

REPRESENTACIÓN 2DH DE UN PICO DE CRECIDA EN EL RÍO SALADO (SANTA FE)

Martín A. Pez, Sebastián N. Villalba, Ana M. T. Alvarez, Lucas E. Palman y Alfredo E. Trento

*Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral, Ciudad Universitaria,
Paraje El Pozo, CC 217, RN 168, Km 474.2, Santa Fe (3000), Argentina, mpez2310@gmail.com,
<http://www.fich.unl.edu.ar>*

Palabras Clave: hidrodinámica, 2DH, elementos finitos, crecida, río Salado.

Resumen. Las condiciones hidrodinámicas que caracterizan los posibles escenarios de un cauce aluvial son determinantes en los procesos de transporte de los constituyentes que suelen incorporarse al curso de agua, por ejemplo a través de descargas industriales, pluviales y domiciliarias. El transporte, en tal caso, no es un fenómeno unidireccional; y analizarlo como tal ofrece poca información desde el punto de vista ingenieril si se considera una escala espacial reducida y en las cercanías de la fuente, en donde el constituyente se esparce en todas las direcciones. Lo expuesto justifica el interés en la aplicación de modelos bidimensionales integrados en la vertical (2DH) para el cálculo de las condiciones hidrodinámicas de un cauce aluvial. El escenario ambiental de este trabajo es un tramo de aproximadamente 8.3 km de longitud del río Salado (Santa Fe, Argentina), el cual es receptor de distintas descargas industriales, pluviales y domiciliarias. El objetivo del trabajo consistió en representar la hidrodinámica 2DH del tramo de río en cuestión implementando un sistema computacional bidimensional, SisBaHiA (Sistema Base de Hidrodinámica Ambiental), para un escenario de crecida ordinaria de corta duración en el que, durante un trabajo de campo desarrollado en coincidencia con el pico de la crecida, se midió con perfilador acústico de corriente Doppler (ADCP) un caudal máximo de $200 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. El dominio de cálculo fue discretizado en elementos finitos mediante la construcción de una malla compuesta por elementos cuadrangulares isoparamétricos. Se lograron representar de manera satisfactoria perfiles transversales y verticales de velocidad medidos desde embarcación anclada.

1 INTRODUCCIÓN

En cauces aluviales la correcta determinación del campo de velocidades es necesaria para conocer el destino y transporte de sedimentos y las condiciones de estabilidad del cauce y las márgenes. Ante los eventos de crecidas, con la consecuente ocurrencia de altas velocidades del agua, es común la presencia de escenarios erosivos en cauce, márgenes y obras civiles, como por ejemplo en puentes, alcantarillas, aliviaderos, etc.

Este trabajo está dirigido a la determinación del campo de velocidades y tensiones de corte en un tramo del curso inferior del río Salado (Santa Fe) en las inmediaciones del puente de la Ruta Provincial N° 6 (RP6). Este río nace en el norte argentino, recorre unos 1500 km aproximadamente hasta desembocar entre las ciudades de Santa Fe y Santo Tomé en el sistema Paraná. Dentro del territorio de la provincia de Santa Fe adquiere las características de un río de llanura, escurriendo la mayor parte del tiempo con caudales relativamente bajos. Recibe el aporte de un área de 29700 Km² aproximadamente (SSRH, 2009), y su tributario más importante es el arroyo Calchaquí. El caudal medio anual del Salado en la sección de medición de ruta provincial N° 70 (RP70) es de 137 m³s⁻¹ para la serie 1953-1954/2002-2008, con un amplio rango de variación: entre 3954 m³s⁻¹ y 78 m³s⁻¹, en cuanto a caudales máximos medios diarios respectivamente (SSRH, 2009).

El cauce del Salado se caracteriza por su tortuosidad y la presencia de albardones bien definidos. Las márgenes presentan cárcavas, zanjones y canales que actúan como nexos entre el río y los numerosos bañados y meandros abandonados. Las planicies del tramo poseen abundante vegetación de diferentes alturas y densidad superficial que, para situaciones de desborde, se convierten en elementos importantes para evaluar la distribución de caudales y el transporte de escalares en general.

En cuanto al transporte de sedimentos en el tramo en estudio, se ha determinado en distintos trabajos la presencia predominante de sedimentos finos suspendidos (Trento y Alvarez, 2011), en tanto que la presencia y evolución de dunas y el transporte de fondo fue abordado por Szupiany et al. (2005). El tramo recibe descargas industriales, pluviales y domiciliarias, habiéndose detectado en particular la presencia de cromo particulado y disuelto (Gallo et al., 2006; Gagneten et al., 2007; Trento y Alvarez, 2011). La relevancia ambiental de la problemática originada en la presencia combinada de cromo y sedimentos finos, motivó diversos estudios de campo (Zenclussen et al., 2015), de laboratorio (Filippa et al., 2013; Filippa et al., 2011) e incluso la implementación de modelos numéricos hidrodinámicos y de transporte (Trento et al., 2010). Casi todos esos estudios fueron efectuados para escenarios de aguas bajas, debido a que esos casos representaban mayor interés desde el punto de vista ambiental. En forma complementaria, resultaba más sencillo tomar muestras de agua, de sedimentos (suspendidos y de fondo), medir velocidades del agua y otros indicadores ambientales. Los resultados alcanzados en esos trabajos fueron de mucho interés, permitiendo también un ámbito propicio para la realización de tesis de maestría (Alvarez, 2012) y doctorado (Filippa, 2014). No obstante, muy poca información se dispone de las variables hidroambientales para escenarios de crecida, específicamente en cuanto al transporte de sedimentos suspendidos y de su granulometría. En estos casos, el río presenta velocidades del orden de 1 ms⁻¹ y superiores, y condiciones erosivas generalizadas, producto del desarrollo de un campo de tensiones de corte de fondo, τ_o , que superan las condiciones de equilibrio sedimentológico.

Se estudió un tramo de aproximadamente 8.3 km de longitud, delimitado por una sección ubicada 2.1 km aguas arriba del puente de RP6 y aguas abajo por otra que se encuentra a 6.2 km del mismo puente. Dicho tramo define un dominio de cálculo, llamado de aquí en adelante “dominio anidado”, que se encuentra comprendido en otro “extendido”, de 57 km de largo, delimitado aguas arriba por la misma sección hidráulica que el dominio anidado y aguas abajo por la sección que define la intersección con la RP70 (Fig. 1).

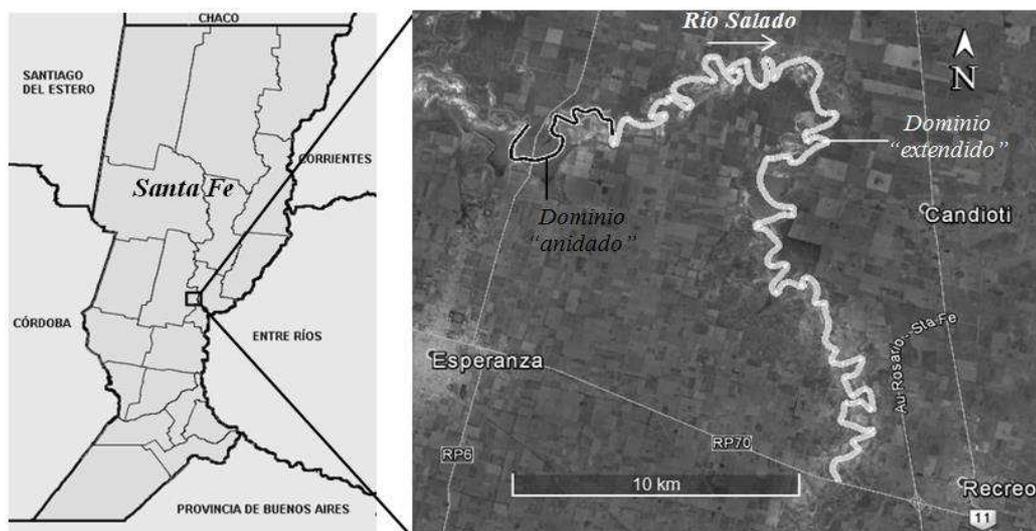


Figura 1: Tramo de estudio del río Salado (Santa Fe). Ubicación de los dominios de cálculo “anidado” y “extendido”.

El objetivo del trabajo consistió en representar la hidrodinámica bidimensional integrada en la vertical (2DH) y el campo de tensiones de corte del tramo de río en cuestión implementando el sistema computacional bidimensional SisBaHiA, acrónimo de Sistema Base de Hidrodinámica Ambiental (Rosman, 2015), para un escenario de crecida ordinaria de corta duración ocurrida el 1 de abril del año 2014.

2 METODOLOGÍA

2.1 Mediciones en campo

La información obtenida fue el resultado de una salida a campo llevada a cabo en el escenario de aguas altas del 1 de abril del año 2014, en coincidencia con el pasaje del pico de una crecida ordinaria de corta duración.

Para el registro de velocidades, profundidades del flujo y caudales, se contó con un equipo ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*), modelo Workhorse Río Grande de 1200 kHz (Teledyne RDI), que permite la medición puntual de velocidades de la corriente comprendidas en un rango de $\pm 20 \text{ ms}^{-1}$ y profundidades en un rango de 0.5 a 30 m. Este equipo fue montado sobre una embarcación de trabajo (Fig. 2), acoplado a una ecosonda y a un sistema de posicionamiento global (GPS) el cual, trabajando a tiempo real, permite obtener coordenadas horizontales con una precisión de $\pm 0.02 \text{ m}$ con una frecuencia aproximada de 1 Hz.



Figura 2: Equipo ADCP montado en la embarcación de trabajo.

Se obtuvo la batimetría completa del tramo en estudio e información detallada de velocidades puntuales y profundidades para distintas secciones transversales distribuidas a lo largo del mismo (Fig. 3). En estas secciones se realizaron 21 aforos a partir de los cuales se obtuvo un caudal medio para cada sección y en diferentes horarios. Se ejecutaron además mediciones de velocidades instantáneas en una vertical con la embarcación anclada. Dichos registros constaron de mediciones temporales de velocidades puntuales instantáneas a diferentes profundidades. El tiempo de medición en cada vertical fue de 15 min, con intervalos de registro de 0.4 s y puntos de medición cada 25 cm de profundidad. Luego, se obtuvo el perfil vertical de velocidades con los promedios de los registros temporales de velocidad instantánea en las distintas profundidades. Adicionalmente se recolectaron muestras de aguas para la posterior determinación en laboratorio de sólidos suspendidos totales (SST).

2.2 Análisis y procesamiento de datos

En primera instancia se procedió al análisis de la información batimétrica. Para ello se calcularon las cotas IGN del lecho a partir de las profundidades medidas, teniendo en cuenta la cota IGN de la superficie libre del agua medida en RP6 y la pendiente media estimada del pelo de agua.

La hidrodinámica del tramo en estudio fue analizada a partir de los datos de aforos y de las mediciones de velocidades obtenidos con el ADCP.

Teniendo en cuenta la no estacionariedad del flujo en el escenario de crecida del 1 de abril del año 2014, se analizó la variabilidad temporal de los caudales aforados y se construyó el hidrograma a ser utilizado como condición de borde aguas arriba en la modelación. A partir de los valores puntuales de velocidades registrados a lo largo de las secciones aforadas, se determinaron las velocidades medias en la sección y se elaboraron perfiles transversales de velocidades medias en la vertical para luego ser contrastados con los calculados en la modelación 2DH.

En base a los registros temporales de velocidades instantáneas obtenidos con el ADCP, se analizó el perfil vertical de velocidades mediante la expresión logarítmica (Ec. 1), válida para fondo hidráulicamente rugoso (Chow, 1959).

$$\frac{u_z}{u_*} = 5.75 \log\left(\frac{z}{k_s}\right) + 8.5 \quad (1)$$

donde, u_z es la velocidad de la corriente a una distancia z del fondo del cauce; u_* es la velocidad de corte ($u_* = \sqrt{\tau_0/\rho}$); k_s es la altura de rugosidad del fondo; τ_0 es la tensión de corte en el fondo y ρ es la densidad del agua. El valor de u_* utilizado en el cálculo del perfil teórico, se determinó a partir de la fórmula de la ley del déficit de velocidades. Luego, el ajuste final del perfil teórico al observado se logró tomando como parámetro de ajuste el valor de k_s , obteniéndose de esta manera un valor característico de la altura de rugosidad de fondo.

2.3 Cálculo hidrodinámico

Las condiciones hidrodinámicas se calcularon en dos etapas. En la primera se implementó el sistema HEC-RAS 4.1 (Brunner, 2010) para el cálculo unidireccional de la hidrodinámica del dominio extendido para condiciones no estacionarias del escurrimiento. Como condición de borde aguas arriba se impuso el hidrograma determinado en base a las mediciones de caudal. Por otro lado, en la sección del extremo de aguas abajo (RP70) se impuso una curva de descarga calculada. Se destaca que en esta sección se dispone de lecturas hidrométricas diarias. Se consideraron las batimetrías correspondientes a 42 secciones transversales y el coeficiente de rugosidad n de Manning se parametrizó en base a estudios antecedentes (Bodoira et al., 2009; Trento y Alvarez, 2011). El modelo fue calibrado en base a las mediciones de caudales y velocidades realizadas en distintas secciones transversales.

En la segunda etapa se procedió a la representación bidimensional del escurrimiento en el dominio anidado, mediante el modulo bidimensional integrado en la vertical (2DH) de SisBaHiA. El modelo matemático en el que se basa, considera la ecuación de conservación de masa integrada a lo largo de la vertical (Ec. 2) y las dos ecuaciones de conservación de cantidad de movimiento con la aproximación de aguas someras para escurrimientos homogéneos integrados en la vertical, ecuaciones (Ec. 3) y (Ec. 4) respectivamente.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial U(H + \zeta)}{\partial x} + \frac{\partial V(H + \zeta)}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - 2U\phi \operatorname{sen}\theta = \\ & = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0(H + \zeta)} \left(\frac{\partial((H + \zeta)\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial((H + \zeta)\tau_{xy})}{\partial y} + (\tau_x^S - \tau_x^B) \right) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} - 2V\phi \operatorname{sen}\theta = \\ & = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{1}{\rho_0(H + \zeta)} \left(\frac{\partial((H + \zeta)\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial((H + \zeta)\tau_{yy})}{\partial y} + (\tau_y^S - \tau_y^B) \right) \end{aligned} \quad (4)$$

Donde t es el tiempo, x e y son las direcciones principales en el sentido longitudinal y transversal, respectivamente; U y V son las componentes de las velocidades promediadas en la vertical en las direcciones x e y , respectivamente; $\zeta(x, y, t)$ es la elevación por encima de un nivel de referencia, $H(x, y)$ representa la batimetría, relativa a la cota de un plano horizontal

de referencia; g es la aceleración de la gravedad; ρ_0 es la densidad del agua (valor fijado en 1000 kg m^{-3}); τ_{xx} , τ_{xy} son las tensiones turbulentas promediadas en la vertical; τ_x^B , τ_y^B son las tensiones resistivas en el lecho; τ_x^S , τ_y^S las tensiones resistivas en la superficie del agua, todas ellas en las direcciones indicadas por los subíndices; ϕ es la velocidad angular de rotación de la Tierra en el Sistema de coordenadas local; θ es el ángulo que indica la latitud en radianes. El tratamiento de la turbulencia está basado en la técnica de filtrado (Rosman, 1987) y es auto-ajutable en la escala de sub-grilla. El coeficiente de resistencia es dependiente de k_s , adoptada constante para este caso.

La discretización espacial en el plano horizontal x - y del dominio anidado se realiza mediante elementos finitos Lagrangianos isoparamétricos. Las variables del escurrimiento y los parámetros del dominio quedan definidos por polinomios Lagrangianos cuadráticos en una malla de elementos cuadrangulares. En cuanto a la discretización temporal, cabe destacar la aplicación de esquemas de diferencias finitas de segundo orden, utilizándose el esquema de Crank-Nicolson para los términos lineales y una factorización implícita de segundo orden en los no lineales (Rosman, 2015).

Tal como se muestra en la Fig. 3 y Fig. 4, el dominio anidado se representó con una malla de 1620 elementos cuadrangulares isoparamétricos, de 9 nodos por elemento, con un total de 6859 nodos. Los contornos del dominio de cálculo se determinaron en base a una fotografía satelital obtenida de Google Earth, correspondiente al 12 de abril del año 2013, fecha para la cual las condiciones hidrométricas fueron similares a las presentadas durante la crecida del 1 de abril del año 2014. El ancho del cauce, de 76 m en promedio, quedó representado en toda su longitud por 9 elementos de 8.4 m de ancho medio, contando de esta manera con 19 nodos de cálculo en la dirección transversal a la corriente, en tanto que la longitud del tramo quedó determinada por 180 elementos de 46 m de longitud promedio. Cabe mencionar que no se tuvo en cuenta el efecto de las pilas del puente de RP6 en la modelación hidrodinámica. El plano de referencia para la batimetría se ubicó en la cota cero IGN.

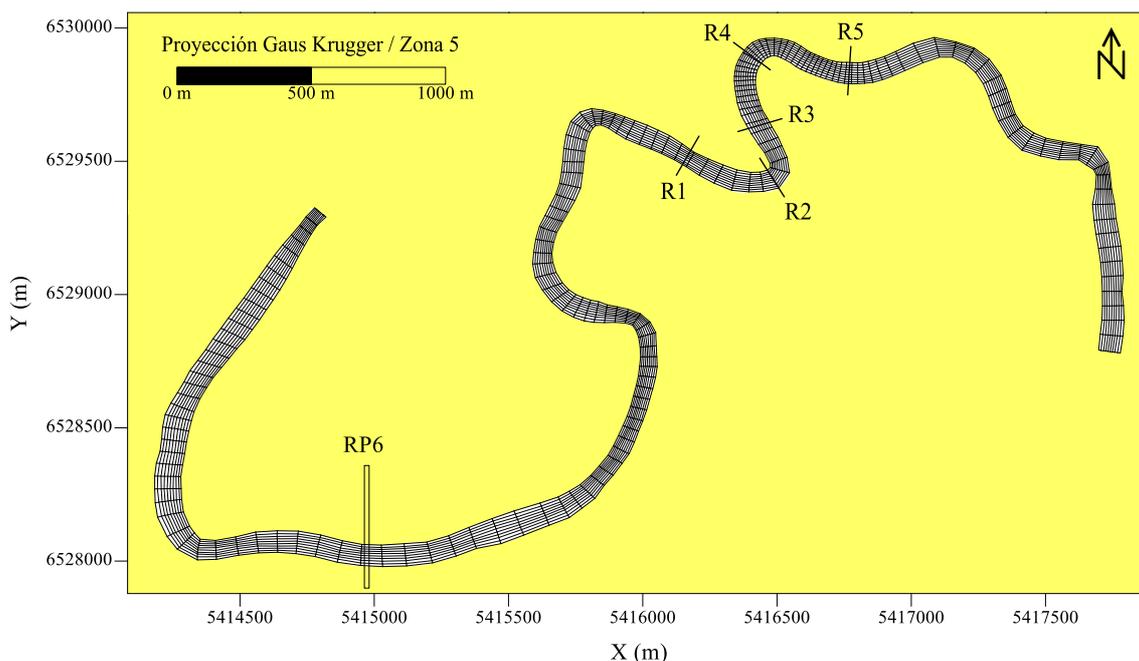


Figura 3: Malla del dominio “anidado” para el modelo hidrodinámico SisBaHiA. Se indica la traza de la sección transversal definida por RP6 y las secciones R1 a R5.

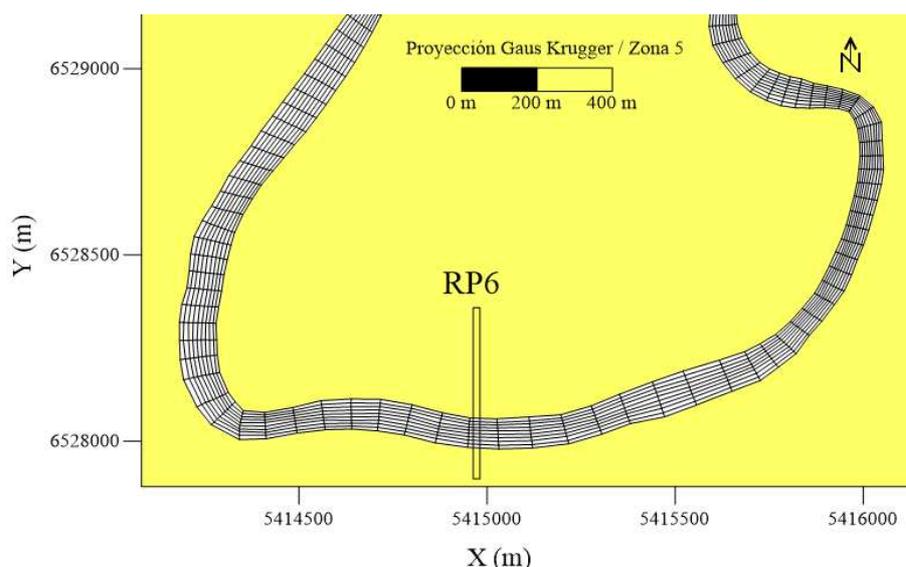


Figura 4: Sector de la malla del dominio “anidado” en las inmediaciones de la sección transversal de RP6.

Para el cálculo de la hidrodinámica 2DH, fue necesaria la identificación de condiciones iniciales y de borde. Como condición de borde en la sección de aguas arriba del dominio anidado, se estableció el mismo hidrograma que para el modelo 1D. En la sección de aguas abajo fue establecida una serie temporal de niveles de agua resultante de la implementación del sistema computacional unidimensional en el dominio extendido. La definición de las condiciones iniciales implica la asignación, a todos los nodos del dominio, de valores de elevación de la superficie libre y las dos componentes horizontales de velocidad para el instante inicial de la simulación. Al igual que las condiciones de borde aguas abajo, las condiciones iniciales se fijaron en base a los resultados de la simulación 1D.

La simulación, para condición no estacionaria del escurrimiento, se efectuó para un tiempo total de 7.5 horas, con un intervalo temporal (Δt) de 2 s. La calibración del modelo se realizó a partir de las mediciones de velocidades y aforos efectuados en el trabajo de campo.

Con el fin de evaluar la existencia de condiciones erosivas, se calcularon con SisBaHia las tensiones de corte en el lecho y se las comparó con la tensión de corte crítica τ_c , adoptándose para esta última un valor de 0.26 Nm^{-2} (Trento y Álvarez, 2011).

Se calculó el perfil vertical de velocidades en el nodo de cálculo correspondiente a la vertical en que se realizaron mediciones de velocidad. Para ello se utilizó el módulo numérico 2DH acoplado al 3D analítico-numérico (Rosman, 2015).

3 RESULTADOS

El trabajo de campo del 1 de abril del 2014 coincidió con el pasaje del pico de una crecida ordinaria de corta duración (7 h aproximadamente), con un caudal máximo aforado de $200 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, que se corresponde a una frecuencia del 17% según la curva de distribución de caudales para 50 años de registros en RP70 (SSRH, 2009). Con el equipo ADCP y la ecosonda se registraron velocidades de hasta 1.15 ms^{-1} con una profundidad máxima promedio de 4 m.

Mediante el análisis del perfil vertical de velocidades se obtuvo una altura de rugosidad (k_s) de 0.16 m, muy similar a las determinadas para nueve verticales del tramo en estudio, para un estado hidrométrico semejante. En el modelo 2DH se adoptó $k_s = 0.10 \text{ m}$ para todo el tramo, valor resultante de la calibración y acorde con las determinaciones. En la Fig. 5 se presentan

los perfiles verticales de velocidades medidas, calculadas con la ecuación logarítmica y obtenido con el módulo 3D analítico-numérico de SisBaHiA.

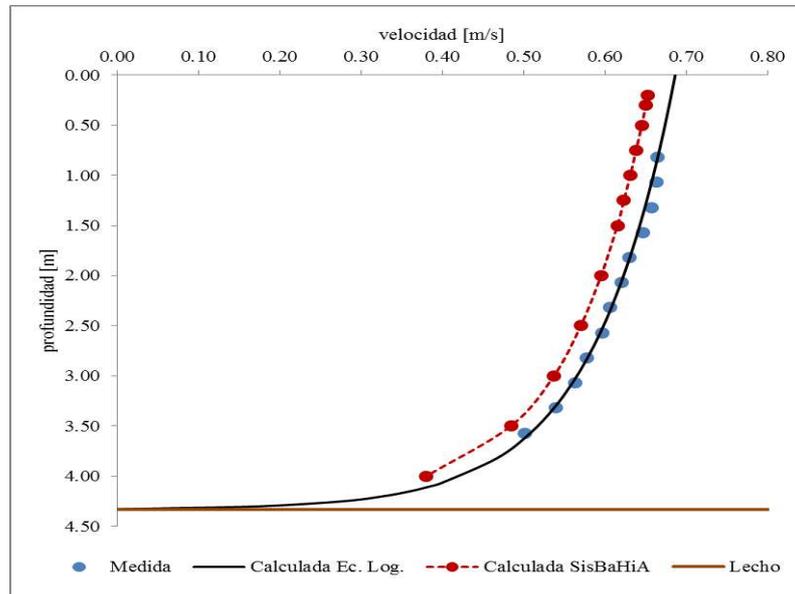


Figura 5: Perfil vertical de velocidades medido, calculado con la ecuación logarítmica y obtenido con SisBaHiA.

El análisis de sensibilidad del parámetro k_s evidenció que una disminución del 25% produjo velocidades medias en la sección mayores en hasta un 3%.

Los datos de velocidades del ADCP en las distintas secciones del tramo, permitieron calcular los perfiles transversales de velocidades medias en la vertical (v) para dichas secciones y para los distintos horarios de registro. En la Fig. 6, Fig. 7 y Fig. 8 se contrastan dichos perfiles con los calculados por SisBaHiA en las secciones R3, R4 y R5 respectivamente, para los correspondientes tiempos (t).

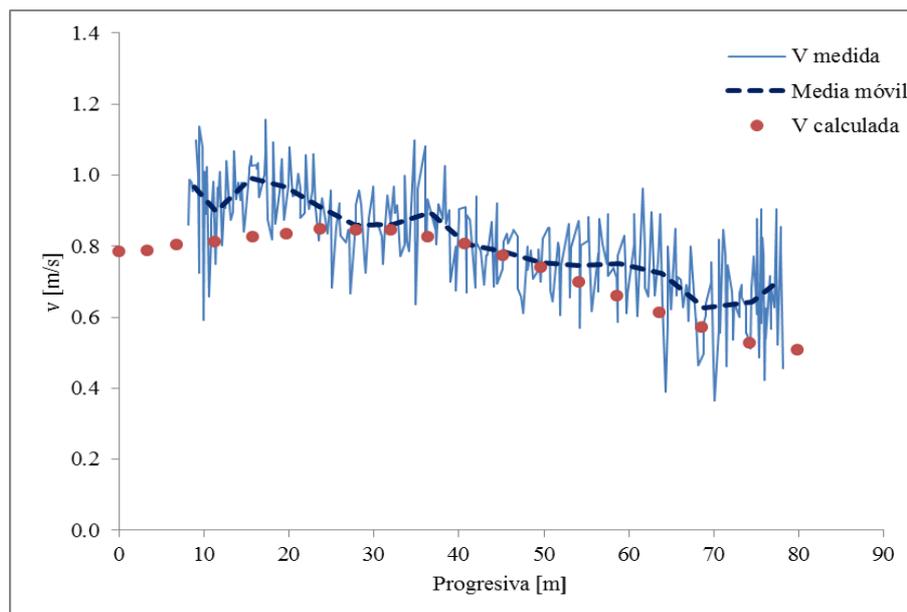


Figura 6: Perfiles transversales de velocidades medias en la vertical medidos y calculados con SisBaHiA en la sección R3 para $t = 2880$ s. (Origen de progresivas en margen derecha)

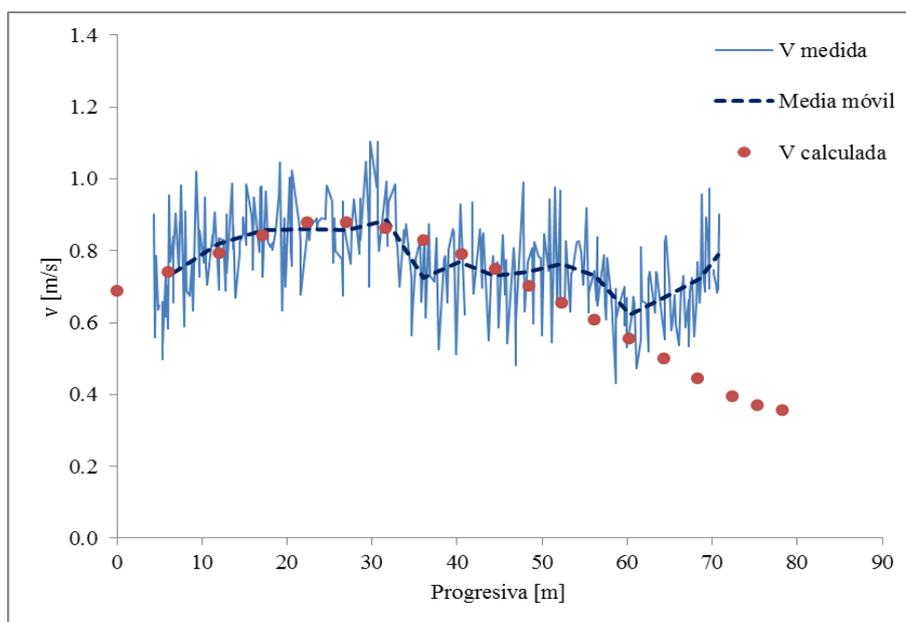


Figura 7: Perfiles transversales de velocidades medias en la vertical medidos y calculados con SisBaHiA en la sección R4 para $t = 3600$ s. (Origen de progresivas en margen derecha)

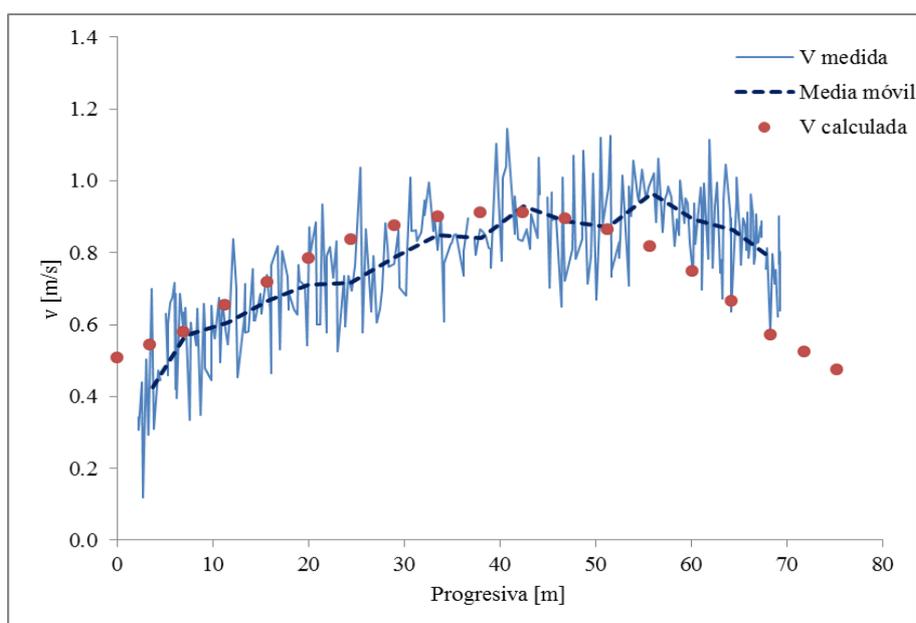


Figura 8: Perfiles transversales de velocidades medias en la vertical medidos y calculados con SisBaHiA en la sección R5 para $t = 8280$ s. (Origen de progresivas en margen derecha)

En la [Tabla 1](#) se presentan los caudales (Q) y velocidades medias en la sección (\bar{V}) calculados con SisBaHiA para distintos tiempos de simulación (t). Se incluye también un análisis comparativo con los Q y \bar{V} determinados a partir de registros de campo.

Puede observarse que tanto los valores de caudales como de velocidades medias en la sección simulados presentaron errores ($E\%$) inferiores al 10% respecto a los determinados a partir de las mediciones.

Sección	t [s]	Q medido [m ³ s ⁻¹]	Q calculado [m ³ s ⁻¹]	$E\%$	\bar{V} medida [ms ⁻¹]	\bar{V} calculada [ms ⁻¹]	$E\%$
R1	1800	188.3	186.2	1.1	0.85	0.78	7.9
R2	2520	199.7	204.4	2.4	0.69	0.67	3.5
R3	2880	188.5	199.2	5.7	0.79	0.74	6.0
R4	3600	186.4	192.5	3.3	0.71	0.66	6.4
R5	8280	183.6	189.2	3.0	0.77	0.73	5.8

Tabla 1: Comparación de caudales y velocidades medias (medidos y calculados) en distintos tiempos y para las distintas secciones transversales.

En la Fig. 9 se muestra un sector de la batimetría y el campo de velocidades resultantes de la simulación no estacionaria para un tiempo de simulación de 1800 s, en el que se obtuvieron caudales de 186.2, 198.3 y 193.4 m³s⁻¹ para las secciones R1, R2 y R3 respectivamente.

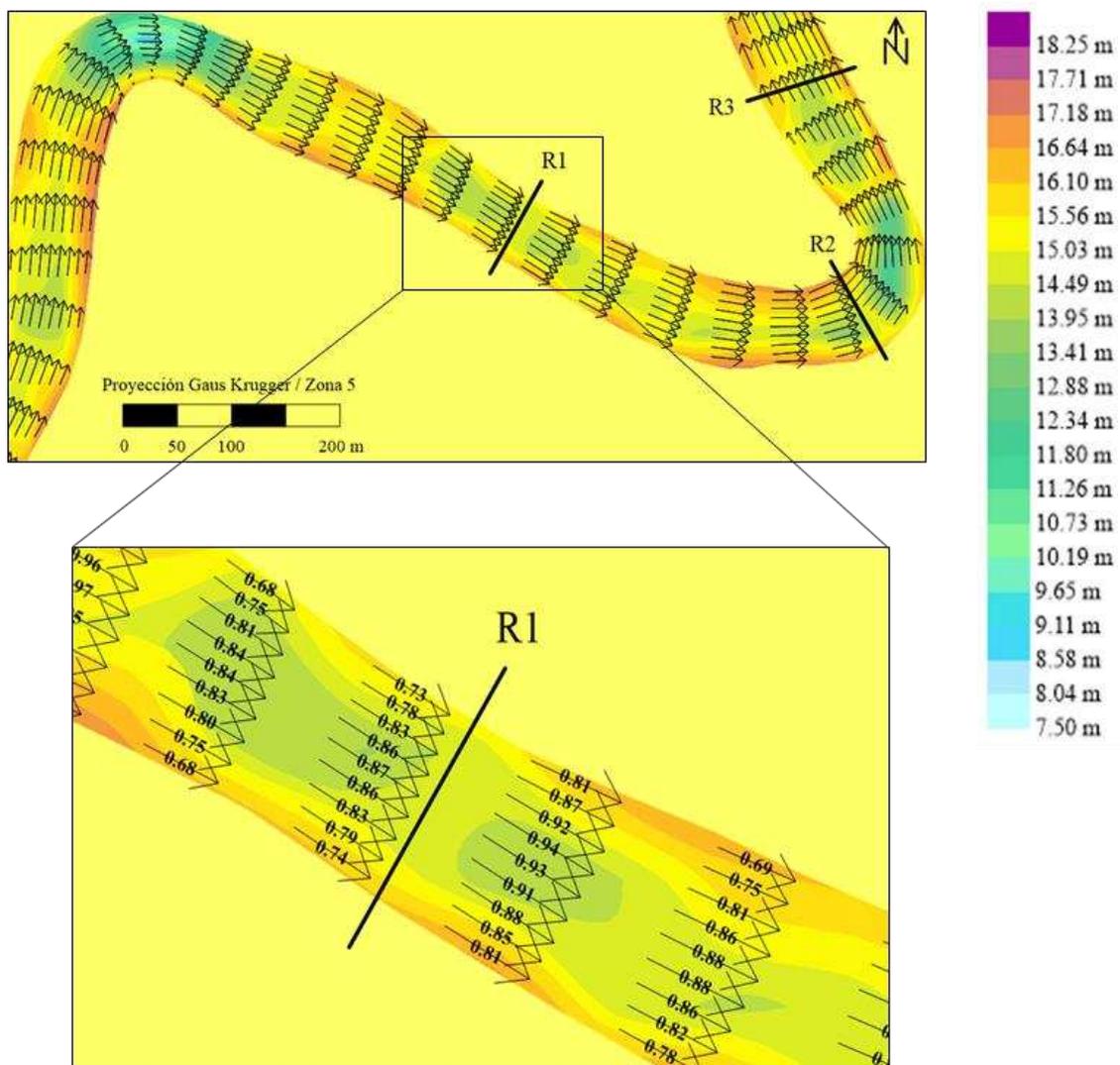


Figura 9: Batimetría (Cota IGN) y campo de velocidades (en ms⁻¹) calculado con SisBaHiA en un sector del tramo en estudio.

El análisis de las tensiones de corte del fondo se realizó para los instantes específicos en que se computó en la sección transversal de RP6 un caudal máximo de $203.8 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ y un caudal mínimo de $182.6 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. En la Fig. 10 y Fig. 11 se muestran los campos de tensiones de corte de fondo, τ_o , obtenidos para las situaciones mencionadas.

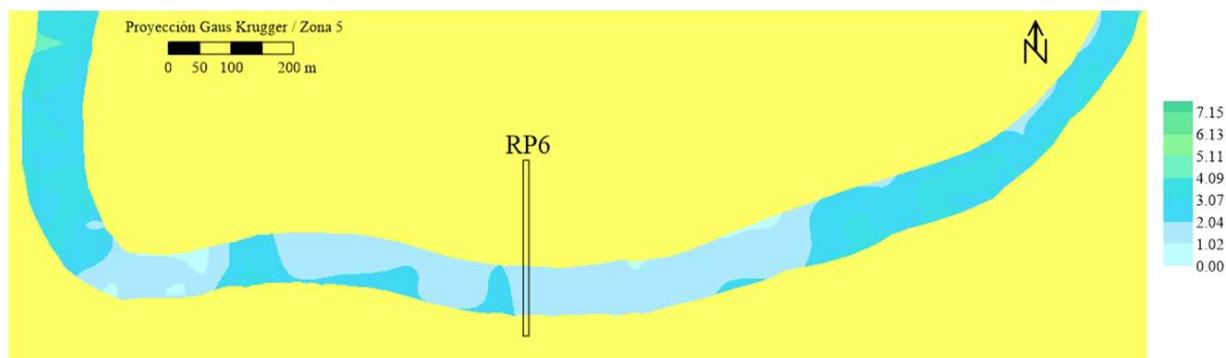


Figura 10: Campo de τ_o [Nm^{-2}] en las inmediaciones de la sección transversal de RP6 para $Q = 203.8 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.

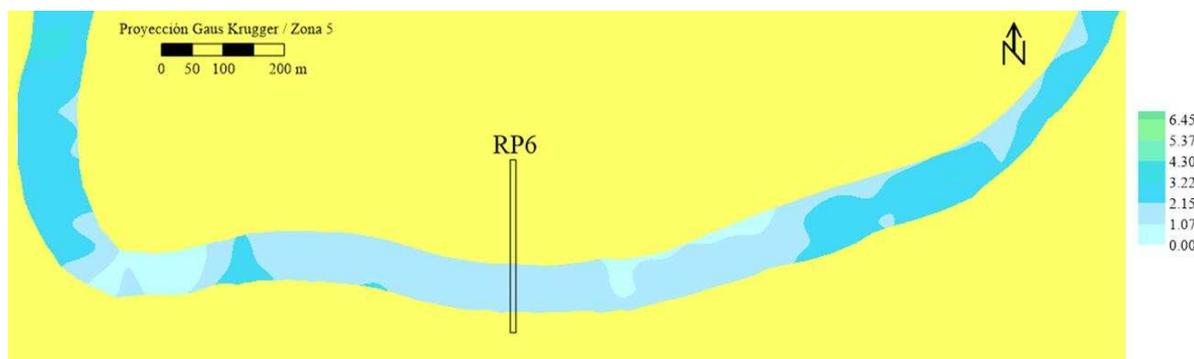


Figura 11: Campo τ_o [Nm^{-2}] en las inmediaciones de la sección transversal de RP6 para $Q = 182.6 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.

Para el tiempo de ocurrencia del caudal máximo en RP6 ($Q=203.8 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$), τ_o varió entre 1.93 y 1.67 Nm^{-2} en la sección del puente y entre 1.63 y 1.40 Nm^{-2} para el caudal mínimo en la misma sección ($Q=182.6 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$).

Para los tiempos analizados, las condiciones resultaron erosivas en casi todo el tramo, a excepción de lugares puntuales con muy bajas velocidades; tal es el caso de los bordes internos de curvas pronunciadas. Cabe aclarar que sólo en 50 de los 6859 nodos de la malla se computó $\tau_o < \tau_c$.

En relación a los SST, las concentraciones de las muestras analizadas fueron, en promedio, de 200 mgL^{-1} , valor que supera los característicos encontrados en el río Salado en trabajos de campo anteriores.

4 CONCLUSIONES

En el desarrollo de las actividades de campo se logró registrar un importante volumen de información de muy buena calidad, considerando aún la dificultad adicional que genera el estado de aguas altas a la hora de realizar este tipo de mediciones. En particular, la información batimétrica resultó muy adecuada, no obstante, una mayor densidad de información estaría justificada debido a la fina discretización del dominio.

Con la implementación conjunta de los modelos 1D y 2D se logró una representación adecuada del paso de la crecida. Específicamente, el modelo 2D permitió reproducir satisfactoriamente la hidrodinámica bidimensional del escenario en estudio, ya que los campos de velocidades obtenidos y los caudales calculados reflejaron una configuración del flujo muy compatible con las mediciones efectuadas. En este sentido se pudo comprobar la importante variación transversal de las velocidades y por lo tanto de las tensiones de corte de fondo, sobre todo en zonas de curvas. Adicionalmente, con el módulo 3D del SisBaHiA se logró calcular el perfil vertical de velocidades con resultados muy satisfactorios y errores atribuibles a posibles diferencias en la batimetría y a la dificultad para identificar un tiempo exacto de medición en la simulación.

A partir del cálculo de las tensiones de corte de fondo y de contar con un valor aproximado de la tensión de corte crítica, representativa de todo el tramo ($\tau_o \gg \tau_c$), se puede inferir que el paso de la crecida generó condiciones erosivas en casi la totalidad del mismo. Dicho resultado es esperable si se tienen en cuenta las condiciones hidrométricas que caracterizaron el escenario representado.

Agradecimientos

Este trabajo fue realizado en el marco de una “Beca Estímulo a las Vocaciones Científicas” del Consejo Interuniversitario Nacional (CIN), en el ámbito del Proyecto CAI+D 2011 PI 50120110100326 subsidiado por la Universidad Nacional del Litoral (UNL) y dirigido por el Dr. Trento.

Se agradece a los Ingenieros F. Latosinsky y L. Domínguez Rubens, quienes realizaron las mediciones con ADCP y GPS. Se agradece al personal del CIM de la FICH por la valiosa información meteorológica.

REFERENCIAS

- Alvarez, A.M., Tesis de Maestría en Ingeniería de los Recursos Hídricos. Tema: *Modelación numérica del transporte de metales pesados y sedimentos finos en cursos fluviales. Caso de estudio: cromo en el río Salado (Santa Fe-Argentina)*. FICH-UNL, Santa Fe, Argentina, <http://bibliotecavirtual.unl.edu.ar:8080/tesis/handle/11185/45/discover>. 2012.
- Bodoira, F., Graciani, S., Trento, A., Elaboración de cartas temáticas de la rugosidad superficial en planicies de inundación. Cuenca inferior del río Salado (Santa Fe, Argentina). *Boletim de Ciências Geodésicas*, 15, 4:485-497, 2009.
- Brunner, G., HEC RAS, *River Analysis System. User's Manual*, v. 4.1, U.S. Army Corps of Engineers, <http://www.hec.usace.army.mil>, 2010.
- Chow, Ven Te, *Hidráulica de canales abiertos*. Santafé de Bogotá: McGraw Hill, 1959.
- Filippa, L., Tesis de Doctorado en Ingeniería, Tema: *Estudio de la dinámica de la floculación y su relación con el transporte de cromo en el río Salado (Santa Fe)*. FICH-UNL, Santa Fe, Argentina, <http://bibliotecavirtual.unl.edu.ar:8080/tesis/handle/11185/23/discover>. 2014
- Filippa, L., Freire, L., Trento, A., Alvarez, A., Gallo, M. and Vinzón, S., Laboratory evaluation of two Liss-25X using river sediments, *Sedimentary Geology*, Elsevier, 238:268-276. DOI:10.1016/j.sedgeo.2011.04.017, 2011.
- Filippa, L., y Trento, A., Ensayos de floculación con sedimentos del río Salado contaminados con cromo mediante un dispositivo Jar Test, *III Simposio sobre Métodos Experimentales en Hidráulica*, Santa Fe, 77-78, 2013.
- Gagneten, M., Gervasio, S. and Paggi, J., Heavy Metal Pollution and Eutrophication in the Lower Salado River Basin (Argentina), *Water, Air and Soil Pollution*, 178:335-349, 2007.

- Gallo, M., Trento, A., Alvarez, A. M. T., Beldomenico, H., Campagnoli D., Dissolved and Particulate Heavy Metals in the Salado, *Water Air And Soil Pollution*, 174:367 – 384, 2006.
- Rosman, P. C. C., *Modeling Shallow Water Bodies via Filtering Techniques*. Ph.D. Thesis, Ralph M. Parsons Laboratory for Water Resources and Hydrodynamics, Civil Engineering Department, Massachusetts Institute of Technology, 1987.
- Rosman, P., *Referência Técnica do SisBaHiA*[®], <http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br>, 2015.
- SSRH, Subsecretaría de Recursos Hídricos, Estadística Hidrológica de la República. Presidencia de la Nación, Rep. Argentina, 2009
- Szupiany, R., Trento, A., Alvarez, A. M., Transporte de sedimentos de fondo en el río Salado (Santa Fe, Argentina), *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 10, 1:79-88, 2005.
- Trento, A. y Alvarez, A., A numerical model for the transport of chromium and fine sediments, *Environmental Modeling and Assessment*, 16, 6:551-564. DOI: 10.1007/s10666-011-9263-5, 2011.
- Trento, A., Alvarez, A., Filippa, L., Gallo, M. y Vinzón, S., Simulación de cromo y sedimentos finos en un escenario fluvial, *XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, IAHR*, Punta del Este, Uruguay, Trabajo completo 519.pdf, Resumen 2C_519, pág. 31, 2010.
- Zenclussen, C., Palman, L.E., Montagnini, M.D., Pez, M., Álvarez A.M., Trento, A., Ensayo de trazadores para determinación del coeficiente de dispersión longitudinal, *IV Simposio sobre Métodos Experimentales en Hidráulica*, La Plata, Argentina, 2015.