

**XXV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
SANTIAGO, CHILE, AGOSTO 2014.**

**USO DE MODELOS HIDRODINÁMICOS EN CAUCES NATURALES.
APLICACIÓN EN LA CONFLUENCIA DEL ARROYO LA CAÑADA Y
EL RÍO SUQUÍA, PROVINCIA DE CÓRDOBA.**

*Santiago Ochoa, Teresa Reyna, Santiago Reyna, Marcelo García, Horacio Herrero,
Antoine Patalano, María Lábaque.*

*Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Argentina.
saog2105@hotmail.com, teresamaria.reyna@gmail.com, santiagoreyna@gmail.com, cgarcia2mjc@gmail.com,
hsherrero@yahoo.com.ar, antoine.patalano@gmail.com, mlabaque@gmail.com*

RESUMEN:

Debido a que los fenómenos en flujos a superficie libre que ocurren en la naturaleza son de una complejidad tal que difícilmente pueden ser resueltos con métodos analíticos exactos; se busca desarrollar modelos y simulaciones con la utilización de técnicas experimentales y numéricas que permitan la obtención de las variables del flujo en ríos. El flujo libre se presenta cuando los líquidos fluyen por la acción de la gravedad y solo están parcialmente confinados por un contorno sólido. En este trabajo se presenta la formulación, métodos de solución y metodologías para la implementación de modelos físicos y numéricos en flujos a superficie libre. El curso fluvial considerado para la aplicación es el de la confluencia del arroyo La Cañada y el río Suquía. La confluencia se encuentra localizada en el centro de la Ciudad de Córdoba que es la segunda concentración demográfica de la República Argentina. Como parte de las investigaciones ejecutadas en este cauce se utilizó el modelo físico de la confluencia construido en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Nacional de Córdoba. Se han desarrollado tres modelos matemáticos con diferente software (HEC-RAS, IBER y DELFT3D), los mismos se calibraron y validaron con los datos medidos en el modelo físico. En el escenario de estudio, se desarrolló un análisis de los efectos de escala producidos por una relación de longitudes modelo a prototipo de 1:40.

ABSTRACT:

Because the phenomena in free surface flows that occur in nature are so complex that hardly can be solved with exact analytical methods; seeks to develop models and simulations using experimental and numerical techniques to obtain the flow variables in rivers. The free flow occurs when the liquid flows by gravity and only partially confined by a solid boundary. In this paper the formulation, solution methods and methodologies for the implementation of physical and numerical models for free surface flows is presented. The river course is considered for the implementation of the confluence of the La Cañada stream and river Suquía. The confluence is located in the center of the city of Córdoba is the second demographic concentration of the Argentina Republic. As part of the research in this river be used the physical model of the confluence built Hydraulics Laboratory of the National University of Córdoba. We have developed three mathematical models with different software (HEC-RAS, IBER and DELFT3D), they were calibrated and validated with data measured in the physical model. In the scenario study, an analysis of the effects produced by a scale ratio of length 1:40 model prototype was developed.

Palabras Clave: Confluencia, Modelos Hidrodinámicos, Arroyo La Cañada.

1. INTRODUCCIÓN:

Las confluencias son elementos de sistemas fluviales que juegan un rol importante en la dinámica de los sistemas fluviales (Herrero, 2014). Las confluencias son ambientes complejos ya que la convergencia de flujos produce complicados patrones de movimiento de los fluidos. En esta publicación se expone el estudio de las variables hidrodinámicas de la confluencia del arroyo La Cañada y el río Suquía; la misma que se produce en el centro de la Ciudad de Córdoba, segunda concentración demográfica de la República Argentina (Córdoba Capital), con una actividad industrial de gran solidez e importancia, un importante centro turístico, gran actividad agrícola y ganadera.

El río Suquía o Primero nace de las confluencias de los ríos San Antonio y Cosquín a los que se les une el de Los Chorrillos y el arroyo de Las Mojarras. Su cuenca activa está limitada al norte por el dorso de La Cumbre; al sur, por la cresta de la Sierrita o Cordón de Santiago, que la separa de la cuenca del río Anizacate; al oeste, por las divisorias de las aguas del río Pintos, de la Pampa de San Luis y de la Sierra Grande. Antes de su paso por la ciudad de Córdoba el Suquía se encuentra regulado con el embalse San Roque. Además sufre varias obstrucciones a lo largo de su recorrido con el azud El Diquecito y diversos puentes fuera y dentro de la metrópolis. Sus afluentes generan con sus crecidas problemas importantes aguas arriba del Dique San Roque y el mismo río los genera aguas abajo en su tramo por la ciudad (Lábaque, 2010).

El arroyo La Cañada nace en la depresión tectónica de La Lagunilla y cruza la parte sur de la ciudad, de S.O. a N.E., para finalmente desaguar en el Suquía. Este arroyo de aspecto inofensivo por su escaso caudal, fue el causante de varias y desastrosas inundaciones a lo largo de la historia de la ciudad de Córdoba; la última ocurrió en la década del treinta, motivando la construcción de diques laterales en su recorrido ciudadano que han permitido controlar eficientemente el comportamiento del arroyo en épocas de crecidas violentas (Barbeito y Quintana, 1998). La longitud aproximada del río Suquía es de unos 200 kilómetros (si se considera como su nacimiento al dique San Roque) y el ancho promedio de su cauce es de 200 metros. El arroyo La Cañada posee aproximadamente 28 kilómetros de longitud (la canalización en el centro de la ciudad que deriva a la desembocadura en el río Suquía es de aproximadamente 3 kilómetros de longitud) y tiene un ancho medio de 20 metros. El caudal medio anual en la confluencia es de $9,7 \text{ m}^3/\text{s}$, con máximo promedio anual de $19,5 \text{ m}^3/\text{s}$ y mínimo promedio anual de $3,76 \text{ m}^3/\text{s}$. En condiciones de estiaje el caudal se reduce considerablemente, aunque aumenta de modo abrupto cuando se producen lluvias (Gizzi, 2012). La confluencia del arroyo La Cañada con el río Suquía se ubica alrededor de las coordenadas $31^\circ 24' 22'' \text{ S}$ y $64^\circ 11' 20'' \text{ O}$, a una altura aproximada de 384 metros sobre el nivel del mar.

Dentro del proyecto de sistematización del cauce en la confluencia, planteado por La Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Córdoba, se tomó la decisión de construir un modelo físico a escala con el objetivo de modelar diferentes condiciones de caudales para distintos periodos de retorno y de esta manera verificar el correcto funcionamiento de las obras propuestas. El modelo físico hidráulico Suquía-Cañada (Figura 1) es de tipo tridimensional con semejanza de Froude ejecutado en escala no distorsionada de longitudes $L=1:40$. Este modelo permite analizar el tramo del río Suquía comprendido entre los puentes Centenario y Avellaneda, de aproximadamente 1000 metros de longitud, con un ancho efectivo variable de 70 a 280 metros en prototipo, incluyendo la desembocadura del arroyo La Cañada y el parque Las Heras localizado aguas abajo del mencionado arroyo.

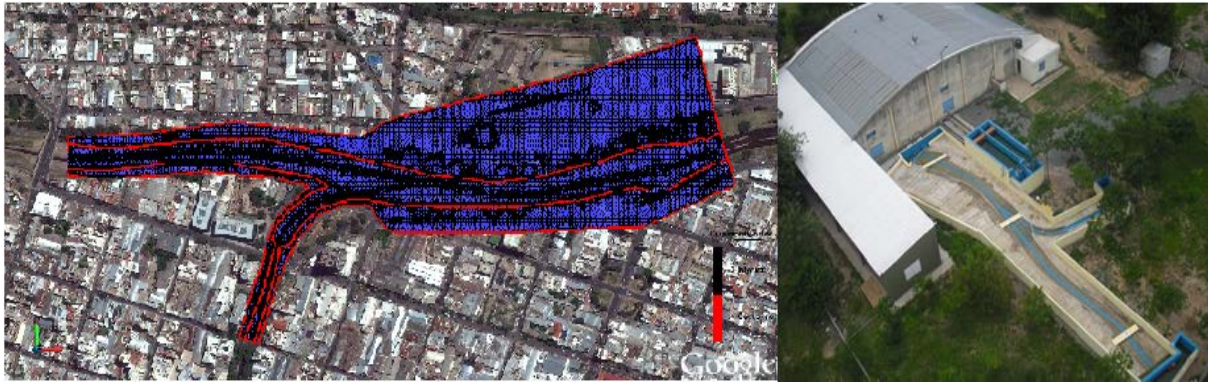


Figura 1. Área de aplicación y fotografía del modelo físico de la confluencia del arroyo La Cañada y el río Suquia (Fuente: Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Nacional de Córdoba).

En el análisis de la hidrodinámica fluvial están presentes una gran cantidad de variables a ser consideradas en el comportamiento del flujo. Las vinculadas a la descripción como los son variables de profundidad, velocidades, tensiones de corte, pendiente de fondo, etc; y las que relacionan al material que compone los bordes del río en el fondo y en las márgenes como la composición granulométrica y vegetación. A continuación se presenta la Ecuación de Continuidad para flujos incompresibles y las Ecuaciones de Conservación de Momento de Navier Stokes con sus términos principales y escritos en notación tensorial:

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad [1]$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \hat{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad [2]$$

Donde u_i y u_j son las componentes de velocidad ($u_1 = u$, $u_2 = v$ y $u_3 = w$) en las direcciones de los ejes cartesianos x_i y x_j ($x_1 = x$, $x_2 = y$, $x_3 = z$); \hat{p} es la presión piezométrica, que incluye, los términos de la fuerza de presión y gravitacionales; t es el tiempo si se considera flujo no estacionario y ν la viscosidad cinemática (García y Niño, 2003).

2. MATERIAL Y MÉTODOS:

Para la resolución aproximada de las ecuaciones de Navier-Stokes se han introducido varias simplificaciones que conducen a modelos que pueden ser aplicados a problemas prácticos en la ingeniería. Una de estas aproximaciones es conocida como las ecuaciones de Saint-Venant o Ecuaciones de Onda en Aguas Superficiales. Los flujos en canales abiertos y ríos son típicos ejemplos que pueden ser tratados con esquemas unidimensionales, en estos casos es usual que el principal interés sea determinar la variación longitudinal de las propiedades del flujo en la dirección de la corriente.

La versión unidimensional de las ecuaciones de Saint-Venant se obtiene integrando las ecuaciones de continuidad y de Navier-Stokes en la sección transversal del flujo, asumiendo presión hidrostática en la dirección normal al fondo del cauce. Sin embargo, la suposición de un flujo unidimensional puede no ser válida en varias aplicaciones de flujo a superficie libre, como por ejemplo en canales no prismáticos, donde se tienen grandes variaciones en el alineamiento y sección transversal del canal; en estos casos es posible simplificar las ecuaciones de Navier-Stokes a un esquema bidimensional cuando en el análisis considerado se obtengan resultados con una razonable precisión.

La versión bidimensional de estas ecuaciones es obtenida promediando con respecto a la profundidad las ecuaciones de continuidad y de Navier-Stokes, tal que las ecuaciones resultantes describan el movimiento del fluido en un plano paralelo al fondo del canal (Chaudhry, 2008).

Para el caso en estudio se consideraron tres software diferentes para la solución del problema planteado (HEC-RAS, IBER y DELFT3D).

2.1. Modelo Unidimensional HEC-RAS

HEC-RAS 4.1.0 (River Analysis System 4.1.0) es un programa cuya principal función es la delineación de planicies de inundación, es decir calcular el nivel del agua en cada sección transversal en el tramo de un río o canal artificial. El flujo puede ser permanente o no permanente. Además de calcular los niveles de agua en cada sección, HEC-RAS tiene la capacidad de calcular otras variables hidráulicas como la socavación en los elementos de apoyo de un puente para el diseño de la cimentación de los mismos, así como el transporte de sedimentos y contaminantes (Us Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center, 2010). HEC-RAS utiliza el método del paso estándar para el cálculo de los niveles de agua en cada sección transversal en el flujo estacionario. Para estos es necesario conocer las secciones transversales, la distancia entre las secciones transversales, el coeficiente de Manning en cada porción de cada sección transversal, el o los caudales de diseño y la condición de borde. Si el flujo es subcrítico, la condición de borde a usar es aguas abajo; si el flujo es supercrítico, la condición de borde a usar es aguas arriba. En un tramo sólo es necesario conocer una condición de borde, a menos que el flujo sea mixto. En este caso, se debe contar con una condición de borde aguas arriba y otra aguas abajo (Chaudhry, 2008). El método del paso estándar se basa en la resolución de la ecuación de energía:

$$z_2 + H_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = z_1 + H_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad [3]$$

Dónde: “ z_1 ” y “ z_2 ” son las elevaciones del fondo del canal en dos secciones 1 y 2; “ H_1 ” y “ H_2 ” las profundidades del flujo; “ α_1 ” y “ α_2 ” el coeficiente de carga de la velocidad; “ V_1 ” y “ V_2 ” es la velocidad media de la sección; “ g ” la aceleración de la gravedad (9.81 m/s^2) y “ h_e ” la pérdida de carga.

2.2. Modelo Bidimensional IBER

IBER es un modelo numérico de simulación de flujo turbulento en lámina libre en régimen no-permanente, y de procesos medioambientales en hidráulica fluvial. El rango de aplicación de IBER abarca la hidrodinámica fluvial, la simulación de rotura de presas, la evaluación de zonas inundables, el cálculo de transporte de sedimentos y el flujo de marea en estuarios. El módulo hidrodinámico resuelve las ecuaciones de aguas someras promediadas en profundidad, también conocidas como 2D Shallow Water Equations (2D-SWE) o ecuaciones de St. Venant bidimensionales. Dichas ecuaciones asumen una distribución de presión hidrostática y una distribución relativamente uniforme de la velocidad en profundidad. La hipótesis de presión hidrostática se cumple razonablemente en el flujo en ríos, así como en las corrientes generadas por la marea en estuarios. Asimismo, la hipótesis de distribución uniforme de velocidad en profundidad se cumple habitualmente en ríos y estuarios, aunque pueden existir zonas en las que dicha hipótesis no se cumpla debido a flujos locales tridimensionales o a cuñas salinas. En estos casos es necesario estudiar la extensión de dichas zonas y su posible repercusión en los resultados del modelo (Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, 2012). En el módulo hidrodinámico se resuelven las ecuaciones de

conservación de la masa (ecuación 4) y de momento en las dos direcciones horizontales (ecuación 5 y 6):

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial HU_x}{\partial x} + \frac{\partial HU_y}{\partial y} = M_s \quad [4]$$

$$\frac{\partial HU_x}{\partial t} + \frac{\partial HU_x^2}{\partial x} + \frac{\partial HU_x U_y}{\partial y} = -gH \frac{\partial Z_s}{\partial x} + \frac{\tau_{s,x}}{\rho} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} - \frac{g}{\rho} \frac{H^2}{2} \frac{\partial p}{\partial x} + 2\Omega \text{sen}\lambda U_y + \frac{\partial H\tau_{xx}^e}{\partial x} + \frac{\partial H\tau_{xy}^e}{\partial y} + M_x \quad [5]$$

$$\frac{\partial HU_y}{\partial t} + \frac{\partial HU_x U_y}{\partial x} + \frac{\partial HU_y^2}{\partial y} = -gH \frac{\partial Z_s}{\partial y} + \frac{\tau_{s,y}}{\rho} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} - \frac{g}{\rho} \frac{H^2}{2} \frac{\partial p}{\partial y} + 2\Omega \text{sen}\lambda U_x + \frac{\partial H\tau_{xy}^e}{\partial x} + \frac{\partial H\tau_{yy}^e}{\partial y} + M_y \quad [6]$$

Donde “ H ” es el calado, “ U_x ”, “ U_y ” son las velocidades horizontales promediadas en profundidad, “ g ” es la aceleración de la gravedad, “ Z_s ” es la elevación de la lámina libre, “ τ_s ” es la fricción en la superficie libre debida al rozamiento producido por el viento, “ τ_b ” es la fricción debido al rozamiento del fondo, “ ρ ” es la densidad del agua, “ Ω ” es la velocidad angular de rotación de la tierra, “ λ ” es la latitud del punto considerado, “ τ_{xx}^e ”, “ τ_{xy}^e ”, “ τ_{yy}^e ” son las tensiones tangenciales efectivas horizontales, y “ M_s ”, “ M_x ”, “ M_y ” son respectivamente los términos fuente/sumidero de masa y de momento, mediante los cuales se realiza la modelización de precipitación, infiltración y sumideros.

2.3. Modelo Tridimensional DELFT3D

DELFT3D-FLOW es una herramienta hidrodinámica multidimensional (2D o 3D) de simulación que calcula el flujo no estacionario y fenómenos de transporte que resultan de las mareas, movimiento en ríos y forzamiento meteorológico en una forma rectangular o una red equipada límite curvilínea (Deltares, 2012). DELFT3D resuelve las ecuaciones no lineales en aguas poco profundas. Las ecuaciones de aguas someras (SWE por sus siglas en inglés: Shallow Water Equations) se obtienen promediando la ecuación de Navier-Stokes en la dirección vertical. Varias hipótesis se han hecho para derivar estas ecuaciones: la hipótesis principal es que la escala de longitud horizontal es mucho mayor que la escala de longitud vertical. Esta suposición reduce la ecuación de momento vertical a una ecuación de la presión hidrostática. Mientras que esto es una suposición válida en la resolución gruesa, se debe tomar un cuidado adicional en los casos de resoluciones muy finas, así como en aquellos casos en los que la interacción de flujo de fluido con la batimetría en la parte inferior es el proceso dominante. En estas regiones, la velocidad vertical juega un papel importante en la mezcla, e incluso en el transporte de la energía (Abouali, 2013). La ecuación de continuidad promediada en la profundidad, con los términos de fuentes y sumideros, que resuelve DELFT3D se presenta a continuación:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{ii}}\sqrt{G_{jj}}} \frac{\partial [(\eta+H)]U_x\sqrt{G_{ii}}}{\partial x_i} + \frac{1}{\sqrt{G_{ii}}\sqrt{G_{jj}}} \frac{\partial [(\eta+H)]U_y\sqrt{G_{jj}}}{\partial x_j} = M_s \quad [7]$$

Donde “ H ” y “ η ” son niveles de referencia del fondo de la sección transversal del canal, “ G_{ii} ” y “ G_{jj} ” son coeficientes usados para transformar de coordenadas curvilíneas asociadas a la curvatura de la tierra a una grilla rectangular, “ U_x ” y “ U_y ” son las velocidades horizontales integradas en la profundidad en el dominio de cálculo y “ M_s ” es un término fuente/sumidero. Las ecuaciones de momento consideradas en DELFT3D son:

$$\begin{aligned}
& -\frac{u}{\sqrt{G_{ii}}} \frac{\partial u}{\partial x_i} - \frac{v}{\sqrt{G_{jj}}} \frac{\partial u}{\partial x_j} - \frac{\bar{w}}{\eta+H} \frac{u}{\partial \sigma_z} + \frac{\frac{\partial u}{\partial t}}{v^2} = \\
& M_x - \frac{P_x}{\sqrt{G_{ii}}} \frac{1}{(\eta+H)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma_z} \left(v \frac{\partial u}{\partial \sigma_z} \right) + \zeta v + \tau_{xx}^e +
\end{aligned} \quad [8]$$

$$\begin{aligned}
& -\frac{u}{\sqrt{G_{ii}}} \frac{\partial v}{\partial x_i} - \frac{v}{\sqrt{G_{jj}}} \frac{\partial v}{\partial x_j} - \frac{\bar{w}}{\eta+H} \frac{v}{\partial \sigma_z} - \frac{u v}{\sqrt{G_{ii}\sqrt{G_{jj}}}} \frac{\partial \sqrt{G_{jj}}}{\partial x_i} - \frac{u^2}{\sqrt{G_{ii}\sqrt{G_{jj}}}} \frac{\partial \sqrt{G_{ii}}}{\partial x_j} + \zeta u + \tau_{yy}^e + \\
& M_y - \frac{P_y}{\sqrt{G_{jj}}} \frac{1}{(\eta+H)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma_z} \left(v \frac{\partial v}{\partial \sigma_z} \right)
\end{aligned} \quad [9]$$

$$w = \bar{w} + \frac{1}{\sqrt{G_{ii}\sqrt{G_{jj}}}} \left[u \sqrt{G_{jj}} \left(\sigma_z \frac{\partial H}{\partial x_i} + \frac{\partial \eta}{\partial x_i} \right) + v \sqrt{G_{ii}} \left(\sigma_z \frac{\partial H}{\partial x_j} + \frac{\partial \eta}{\partial x_j} \right) \right] + \left(\sigma_z \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial \eta}{\partial t} \right) \quad [10]$$

Donde en las ecuaciones 8, 9 y 10 “ u ”, “ v ” y “ w ” son las velocidades en un punto del plano cartesiano, “ \bar{w} ” la velocidad vertical relativa al plano sigma, “ σ_z ” es la coordenada sigma para representar la profundidad del flujo, “ ζ ” término que relaciona la fuerza de coriolis, “ τ_{xx}^e ” y “ τ_{yy}^e ” un balance de las tensiones efectivas horizontales, “ M_x ” y “ M_y ” representan términos fuente/sumideros en el plano y “ ν ” la viscosidad cinemática del flujo. Finalmente “ P_x ” y “ P_y ” definen los términos de presión.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN:

Las condiciones de flujo consideradas en el estudio corresponden a periodos de retorno de 10 y 25 años; el caudal para el tramo del río Suquía para 10 años es: $Q_{10}=454 \text{ m}^3/\text{s}$ y para 25 años es: $Q_{25}=675 \text{ m}^3/\text{s}$, el caudal para el tamo del arroyo La Cañada para 10 años es: $Q_{10}=210 \text{ m}^3/\text{s}$ y para 25 años es: $Q_{25}=328 \text{ m}^3/\text{s}$. El caudal total en la confluencia para los escenarios considerados fue de $Q_{10}=664 \text{ m}^3/\text{s}$ y $Q_{25}=1003 \text{ m}^3/\text{s}$ (Reyna, 1999). El parámetro que reflejó mayor importancia en la calibración de los modelos numéricos de este flujo a superficie libre es el valor de la rugosidad; en general, para la selección de este coeficiente se deben conocer los factores que ejercen mayor influencia y las relaciones entre ellos (la rugosidad superficial o de la pared del revestimiento, la presencia de vegetación, la irregularidad de la sección, la alineación del canal en planta, la sedimentación o socavación, obstrucciones, el tamaño y forma del canal, el tirante y caudal, el material en suspensión y la carga de fondo (Chow, 1994)). A continuación en la Figura 2 se muestran los resultados de profundidad de agua y velocidad de los modelos numéricos desarrollados y los medidos en el modelo físico:

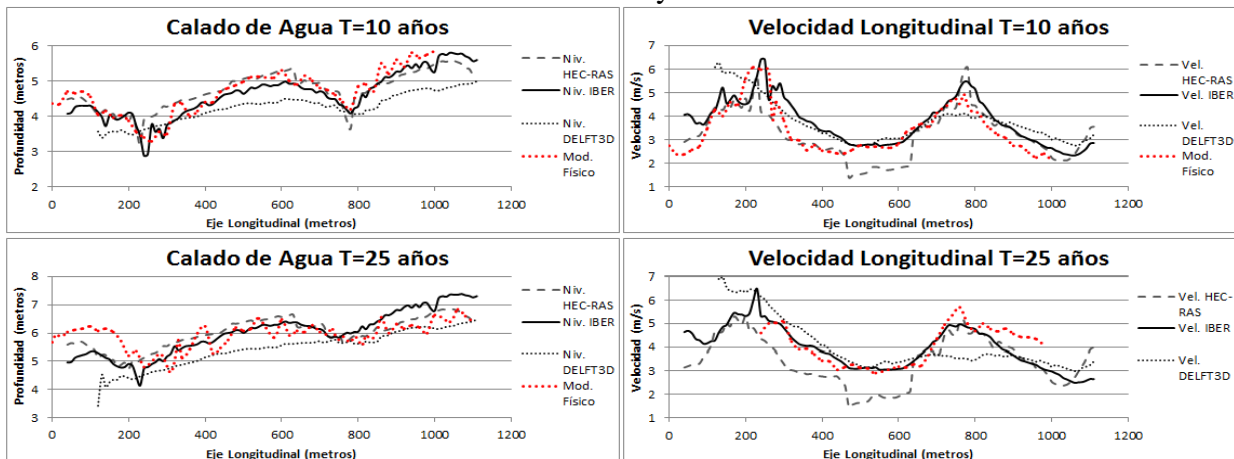


Figura 2. Resultados de profundidad de agua y velocidad media longitudinal a lo largo del eje del río Suquía obtenidos en los modelos numéricos y físico.

En la Tabla 1 se presentan los resultados del análisis estadístico para cada variable y periodo de retorno analizado.

	Niveles HEC-RAS 10 años	Niveles IBER 10 años	Niveles DELFT3D 10 años	Rango de Referencia	Valor Óptimo
Error Porcentual (%)	5.1288	5.7355	12.6638	0-100 (%)	0.0000
Error Medio Absoluto (MAE)	0.2337	0.2502	0.5399	$0 \leq \text{MAE}$	0.0000
Error Medio Cuadrado (RRMSE)	0.0664	0.0645	0.1306	$0 \leq \text{RRMSE}$	0.0000
Coefficiente de Eficiencia (EF2)	0.7690	0.7822	0.1794	$-\infty < \text{EF2} \leq 1$	1.0000
Coefficiente de Determinación (CD)	1.8316	1.2632	1.1955	$0 < \text{CD} < +\infty$	1.0000
Desviación Media (BIAS)	0.0096	0.1783	0.4898	$-\infty < \text{BIAS} < +\infty$	0.0000
Coefficiente de Determinación Múltiple (R^2)	0.7921	0.8662	0.8461	$0 < R^2 < +\infty$	1.0000
	Niveles HEC-RAS 25 años	Niveles IBER 25 años	Niveles DELFT3D 25 años	Rango de Referencia	Valor Óptimo
Error Porcentual (%)	5.9477	7.5590	9.9991	0-100 (%)	0.0000
Error Medio Absoluto (MAE)	0.3408	0.4384	0.4832	$0 \leq \text{MAE}$	0.0000
Error Medio Cuadrado (RRMSE)	0.0744	0.0925	0.1183	$0 \leq \text{RRMSE}$	0.0000
Coefficiente de Eficiencia (EF2)	0.1833	-0.2621	-0.9678	$-\infty < \text{EF2} \leq 1$	1.0000
Coefficiente de Determinación (CD)	0.9251	0.4540	0.3954	$0 < \text{CD} < +\infty$	1.0000
Desviación Media (BIAS)	-0.0637	-0.0544	0.4655	$-\infty < \text{BIAS} < +\infty$	0.0000
Coefficiente de Determinación Múltiple (R^2)	0.3757	0.4298	0.3714	$0 < R^2 < +\infty$	1.0000
	Velocidad HEC-RAS 10 años	Velocidad IBER 10 años	Velocidad DELFT3D 10 años	Rango de Referencia	Valor Óptimo
Error Porcentual (%)	18.1760	14.6599	14.8295	0-100 (%)	0.0000
Error Medio Absoluto (MAE)	0.5234	0.5970	0.5949	$0 \leq \text{MAE}$	0.0000
Error Medio Cuadrado (RRMSE)	0.1953	0.2072	0.1993	$0 \leq \text{RRMSE}$	0.0000
Coefficiente de Eficiencia (EF2)	0.5378	0.4800	0.5106	$-\infty < \text{EF2} \leq 1$	1.0000
Coefficiente de Determinación (CD)	0.9366	1.0255	1.3659	$0 < \text{CD} < +\infty$	1.0000
Desviación Media (BIAS)	0.1081	-0.4608	-0.2804	$-\infty < \text{BIAS} < +\infty$	0.0000
Coefficiente de Determinación Múltiple (R^2)	0.6098	0.6836	0.5859	$0 < R^2 < +\infty$	1.0000
	Velocidad HEC-RAS 25 años	Velocidad IBER 25 años	Velocidad DELFT3D 25 años	Rango de Referencia	Valor Óptimo
Error Porcentual (%)	13.5210	10.0868	19.9284	0-100 (%)	0.0000
Error Medio Absoluto (MAE)	0.3741	0.3833	0.7678	$0 \leq \text{MAE}$	0.0000
Error Medio Cuadrado (RRMSE)	0.1344	0.1220	0.2211	$0 \leq \text{RRMSE}$	0.0000
Coefficiente de Eficiencia (EF2)	0.7583	0.5858	-0.3600	$-\infty < \text{EF2} \leq 1$	1.0000
Coefficiente de Determinación (CD)	0.9631	1.2050	1.0013	$0 < \text{CD} < +\infty$	1.0000
Desviación Media (BIAS)	0.1568	0.1575	0.2204	$-\infty < \text{BIAS} < +\infty$	0.0000
Coefficiente de Determinación Múltiple (R^2)	0.7978	0.6345	0.1109	$0 < R^2 < +\infty$	1.0000

Tabla 1. Análisis estadístico de los resultados obtenidos en los modelos numéricos respecto a los medidos en el modelo físico.

En la Figura 3 se muestran algunos resultados prácticos obtenidos en los modelos numéricos validados y calibrados. En la parte superior de la Figura 3 se ha graficado el calado de agua en áreas coloreadas con una imagen satelital de fondo, donde se puede ver claramente las áreas inundadas para el evento respectivo (10 y 25 años). También, en la parte inferior de la Figura 3 se presenta un esquema de la velocidad media en el plano donde se pudo diferenciar Zonas de Estancamiento, Zonas de Recirculación y Zonas de Desborde para los periodos de recurrencia analizados.

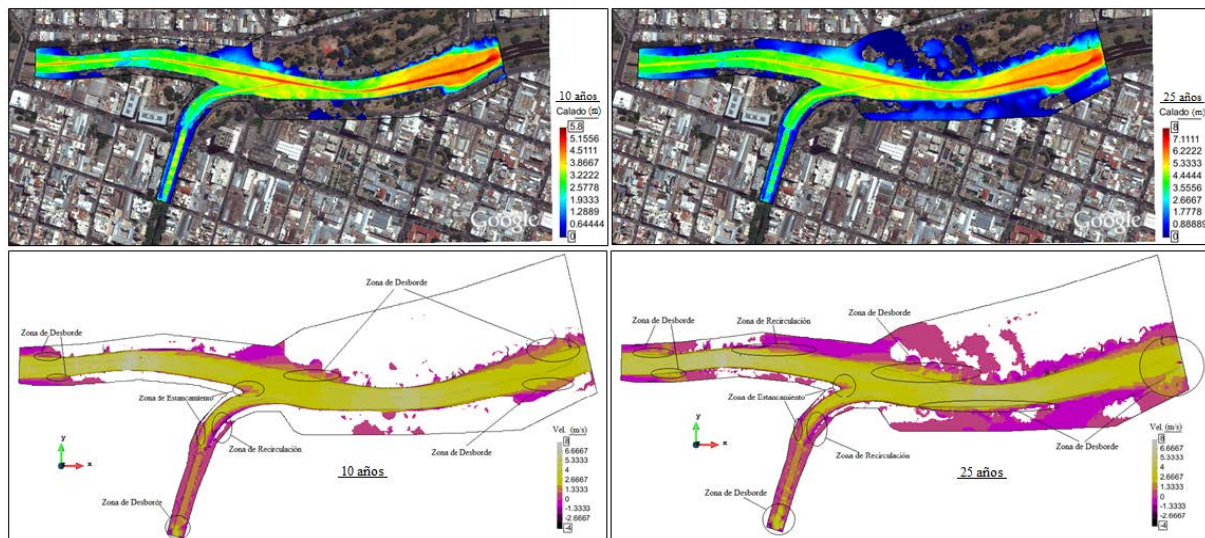


Figura 3. Esquema de áreas coloreadas del calado de agua y la velocidad obtenidos en el modelo numérico desarrollado en la confluencia del arroyo La Cañada y el río Suquia.

A través de la calibración y validación de tres modelos numéricos hidrodinámicos: HEC-RAS (1D), IBER (2D) y DELFT (3D) se llegó a la caracterización de las variables del flujo en la confluencia para eventos de retorno de 10 y 25 años, se concluyó, que el esquema numérico que representó el problema con mayor aproximación de los resultados respecto a los datos observados fue el modelo hidrodinámico bidimensional IBER (Figura 2 y Tabla 1). En la Figura 4, en la parte superior, se presentan los resultados calculados en tamaño de prototipo y a escala de longitudes 1:40 de la profundidad de agua en dirección del eje longitudinal del río Suquíá; y en la parte inferior, los resultados calculados en tamaño de prototipo y a escala de longitudes 1:40 de la velocidad media del flujo en dirección del eje longitudinal del río Suquíá.

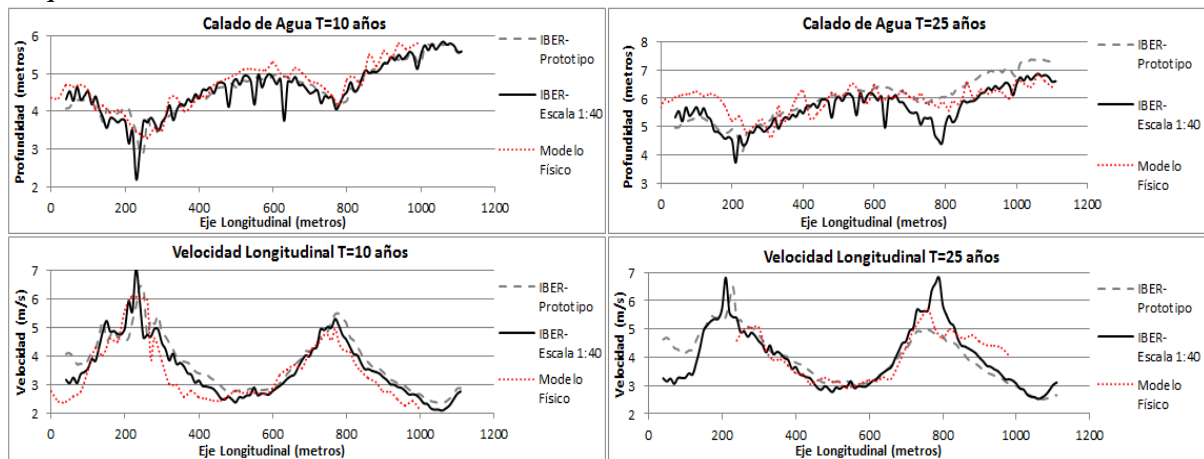


Figura 4. Análisis de los efectos de escala de las variables medidas en el modelo físico de la confluencia del arroyo La Cañada y el río Suquíá.

4. CONCLUSIONES:

Una mejor comprensión de los procesos que se desarrollan en las confluencias de flujos en cauces naturales es indispensable para comprender las variaciones tanto espaciales como temporales que ocurren en el flujo de las confluencias.

Para este trabajo se aplicaron varias técnicas para obtener las medidas de las variables de flujo en el modelo físico de fondo fijo de la confluencia del arroyo La Cañada y el río Suquíá. Con la técnica del ADV y Tubo Pitot se ensayó el período de retorno de 10 años a lo largo del eje longitudinal del río Suquíá, y se obtuvieron campos de velocidad en un total de 57 y 41 secciones transversales, respectivamente. Para el periodo de retorno de 25 años se usó la técnica de PTV y se obtuvieron velocidades con esta técnica experimental en 35 secciones transversales. Los datos obtenidos fueron procesados y utilizados en la calibración y validación de los modelos numéricos desarrollados.

A través del análisis de sensibilidad de las variables en los modelos numéricos HEC-RAS, IBER y DELFT3D, se llegó a la conclusión de que la variable de mayor importancia en la calibración de un flujo a superficie libre es la rugosidad o resistencia que se ejercen las paredes y el fondo del canal en el flujo. El valor propuesto de la rugosidad al calibrar cada uno de los modelos numéricos con los datos experimentales obtenidos en el modelo hidráulico de la confluencia, es el de una rugosidad de Manning de 0.02 en el cauce y de 0.04 en las riberas de inundación.

Del análisis cualitativo y cuantitativo de los resultados de los modelos numéricos HEC-RAS, IBER y DELFT3D; y con la ayuda de siete índices estadísticos que relacionan estos resultados respecto a los datos experimentales obtenidos en el modelo físico de la confluencia,

índices con valores aceptables en los tres modelos numéricos antes citados, se llegó a la conclusión de que el modelo hidrodinámico bidimensional IBER es el que representa de la mejor manera los resultados calculados respecto a los observados; el motivo de esta mejor representación, se explica por la característica de la confluencia estudiada que presenta propiedades de aguas poco profundas o flujos de superficie libre en aguas someras, con la relación de ancho-profundidad pequeña donde dominan los procesos bidimensionales y por lo tanto se obtienen buenos resultados al promediar las variables verticales respecto a la profundidad del flujo.

Con los resultados de los esquemas de las áreas inundadas obtenidos en el modelo hidrodinámico bidimensional IBER, se identificaron las áreas que serían afectadas al considerar lluvias en los periodos de recurrencia correspondientes a 10 y 25 años en los alrededores de la confluencia del arroyo La Cañada y el río Suquía; el área afectada en el evento de 25 años abarca una gran inundación de las vías de la costanera (aproximadamente de un metro de profundidad), así como se afecta a construcciones aledañas a las riberas de inundación; mientras que, para el periodo de retorno de 10 años, se observa que el agua transitará en su mayoría por las riberas de inundación del mismo río sin que se afecte con gravedad las estructuras y vías aledañas.

Analizando los resultados de los campos de velocidad en el plano, se observó que la confluencia del arroyo La Cañada y el río Suquía tiene un comportamiento similar al de confluencias observadas en estudios e investigaciones previas (confluencias con relación de ancho-profundidad pequeña); así se observó bien definida la zona de estancamiento del flujo inmediatamente aguas abajo de la punta de la confluencia, las zonas de capa de corte (en las paredes del canal del río Suquía y en la curvatura del arroyo de la Cañada antes de la confluencia) y la interfase de mezcla en la combinación de los dos flujos también fueron ubicadas, se observó separación del flujo aguas abajo de la zona de estancamiento y en las zonas cercanas al pequeño vertedero existente en La Cañada; la aceleración del flujo alcanzando su máxima velocidad después de la confluencia y zonas de recuperación del flujo aguas abajo de esta zona de aceleración también fueron bien definidas.

Finalmente, del análisis de los resultados del flujo en la confluencia del arroyo La Cañada y el río Suquía; resultados calculados en el modelo hidrodinámico bidimensional IBER con datos de entrada en tamaño de prototipo y en escala reducida a 1:40 (escala de longitudes no distorsionada respecto a la vertical), se concluyó que los efectos de escala no afectan a los resultados calculados, por lo que se observó que las variables de interés son representativas y tienen las mismas tendencias en todos los escenarios considerados. Del análisis estadístico de las variables calculadas respecto a los datos observados se concluyó que existen mayores diferencias en los efectos de escala de los resultados al considerar un periodo de retorno de 25 años, mientras que uno de 10 años presenta menores diferencias.

5. REFERENCIAS:

Abouali, M. (2013). “Developing a Nested Hydrodynamical Model for San Diego Bay, Using DELFT3D and DELFTDASHBOARD”. Tesis de Maestría. San Diego State University.

Barbeito, O. L.; Quintana, S. F. (1998). “Carta Geológica Geomorfológica de la Ciudad de Córdoba y su Entorno. Fotointerpretacion”. Córdoba, Argentina.

Chaudhry, M. H. (2008). “Open-Channel Flow”. University of South Carolina. Springer Science+Business Media, LLC. Second Edition.

Chow, V. T. (1994) “Hidráulica de Canales Abiertos”. McGraw Hill. University of Illinois.

Deltares (2012). “Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments”. DELFT3D-FLOW User Manual.

García, M.; Niño, Y. (2003) “Flow and Transport Equations in Surface Waters”. CEE 498 Environmental Hydrodynamics. Spring Sem.

Gizzi, S. L. (2012). “Caracterización experimental del flujo en el modelo físico tridimensional del Río Suquía”. Informe Técnico Final de Practicas Supervisadas para el grado de Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Córdoba.

Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente (2012). “Manual de Referencia Hidráulico”. Gobierno de España. IBER.

Herrero, H. (2014) “Evolución Espacial y Temporal de la Hidrodinámica en Confluencias Fluviales”. Tesis de Doctorado. Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

Lábaque, M. (2010). “Propuesta para la Confeción de Planes de Emergencia por Rotura de Presas en la Provincia de Córdoba. Aplicación al Dique San Roque”. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

Reyna, S. (1999). “Informe Final. Obra: Avenida Costanera Margen Sur. Tramo Puente Sagrada Familia – Puente Turín”. Área de Hidrología e Hidráulica. Universidad Nacional de Córdoba.

US Army Corps of Engineers (2010). Hydrologic Engineering Center. “River Analysis System Hydraulic Reference Manual”. Version 4.1.0.