSRH (2016)(<http://www.hidricosargentina.gov.ar/>)

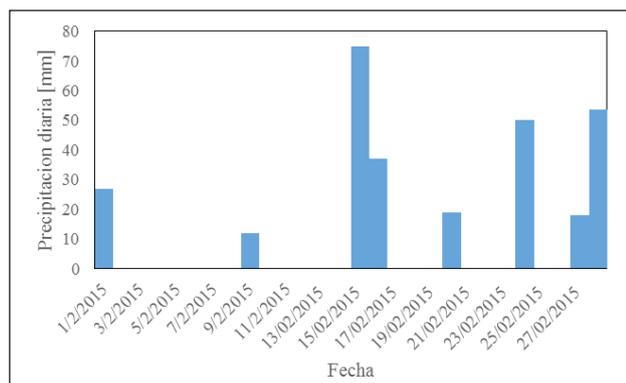


Figura 3.- Precipitación diaria en el mes de febrero de 2015 en la estación CERRO BLANCO (Lat. 32° 13' 60,00", Long 64° 46' 60,00") ubicada en la cuenca alta del río Tercero o Ctlamochita. Fuente: SSRH (2016) (<http://www.hidricosargentina.gov.ar/>).

La subcuenca del arroyo Tortugas, que aporta a la cuenca baja del río Carcarañá, fue canalizada para transportar el agua proveniente de desagües pluviales urbanos y del escurrimiento superficial en campos de la región centro-este de la provincia de Córdoba y del oeste de la provincia de Santa Fe, por lo cual presenta en determinadas épocas del año caudales de sustancial magnitud.

A partir de los efectos generados por los eventos de crecida registrados en los años 2014 y 2015, se procedió a cuantificar y a caracterizar el escurrimiento superficial en los principales ríos que conforman la cuenca con el objeto de conocer más en detalle el comportamiento de los mismos y generar la información que los organismos de gestión requieren para la toma de decisiones.

2. OBJETIVO

El objetivo del presente trabajo es cuantificar y caracterizar los caudales escurridos en diferentes puntos de la cuenca para los eventos de crecida de los años 2014 y 2015 y desarrollar herramientas que permitan a las autoridades de gestión tomar las medidas necesarias frente a este tipo de emergencias. Dichas herramientas consisten en la implementación y calibración (usando datos experimentales) de dos modelos hidráulicos para las localidades de Bell Ville y Villa María (ambas en la provincia de Córdoba, Argentina) y, la ejecución de curvas de Altura-Caudal en nueve secciones de la cuenca. Además se analiza el impacto de la regulación temprana del embalse en los caudales escurridos.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

El instrumental utilizado para las mediciones de caudales superficiales escurridos en distintas secciones en el sistema fluvial analizado es el Perfilador de Corriente Acústico Doppler (ADCP, por sus siglas en inglés) "River Surveyor S5" (número de serie S501387) fabricado por la compañía YSI/Sontek para aguas poco profundas (medición de

velocidad hasta cinco metros de profundidad y profundidades de hasta a 15 m; SonTek, 2013) (Figura 4). El ADCP provee información batimétrica (profundidades) de la sección y de las velocidades del flujo en tres direcciones ortogonales, lo que permite definir el caudal generalmente con un error menor al 5% (Oberg and Mueller, 2007).



Figura 4.- ADCP y demás dispositivos montados en la plataforma móvil de medición.

En un comienzo los ADCPs fueron desarrollados para mediciones de caudales en ríos cuya profundidad mínima fuera de aproximadamente 1,5 metros, lo cual imposibilitaba el uso de esta técnica en ríos de baja profundidad. Gracias a los desarrollos efectuados en los últimos diez años, en la actualidad existen ADCPs (como el utilizado en este trabajo) que permiten realizar aforos en ríos de baja profundidad (profundidades mínimas mayores a 0,3m), típicos de la región central de la República Argentina.

En primer lugar el ADCP se utilizó para cuantificar los caudales erogados por los órganos de descarga del embalse de río Tercero, principal regulador de los caudales escurridos en el río Tercero. Para ello se operó el ADCP desde las márgenes del cauce del río Tercero aguas abajo de la presa. Por otra parte las mediciones de caudales escurridos durante los eventos extraordinarios en cada sección del sistema fluvial fueron efectuadas, por seguridad y accesibilidad, desde puente (Figura 5). La medición desde puente es posible, ya que, el ADCP al medir completamente el campo de velocidades, no requiere que el flujo sea uniforme para que se cumplan las suposiciones necesarias para efectuar las mediciones con molinetes, las que no se cumplen en las cercanías de puentes. En cada sitio de medición, se aseguró que el instrumento este a una distancia suficiente para evitar que la turbulencia generada por las pilas del puente afecten los resultados obtenidos en la medición, de este modo se cumple el principio de homogeneidad supuesto en las mediciones con ADCP. En las secciones de medición se efectuó un número par de transectas con un tiempo total de medición de 12 minutos, que es lo que recomienda el USGS (Mueller et al, 2013), lo que equivale, aproximadamente, a cuatro transectas en el sistema de estudio.



Figura 5.- Medición realizada con ADCP desde puente. Río Saladillo 09/03/2015

A partir de la información de caudal obtenida mediante el uso del ADCP, se elaboraron las curvas de Altura-Caudal (H-Q) que relacionan los valores de caudales superficiales escurridos en el sistema fluvial con la lectura de superficie libre obtenida a través de una escala. Los valores extremos de caudal medidos marcan el límite de capacidad de la sección, de este modo se evita la extrapolación de la curva altura caudal, que puede generar importante errores al momento de estimar el caudal en situaciones extremas. La metodología utilizada consistió en desarrollar interpoladores mediante el ajuste estadístico de esos valores utilizando la ecuación matemática (con fundamento hidráulico) presentada por el Servicio Geológico de los Estados Unidos –USGS- (Kennedy, 1984). Los interpoladores generados son del tipo:

$$Q = \alpha (H - H_{Q_0})^\beta = \alpha \Delta H^\beta \quad [1]$$

Donde α y β son constantes de calibración, H es el nivel o altura de superficie libre respecto a un nivel de referencia y H_{Q_0} es un parámetro que representa la altura de superficie libre cuando no hay escurrimiento (caudal nulo) (Figura 6). El parámetro H_{Q_0} es hipotético y no puede ser medido in situ en cursos fluviales (donde la batimetría del lecho es irregular), pero si puede ser relevado en estructuras de control como vertederos.

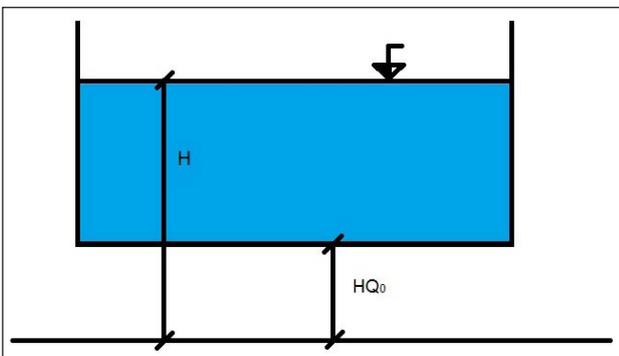


Figura 6.- Esquema de un canal rectangular donde se representa el nivel de superficie libre registrado respecto a un nivel de referencia arbitrario (H) y el nivel caudal nulo (H_{Q_0})

Finalmente se procedió a la construcción de dos modelos hidráulicos unidimensionales mediante el programa HEC-Ras desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos (US Army Corps. por sus siglas en inglés). Los modelos creados fueron calibrados mediante la información experimental relevada en este estudio, visitas a campo y narraciones de los vecinos y autoridades. Para la construcción del modelo hidráulico de Villa María, se realizó un relevamiento topográfico de aproximadamente ocho kilómetros de longitud en el cauce del río desde el azud de dicha localidad hasta el puente de la ruta nacional 158. Posteriormente se generó un modelo digital del terreno mediante el uso del programa de sistema de información geográfica (GIS, por sus siglas en inglés) ArcGis® (Figura 7). El modelo digital de terreno (MDT) creado fue exportado al software HEC-Ras a través de la utilización del programa HEC-GeoRas.

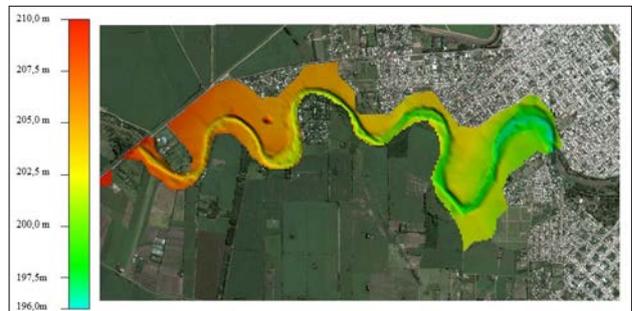


Figura 7.- Modelo digital de elevación del terreno del tramo aguas arriba del azud de la Ciudad de Villa María hasta el puente de la ruta Nacional 158.

En lo que respecta a los coeficientes de rugosidad utilizados para simular la resistencia al flujo del fondo y las márgenes, y debido a que durante los eventos de crecidas el río inunda las planicies de inundación, se tuvo en cuenta que la rugosidad de estas es la misma que la rugosidad del cauce. Por esta razón se adoptó (y luego se verificó con datos experimentales) un coeficiente de rugosidad n de Manning de 0,12 para las planicies de inundación debido a la gran densidad de vegetación existente en las mismas, mientras que para el cauce principal se utilizó un n de Manning de 0,025. Dicho valor se corresponde con el valor obtenido despejando de la ecuación de Manning el valor del coeficiente utilizando los datos relevados experimentalmente el 19/11/2013 (Tabla 1) cuando el flujo escurría totalmente por el cauce principal.

Para el caso del modelo hidráulico de la localidad de Bell Ville, el Gobierno de la provincia de Córdoba proveyó un modelo HEC-Ras ya construido con secciones relevadas cada 50 metros, el cual fue corregido y mejorado para representar adecuadamente las condiciones que se observaron en campo. Entre dichas correcciones se incluyeron: (a) Colocación de pilas en los puentes, (b) modificación de la condición de borde (la misma consistió en determinar, para

un caudal definido, el nivel de superficie libre que generaba en la sección donde se encontraba la curva altura-caudal, ubicada en el Puente Sturla, el nivel correspondiente al caudal definido) y (c) Definición del n de Manning, adoptándose un valor de 0,031 cercano al valor de 0,029 determinado por Herrero et al (2013) en la confluencia de los ríos Tercero y Saladillo ubicado varios kilómetros aguas abajo. Una vez implementados los modelos hidráulicos se procedió a realizar simulaciones para diferentes escenarios de caudales y determinar los niveles de superficie libre alcanzados.

Tabla 1.- Calibración del coeficiente n de Manning para el tramo del río Tercero en la Ciudad de Villa María utilizando datos experimentales relevados el 19/11/2013

Parámetro	Valor	Unidad
Caudal	9,6	m ³ /s
Velocidad media (U)	0,69	m/s
Área (A)	13,98	m ²
Perímetro Mojado (P)	27,57	m
Radio Hidráulico (R)	0,51	m
Pendiente (S)	0,0562*	%
Coef. de rugosidad de Manning (n)	0,0228	

*Pendiente media del cauce determinada por Riccardi et al (2013) utilizando imágenes satelitales SRTM

4. LOCALIZACIÓN DE LOS SITIOS DE MEDICIÓN

Los datos necesarios para realizar este trabajo se obtuvieron de mediciones realizadas en diferentes ríos de la cuenca en las secciones Fitz Simon, Villa Ascasubi, Villa María, Bell Ville, Saladillo, Inrville, Cruz Alta, Tortugas, Carcarañá, Pueblo Andino y Gaboto. Dichas secciones son mostradas en la Figura 8. Las secciones mencionadas son monitoreadas periódicamente por los autores de este trabajo en condiciones normales (cuatro monitoreos estacionales por año) y las mismas fueron seleccionadas en virtud de su: (a) Accesibilidad (b) Existencia de puente e (c) Importancia para los organismos de gestión. Se realizaron campañas de monitoreo adicionales a los mencionados, durante los eventos extraordinarios de los años 2014 y 2015.



Figura 8.- Sitios de medición ubicados en la cuenca del río Carcarañá.

5. RESULTADOS

5.1 Cuantificación de los caudales erogados por los órganos de descarga del embalse de Río Tercero (Fitz Simon)

Se detallan aquí resultados de la cuantificación de los volúmenes que descargan las estructuras de evacuación de la presa Fitz Simon, que embalsa las aguas del río Tercero. Esta presa es la de mayor capacidad del sistema (550 hm³) y permite regulación para las grandes crecidas. Se realizaron cuatro campañas de medición en el canal de descarga de la presa. La primera se realizó con dos turbinas funcionando y el descargador de fondo prácticamente cerrado (el mismo no puede cerrarse totalmente), la segunda con el descargador de fondo abierto completamente y las dos turbinas funcionando, la tercera con el descargador de fondo abierto completamente, las dos turbinas funcionando y un bypass generado en el sector de una turbina fuera de funcionamiento y la última con todos los órganos de evacuación abiertos a su máxima capacidad, luego de una serie de obras efectuadas por las autoridades provinciales (tres turbinas funcionando, tres válvulas Howell-Bunger a máxima capacidad y el descargador de fondo completamente abierto). Los resultados de los aforos realizados se muestran en la **Tabla 2**.

Tabla 2.- Caudales aforados en la evaluación de los órganos de descarga de la presa Fitz Simon.

Fecha	Condición	Caudal aforado
12-11-14	2 generadores (10m ³ /s c/u) y descargador de fondo cerrado con perdidas	23,0 m ³ /s
06-02-15	2 generadores (10m ³ /s c/u) y descargador de fondo máxima apertura	39,8 m ³ /s
26-02-15	2 generadores (10m ³ /s c/u), bypass efectuado en la tercera turbina (fuera de servicio en ese momento) y descargador de fondo máxima apertura	37,8 m ³ /s
22-01-16	3 generadores (10m ³ /s c/u), 3 válvulas chorro Howell-Bunger (17m ³ /s c/u) y descargador de fondo máxima apertura	96,2 m ³ /s

En esta tabla se observa que las inversiones realizadas permiten tener una mayor capacidad de regulación del embalse (incremento de la capacidad de erogación mayor al 100%), de modo de poder generar un volumen de reserva para retener las crecidas e evitar las inundaciones aguas abajo.

5.2 Cuantificación de caudales máximos y caracterización hidrodinámica del flujo

Desde el año 2012 hasta la actualidad el grupo de trabajo a cargo de este estudio realiza el monitoreo del sistema del río Carcarañá. Los máximos caudales

medidos en cada sección aforada del sistema fluvial ocurrieron en el periodo 2014 y 2015. En la Tabla 3 se muestran los resultados obtenidos del monitoreo de los máximos escurrimientos observados en cada una de las secciones de medición, junto a los principales parámetros hidráulicos que caracterizan hidrodinamicamente el flujo en esas condiciones.

Se puede observar que en algunas secciones la velocidad máxima relevada fue superior a 3 m/s, lo cual es muy difícil de medir con técnicas convencionales como molinetes. Al realizar estas mediciones se llegó al límite superior de aplicación del ADCP RiverSurveyor S5.

Tabla 3.- Caudales y parámetros hidráulicos medidos en los máximos eventos de la cuenca entre 2014/2015

Parámetro	Villa Ascasubi	Villa María	Villa María	Bell Ville	Saladillo	Saladillo
	27/02/2014	27/02/2014	04/03/2015	05/03/2014	09/03/2015	28/04/2015
Caudal [m³/s]	482,67	325,96	340,10	265,65	266,47	120,09
Veloc. Media [m/s]	1,31	1,26	1,14	1,13	1,42	1,47
Veloc. Máxima [m/s]	3,16	3,13	3,07	2,70	3,01	2,40
Prof. Media [m]	1,73	2,40	2,42	5,22	5,77	3,12
Prof. Máxima [m]	4,27	5,85	4,99	8,15	7,76	4,73
Ancho [m]	211,91	108,03	122,93	44,51	32,47	26,17
Parámetro	Inrville	Cruz Alta	Carcarañá	Pueblo Andino	Pueblo Andino	Gaboto
	09/03/2015	09/03/2015	18/11/2015	29/04/2015	18/11/2015	18/11/2015
Caudal [m³/s]	629,40	948,74	300,63	239,06	315,51	261,05
Veloc. Media [m/s]	1,34	1,51	0,72	1,10	1,18	0,99
Veloc. Máxima [m/s]	3,10	3,07	3,48	2,74	3,27	2,10
Prof. Media [m]	4,93	5,20	6,52	3,94	4,71	4,10
Prof. Máxima [m]	8,26	9,27	8,93	5,14	5,95	5,28
Ancho [m]	93,67	120,65	64,44	55,42	57,06	64,56

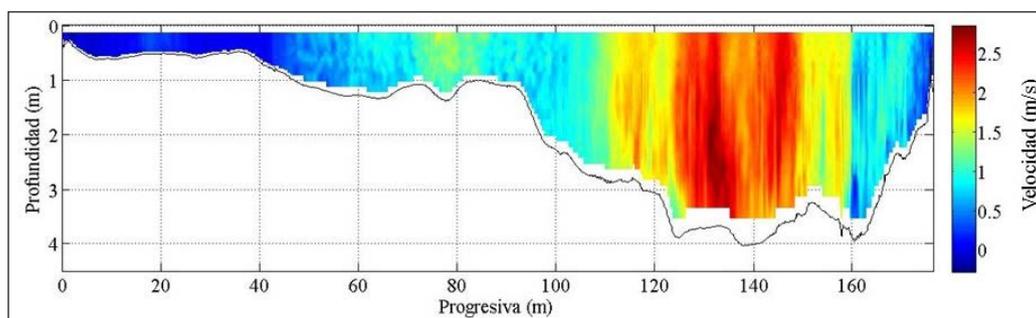


Figura 9.- Campo de velocidades longitudinales de la sección de Villa Ascasubi el día 27/02/2014. Se observa que el ancho no coincide con el descrito en la tabla 3, esto se debe a que la imagen no muestra las velocidades extrapoladas en los sectores no medidos en las cercanías de las márgenes.

En determinadas secciones (por ej. Villa Ascasubi, Villa María y Bell Ville), se observa que las mismas poseen grandes sectores de estancamiento o recirculación que producen que la sección efectiva del flujo sea menor que el área total inundada. En la **Figura 9** se muestra el campo de velocidades longitudinales de la sección de Villa Ascasubi el día 27/02/2014. Se puede observar que las máximas velocidades están concentradas en un pequeño sector del ancho total de la sección y que en las cercanías de la margen izquierda la velocidad del agua es casi nula.

En la sección de Villa María se observa una importante recirculación en la margen izquierda mientras que en la margen derecha el flujo se ve perturbado por una isla. En el caso de Bell Ville,

la gran cantidad de vegetación en las márgenes produce que el caudal se concentre en el área central de la sección. Debido a esta problemática, las autoridades están trabajando en eliminar algunos obstáculos que dificultan el escurrimiento del agua (árboles, escombros, islas, etc).

5.3 Determinación de la capacidad del cauce en diferentes secciones.

Mediante el uso de la información relevada durante los periodos de crecida, se pudo determinar la capacidad hidráulica del cauce en diferentes secciones de medición, ya que durante las campañas de aforo se midieron caudales que alcanzaban los niveles de desborde (**Tabla 4**).

Tabla 4.-Capacidad del cauce en las diferentes secciones de medición

Río	Sección	Capacidad del cauce (m ³ /s)
Tercero (Ctalamochita)	Villa María – Pte. Alberdi	350
Tercero (Ctalamochita)	Bell Ville – Puente Sarmiento	250
Saladillo	Saladillo – Ruta 6	260
Carcarañá	Inrville – Ruta 12	650
Carcarañá	Cruz Alta – Ruta 15	950

Sobre la base de esta información y las mejoras mencionadas anteriormente en los órganos de evacuación de las presas ubicadas aguas arriba, las autoridades realizan en la actualidad un manejo de embalse más eficiente para evitar que el caudal erogado de las presas no supere los 200 m³/s, para de ese modo evitar inundaciones aguas abajo en el río Tercero.

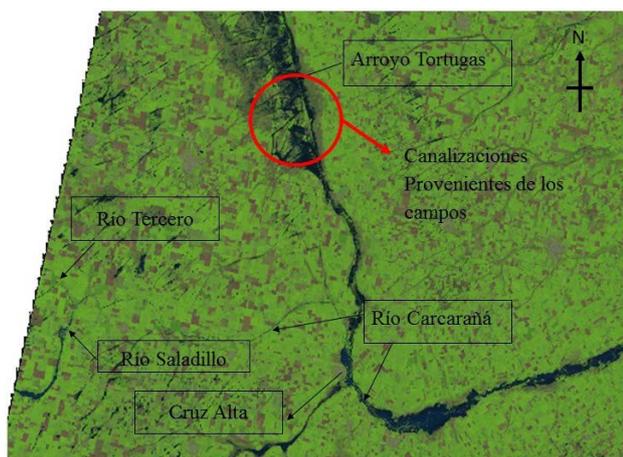


Figura 10.- Imagen Satelital Landsat 8 del día 9 de marzo de 2015 en donde se muestra los desbordes registrados en la cuenca en las cercanías de la localidad de Cruz Alta.

En lo que se refiere al río Carcarañá, a modo ilustrativo en la **Figura 10** se muestra una imagen satelital de las inundaciones registradas en las cercanías de la localidad de Cruz Alta (Córdoba) el día 9 de marzo de 2015, en donde se encontró la particularidad de que todos los principales tributarios del río Carcarañá presentaban importantes caudales con niveles de superficie libre que alcanzaban los tableros de los puentes. En esta campaña se registró que el caudal que el río Carcarañá entregaba a la provincia de Santa Fe era de 950 m³/s (mediante este valor la provincia de Córdoba emitió una alerta a la provincia de Santa Fe). Dicho caudal sumado a los aportes de los campos y arroyos aguas abajo provocaron graves daños y destrozos en las localidades santafesinas. Por ejemplo, el puente de la ruta 9 en la localidad de Carcarañá fue sobrepasado por el agua, esto generó

daños estructurales importantes y por tal motivo las autoridades locales decidieron prohibir la circulación vehicular.

5.4 Ajustes y validación de Curvas Altura – Caudal

Durante el evento de crecida del año 2014 se aforaron caudales en un amplio rango incluyendo, en la mayoría de las secciones, el caudal máximo que podía escurrir (luego se producen desbordes). Dichos aforos proveyeron de valores extremos los cuales son muy importantes a la hora de ajustar una relación altura caudal. Con los caudales de crecidas aforados durante el evento de crecida registrado en el año 2015 (con valores menores a los registrados en 2014) se validaron dichas curvas y además esto permitió a los organismos de gestión tener una estimación rápida y confiable de caudal a través de la lectura de una variable sencilla como es el nivel de una escala. En la **Tabla 5** se encuentran todos los parámetros a utilizar en la ecuación 1 para obtener las curvas altura-caudal ajustadas.

Tabla 5.- Parámetros de la ecuación 1 calibrados en diferentes secciones del sistema fluvial del río Carcarañá.

Sección	α	β	H_{00} (m)	Qmax (m ³ /s)	Qmin (m ³ /s)
Río Tercero (Ctalamochita) – Villa Ascasubi	45,3	1,67	-0,36	482	17
Río Tercero (Ctalamochita) – Puente Alberdi - Villa María	32,4	1,67	-0,69	326	10
Río Tercero (Ctalamochita) – Puente Sarmiento – Bell Ville	7,6	1,67	-0,14	233	20
Río Tercero (Ctalamochita) – Puente Sturla – Bell Ville	6,9	1,67	1,00	233	20
Azud San Marcos	59,7	1,50	-0,08	113	14
Río Carcarañá – Inrville*	31,3	1,67	-0,86	206	36
Río Carcarañá – Puente Ruta 15 – Cruz Alta	21,3	1,68	-0,60	276	34
Río Carcarañá – Pueblo Andino	23,4	1,67	-0,77	345	32
Arroyo Tortugas – Tortugas**	9,9	1,67	-0,22	56	3

*Los niveles se encuentran referenciados a un nivel de 5,5 m por debajo del nivel inferior de la viga del puente.
 **Los niveles se encuentran referenciados a un nivel de 4,5 m por debajo del nivel inferior de la viga del puente.

En la **Figura 11** se muestra la curva altura-caudal de la sección de medición de Villa Ascasubi sobre el Río Tercero (Ctalamochita). Los rombos

corresponden a los datos con que fue ajustada la curva y los triángulos a los datos registrados en el año 2015. En campañas posteriores (junio de 2015, septiembre de 2015 y marzo de 2016), se observó que en algunas secciones, como por ej. las ubicadas en Villa Ascasubi y Villa María, la geometría de la sección transversal sufrió modificaciones debido a los procesos erosivos y de sedimentación producidos por el río. Esto produjo que la ley altura-caudal presente discrepancia entre los resultados medidos y los estimados mediante su uso. En el caso de la curva altura caudal de Villa Ascasubi, entre los años 2014 y 2015 (datos hasta julio de 2015) se observó una buena correspondencia entre los valores reportados por la curva altura-caudal y los medidos a partir de $126 \text{ m}^3/\text{s}$. Actualmente el equipo de trabajo se encuentra evaluando y estudiando los procesos de transporte de sedimento que modifican las secciones donde se encuentran ajustadas las relaciones altura-caudal (principalmente Villa María y Villa Ascasubi), para de ese modo evaluar la validez de la ley y en cuyo caso actualizarla o buscar una sección más estable. También cabe destacar que se está trabajando para generar curvas altura-caudal en la cuenca alta del río Tercero para los ríos Quillinzo, La Cruz, Grande y Santa Rosa.

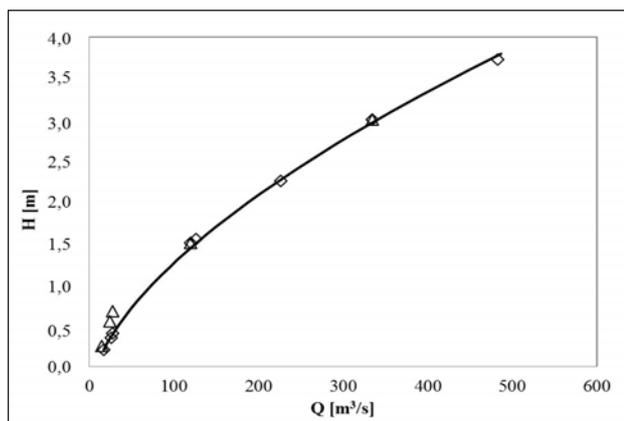


Figura 11.- Curva Altura-Caudal para la sección de Va. Ascasubi. Los rombos son los datos con que fue ajustada la curva mientras que los triángulos son los datos con que se validó la curva.

5.5 Reconstrucción de Hidrogramas

Mediante los datos de nivel relevados en las diferentes secciones por los organismos de bomberos y defensa civil se reconstruyeron los hidrogramas de crecida en ambos eventos. Se incluyen además los hidrogramas de erogación del Dique Piedras Moras (Figura 12 y Figura 13) donde se puede observar que el caudal pico del año 2015 ($390 \text{ m}^3/\text{s}$) es menor que el del año 2014 ($580 \text{ m}^3/\text{s}$). Esto se debe a la operación eficiente de los órganos de evacuación del embalse para atenuar la crecida que incluyó la evacuación previa al pico (Figura 13) de un caudal constante de $180 \text{ m}^3/\text{s}$ que se mantuvo por casi un mes. También se puede observar como a medida

que avanza el hidrograma a las diferentes secciones, el pico disminuye no solo debido a la regulación producida por el tránsito, si no también debido a los desbordes que sufre el río a lo largo de su recorrido.

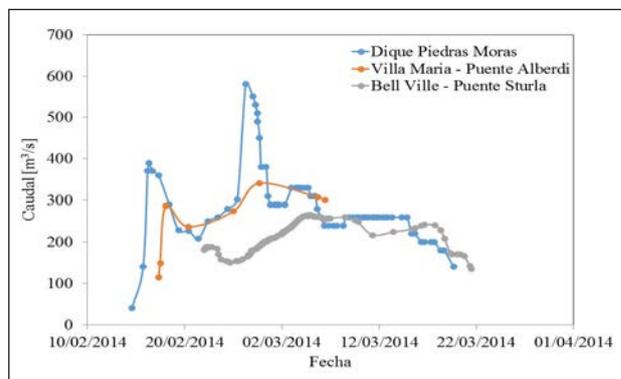


Figura 12.- Hidrograma de crecida registrado en las secciones de Bell Ville (Puente Sturla), Villa María y Piedras Moras durante el evento del año 2014.

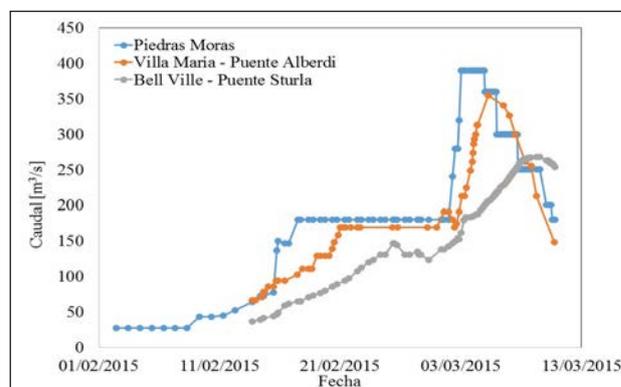


Figura 13.- Hidrograma de crecida registrado en las secciones de Bell Ville (P. Sturla), Villa María y Piedras Moras durante el evento del año 2015

El manejo de embalse efectuado permitió que los daños ocasionados durante la emergencia del año 2015 fueran menores que en el año 2014.

5.6 Modelación Hidráulica unidimensional de un tramo del río Tercero en las localidades de Bell Ville y Villa María

En la Figura 14 se muestra el mapa de inundación para diferentes caudales generado mediante el modelo unidimensional HEC-Ras para el tramo del río Tercero que escurre en la localidad de Villa María (Córdoba), sin haber realizado ninguna obra de contención,. Se puede observar que una de las zonas más críticas es el sector cercano a "El Yuyal" en el Barrio Vista Verde de dicha localidad donde el nivel del agua alcanzó, entre las calles Río Limay y Ruta 158 (sector "El yuyal"), una cota de $206,86 \text{ msnm}$ (para un caudal de $400 \text{ m}^3/\text{s}$) mientras que el nivel del eje de calzada es de $206,94 \text{ msnm}$. En la Figura 15 se muestra el nivel alcanzado por el agua en el sector mencionado el día 27 de febrero de 2014, que

es muy cercano a lo obtenido por la modelación. En esa fecha, se aforo en el Puente Alberdi (aprox. 9km aguas abajo), un caudal de 325 m³/s. Dicho caudal

es menor a 400 m³/s, debido a que el río presentaba importantes desbordes aguas arriba de la sección de aforo.

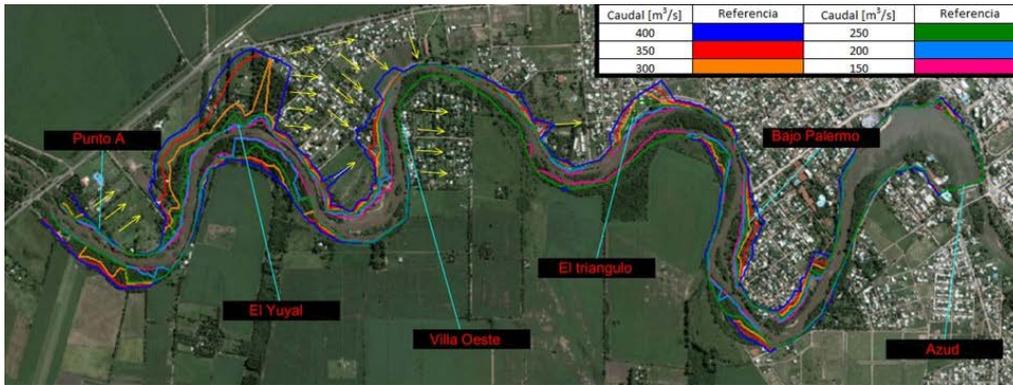


Figura 14.- Mapa de inundación de la Ciudad de Villa María para diferentes caudales utilizando el modelo HEC-Ras sin haber realizado ningún tipo de obra en el cauce del río.



Figura 15.- Foto del predio "El Yuyal" de Villa María tomada desde la ruta 158 el día 27 de febrero de 2014.



Figura 16.- Construcción de terraplenes en las cercanías del predio "El Yuyal" en el barrio Vista Verde de Villa María en el mes de Julio de 2015.

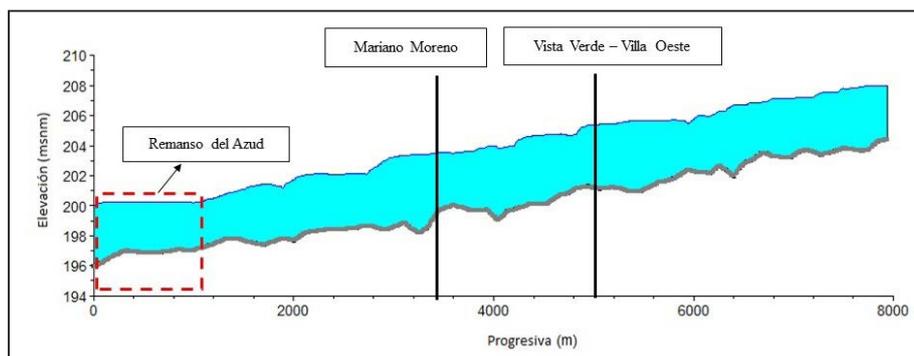


Figura 17.- Perfil longitudinal de superficie libre generado por un caudal de 400 m³/s y una cota de azud de 200 msnm con la topografía existente en diciembre del año 2014. Se observa que el remanso generado por el azud no afecta a los barrios Mariano Moreno, Vista Verde y Villa Oeste

La utilización del modelo sirvió de apoyo para determinar las cotas y sectores donde deben efectuarse terraplenes para contener el río (medida estructural) (Figura 16) y para definir los caudales máximos a erogar para evitar problemas de inundación (medida no estructural). Además, a través de la modelación se determinó que el remanso

generado por embalse de Villa María no afectó a los niveles de superficie libre de los barrios Mariano Moreno y Vista Verde, motivo que preocupaba a los vecinos y autoridades (ver Figura 17).

En la Figura 18 se muestra el mapa de inundación generado para la localidad de Bell Ville (Córdoba) sin realizar ninguna obra. Dicha localidad se encuentra a

100 km aguas abajo de Villa María. En esta sección el caudal máximo modelado fue de 300 m³/s. El día 5 de marzo de 2014 se realizó una campaña de medición donde se aforó un caudal de 257 m³/s en el puente Sarmiento de dicha localidad. Para dicho caudal se puede observar, en la Figura 19, la

inundación producida por el desborde del río en la primera curva aguas arriba del puente Sturla (126,85 msnm cota de agua modelada 126,01 msnm cota de calzada). Se puede notar en la imagen que el agua no inunda la margen derecha debido a las defensas realizadas poco antes de que arribara la crecida.

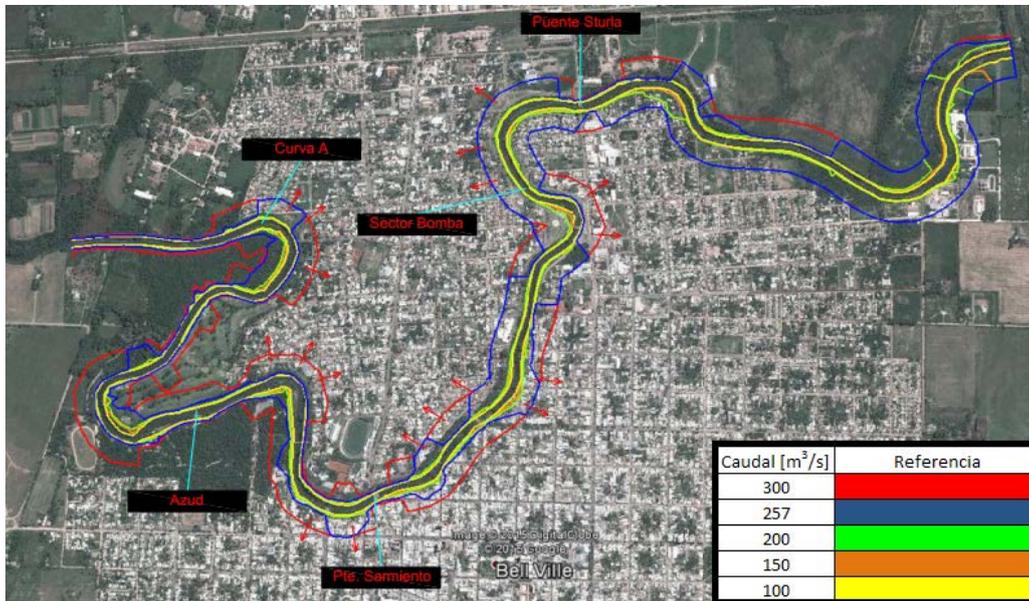


Figura 18.- Superficies de inundación determinadas con HEC-RAS
(a) Villa María – Córdoba (B) Bell Ville – Córdoba



Figura 19.- Curva ubicada aguas arriba del puente Sturla en el mes de marzo de 2014.

Finalmente, al igual que la modelación hidráulica de Villa María, los resultados obtenidos de la modelación sirvieron de apoyo a las autoridades para definir las cotas de los terraplenes a efectuar (medida estructural) y la definición de los caudales máximos que pueden escurrir sin generar problemas (medida no estructural).

6. CONCLUSIONES

Del trabajo experimental realizado, se extraen las siguientes conclusiones: (a) A través de la cuantificación y caracterización experimental y numérica de los eventos de crecida del año 2014 y 2015 se desarrollaron herramientas que sirven

de apoyo para la toma de decisiones por parte de las autoridades de gestión. (b) El gobierno provincial realizó obras para ampliar la capacidad de evacuación del embalse de Río Tercero (Fitz Simon), alcanzándose una evacuación máxima de 96,20 m³/s (aplicación de más del 100% de la capacidad de evacuación), lo que permite tener una buena capacidad de erogación controlada para regular el embalse y laminar las crecidas. (c) Se relevaron durante los eventos de crecidas en el sistema fluvial velocidades de flujo superiores a 3 m/s lo cual es riesgoso y difícil de realizar con técnicas convencionales. Además se observa en algunas secciones que el área efectiva de flujo es significativamente menor que el área inundada, y es por ello que las autoridades están trabajando en eliminar aquellas obstrucciones que impiden el rápido escurrimiento del agua. (d) Las condiciones de flujo durante los eventos de crecida llegaron al extremo superior de aplicación del ADCP RiverSurveyor S5 utilizado. (e) Las mediciones efectuadas permitieron determinar la capacidad máxima del cauce en las diferentes secciones y de este modo, junto a los resultados de la modelación hidráulica, definir un caudal de evacuación máximo para evitar inundaciones. (f) Las curvas Altura-Caudal generadas en este trabajo permitieron obtener una estimación rápida del caudal en las diferentes secciones del río. Esta herramienta fue muy utilizada durante la emergencia para determinar

la altura que alcanzaría el río con los caudales erogados, y generar las defensas y evacuaciones de las viviendas correspondientes. Actualmente debido a procesos erosivos y de sedimentación en el río (principalmente en las secciones de Villa Ascasubi y Villa María) que producen modificaciones en algunas secciones del cauce donde se encuentran ajustadas las curvas, se está estudiando el transporte de sedimentos en dichos sitios y se está analizando, en algunos casos, la posibilidad de generar una nuevas curvas altura-caudal en otras secciones más estables. (g) De la comparación de los hidrogramas de las diferentes secciones durante los años 2014 y 2015, puede observarse que en el año 2015 se ha realizado un manejo de embalse por un mes que permitió que los caudales erogados fueran menores y por lo tanto los daños aguas abajo menores. (h) Mediante la modelación hidráulica unidimensional se logró establecer el mapa de inundación para las localidades de Villa María y Bell Ville. Dichos resultados ayudaron a determinar los sectores críticos que requieren medidas estructurales para mitigar el efecto de las inundaciones. (i) Los resultados del modelo hidráulico para la ciudad de Villa María mostraron que el remanso generado por la estructura de control de dicha localidad no afecta los niveles de superficie libre de los barrios Mariano Moreno y Vista Verde.

BIBLIOGRAFÍA

Brandolin, P.G., Ávalos, M.A. De Angelo, C. 2013. "The impact of flood control on the loss of wet lands in Argentina" *Aquatic Conserv: Mar. Freshw. Ecosyst.* 23: 291– 300.

Herrero, H.; Szupiany, R.; García, C.M.; Blettler, M.; Espinola, L.; y Amsler M. 2013. "Evaluación Experimental de la Hidrodinámica y Procesos

de Mezcla en la Confluencia de los ríos Tercero y Saladillo". VI Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos. Santa Fe, Argentina.

Kennedy, E. J. 1984. "Discharge ratings at gaging stations". U.S. Geological Survey - US Government Printing Office.

Lenarduzzi, M. G. 2012. "Caracterización hidrodinámica experimental de un tramo del Río Tercero (Ctalamochita) con fines hidroambientales". Práctica Supervisada de la carrera Ingeniería Civil de la FCEfN UNC. Córdoba, Argentina.

Mueller, D.S., Wagner, C. R., Rehmel, M.S., Oberg, K.A, and Rainville, Francois, 2013, "Measuring discharge with acoustic Doppler current profilers from a moving boat" (ver. 2.0, December 2013): U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 3, chap. A22, 95 p., <http://dx.doi.org/10.3133/tm3A22>.

Oberg, K. and Mueller, D. S. 2007. "Validation of streamflow measurements made with acoustic Doppler current profilers". *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, vol. 133, no 12, p. 1421-1432.

Riccardi, Gerardo.; Basile, Pedro; Zimmermann, Erik; Stenta, Hernán; Bussi, Pablo; Mangiameli, Pablo y Pesci, María. 2013. "Diseño de presas de navegación en el estudio de prefactibilidad para el aprovechamiento del Río Carcarañá como vía fluvial navegable". VI Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos. Santa Fe, Argentina.

Saldaño, V. 2010. "Modelación Hidrológica y de Calidad de Agua del Río Tercero (Ctalamochita)". Trabajo final de la carrera Ingeniería Civil de la FCEfN UNC. Córdoba, Argentina.

Sontek. 2013. "RiverSuveyor S5/M9 System Manual" – Manual del usuario provisto por SonTek para la operacion de ADCP S5/M9.