

MODELACIÓN BIDIMENSIONAL DE LA CONFLUENCIA DEL RÍO SUQUIA Y ARROYO LA CAÑADA, CORDOBA, ARGENTINA

**Paolo Gyssels, Cecilia Pozzi Piacenza, Gerardo Hillman, Gonzalo Moya
y Andrés Rodríguez**

Laboratorio de Hidráulica, F.C.E.F.yN., Universidad Nacional de Córdoba, Av. Filloy s/n, Ciudad Universitaria, Córdoba, Argentina, matiasragessi@gmail.com, <http://www.efn.uncor.edu/>

Keywords: modelación 2DH, vorticidad, modelo físico, validación.

Resumen. En este trabajo se presentan las modelaciones matemáticas realizadas en un tramo del Río Suquia, comprendido entre los puentes Centenario y Avellaneda, incluyendo la desembocadura del Arroyo La Cañada y el parque Las Heras localizado aguas abajo del mencionado arroyo. Se ha utilizado un modelo 2DH (RMA2). Se analizaron distintas recurrencias (10 y 25 años) para distintas alternativas de modelación. Las alternativas analizadas comprenden: utilizar rugosidad uniforme en todo el dominio, rugosidad variable de acuerdo a las características topográficas y utilizar el término de vorticidad en las ecuaciones. Posteriormente se evaluaron las capacidades y deficiencias en cada caso. Para la validación del modelo se contrastaron los resultados de la modelación matemática con los obtenidos en la modelación física del tramo en escala 1:40 construido en el Laboratorio de Hidráulica de la UNC.

1 INTRODUCCIÓN

El Río Suquía atraviesa la Ciudad de Córdoba, Argentina en dirección oeste-este. En parte de su tramo urbano se ha rectificado su canal de estiaje con un recubrimiento de hormigón. Durante su recorrido en el tramo urbano, el río Suquía recibe los aportes de La Cañada que surge a partir del encauzamiento parcial del arroyo homónimo que cruza de suroeste a norte a la Ciudad.

En este trabajo se presentan las tareas realizadas para la modelación matemática bidimensional del tramo de río Suquía comprendido entre los puentes Centenario y Antártida, incluyendo la región de la confluencia con el arroyo La Cañada y parte del Parque las Heras emplazado en la margen izquierda del río. Esta modelación matemática ha sido utilizada como complemento de los resultados obtenidos de la modelación física realizada para el mismo tramo en escala 1:40 construido en el Laboratorio de Hidráulica (FCEFYN – UNC).

2 OBJETIVOS

- Evaluar el comportamiento hidráulico del tramo el río Suquía en su confluencia con el arroyo de La Cañada para distintos periodos de recurrencia poniendo especial interés en la distribución de caudales y los cambios en los patrones de distribución del flujo.
- Calibrar los valores de los coeficientes de rugosidad de Manning evaluando su influencia en el desarrollo del flujo.
- Evaluar las capacidades y deficiencias de distintas alternativas de simulación del modelo utilizado..

3 MATERIALES Y METODOS

La herramienta utilizada para la modelación del escurrimiento bidimensional ha sido el modelo RMA2 (Norton et al, 1976) (RMA2, 1996). Este es un modelo numérico hidrodinámico en elementos finitos bidimensional (2DH – dos Dimensiones Horizontales), promediado en la vertical, que simula flujos naturales a superficie libre, donde el movimiento es esencialmente horizontal y puede ser descrito por una aproximación bidimensional debido a que la aceleración vertical es pequeña en comparación con la componente horizontal y en la hipótesis que el flujo se mantenga subcrítico en todo el dominio de cálculo. El modelo calcula la solución por elementos finitos de las ecuaciones de Navier–Stokes, que derivan directamente de la 2ª Ley de Newton, bajo la forma de Reynolds para flujos turbulentos:

$$h \frac{\partial v}{\partial t} + hu \frac{\partial v}{\partial x} + hu \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \left(E_{yx} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + E_{yy} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + gh \left(\frac{\partial a}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{g v n^2}{(h^{1/6})^2} + (u^2 + v^2)^{1/2} - \xi V_a^2 \operatorname{sen} \psi - 2h \omega v \operatorname{sen} \phi = 0 \quad (\text{Ec. 1})$$

$$h \frac{\partial u}{\partial t} + hu \frac{\partial u}{\partial x} + hu \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \left(E_{xx} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + E_{xy} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + gh \left(\frac{\partial a}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{g u n^2}{(h^{1/6})^2} + (u^2 + v^2)^{1/2} - \xi V_a^2 \cos \psi - 2h \omega v \operatorname{sen} \phi = 0 \quad (\text{Ec. 2})$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + h \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} = 0 \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde: h , profundidad; u , v , velocidades promediadas en coordenadas cartesianas; x , y , t , coordenadas cartesianas y tiempo; ρ , densidad del fluido; E , coeficiente de viscosidad de remolino; xx , dirección normal al plano vertical que contiene al eje x ; yy , dirección normal al plano vertical que contiene al eje y ; xy y yx , dirección tangencial a cada plano; g , aceleración de la gravedad; a , cota de fondo; n , coeficiente de rugosidad de Manning; ξ , coeficiente empírico de corte por viento; V_a , velocidad del viento; ψ , dirección del viento; ω , velocidad angular de giro de la Tierra; ϕ , latitud local.

Este modelo calcula los niveles de la superficie libre y las componentes horizontales medias de la velocidad para flujo subcrítico en campos bidimensionales de flujo. Las pérdidas por fricción se estiman a través de la ecuación de Manning, mientras que para caracterizar la turbulencia se utilizan coeficientes de viscosidad de remolino.

La vorticidad es una medida de la rotación del flujo que se produce principalmente en correspondencia de las curvas presentes en los ríos. Esta rotación genera una corriente secundaria elicoidal debido al desarrollo de aceleraciones radiales hacia el lado externo de las curvas. Este fenómeno produce generalmente sedimentación en el lado interior de las curvas y erosiones en el lado exterior. RMA2 no puede reproducir este fenómeno debido a que es un modelo bidimensional mientras que la vorticidad genera efectos tridimensionales. Sin embargo, en el modelo se incorporó una metodología de cálculo, denominada “*bendway correction*”, para mejorar la estimación de las velocidades por efecto de la vorticidad.

4 ESCENARIOS MODELADOS

Se presentan las modelaciones en un tramo del río Suquia y en el arroyo La Cañada para los caudales asociados a recurrencias de 10 y 25 años. En particular, se han realizado simulaciones considerando la coincidencia en la ocurrencia de los caudales correspondientes a los dos períodos de retorno, tanto en la Cañada como en el Suquia. Además, para cada escenario se han evaluado tres alternativas: con condiciones de rugosidad del fondo uniforme (0,06), con rugosidad de fondo variable (Tabla 1) y teniendo en cuenta el término de vorticidad. Estos resultados han sido comparados con los resultados obtenidos el modelo físico para las mismas condiciones.

4.1 Discretización del dominio e interpolación de la topografía. Condiciones de borde e iniciales.

La superficie total modelada fue dividida en polígonos de detalle como se muestra en la Figura 1, de este modo se pudo dar mayor discretización a las zonas de mayor interés en el dominio de cálculo, como por ejemplo en el canal central del Río Suquia y del arroyo La Cañada, y asignar diferentes coeficientes de rugosidad. La malla de cálculo está compuesta por elementos triangulares y rectangulares que hacen un total de 7.684 elementos y 17.150 nodos. La celda de menor tamaño tiene 2 m de lado, mientras que las de mayor tamaño tienen 10 m de lado. En las zonas en las que se localizaron las condiciones de borde y en las proximidades de las pilas de los puentes, se ha realizado un tratamiento especial mejorando la definición de la malla. De esta manera se disminuye el efecto de borde en el caudal de ingreso

disminuyendo las inestabilidades del modelo y se optimiza el cálculo en las proximidades de puntos singulares donde la hidrodinámica es más compleja. A cada polígono de detalle se le asignó un valor de rugosidad en función del caso examinado.

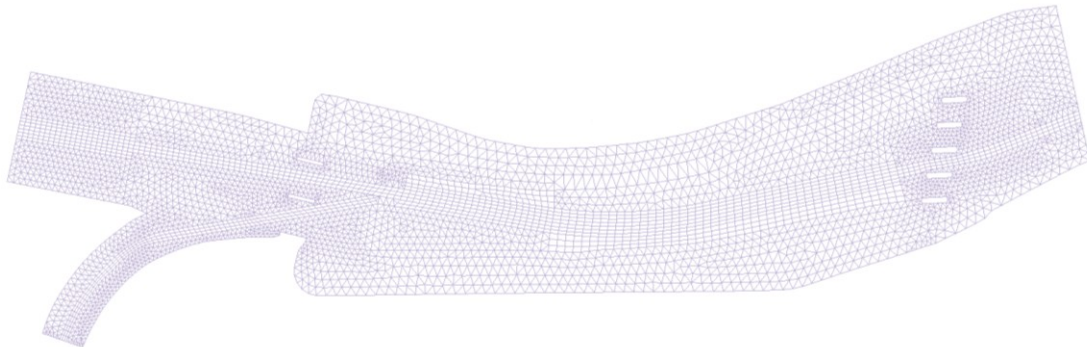


Figura 1.- Polígonos de detalle y malla de cálculo.

Posteriormente se generó el modelo de terreno obtenido luego de interpolar la malla de elementos finitos al modelo topográfico (Figura 2)

Tabla 1.- Rugosidad de Manning adoptadas para cada material del lecho del sistema río-cañada.

Material	Rugosidad de Manning
1. Cajero central Suquia y cañada	0,03
2. Encachado (Piedras)	0,035
3. Pasto	0,04
4. Mezcla edificios-árboles	0,06

Se han utilizado dos condiciones de borde de caudal y una de nivel (Figura 3). Una de las condiciones de borde de caudal se aplicó en la zona aguas arriba del río Suquia (entre puente Avellaneda y puente Antártica). La otra condición de borde de caudal se aplicó en una sección del arroyo Cañada ubicada aguas abajo de la expansión del flujo.

La condición de borde de nivel se ha colocado en el límite inferior de la zona de modelación para darle continuidad al sistema (aguas abajo del puente Centenario).

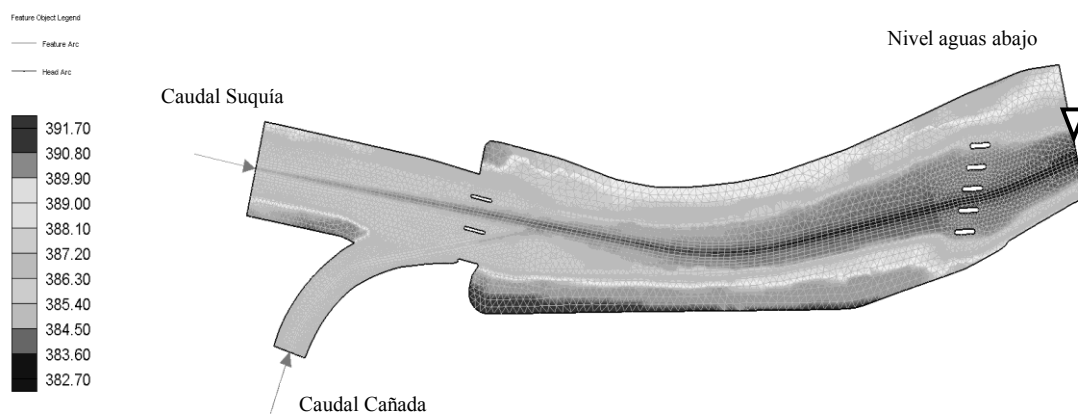


Figura 2.- Modelo digital del terreno por interpolación de los datos topográficos sobre la malla numérica y Condiciones de Borde.

Además de las condiciones de borde, el modelo requiere imponer condiciones iniciales.

Para ello, se planteó la suposición del mojado total del área. Cabe aclarar que la condición de que toda el área a modelar esté mojada al inicio es una condición necesaria para el buen funcionamiento del modelo RMA2.

En la Tabla 2 se muestran las condiciones de contorno de caudal y nivel utilizadas para las recurrencias de 10 y 25 años, que tienen una correspondencia con la modelación física. Las condiciones de borde de los caudales se tomaron a partir de datos suministrados por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Córdoba y las condiciones de niveles aguas abajo a partir de los resultados de las modelaciones unidimensionales realizadas por el Laboratorio de Hidráulica de la UNC, utilizando Hec Ras.

Tabla 2.- Condiciones de borde modeladas.

Condiciones de borde	Recurrencia (años)	
	10	25
Q Suquia (m ³ /s)	454	675
Q Cañada (m ³ /s)	210	328
Nivel aguas abajo Suquia (m s.n.m.)	387,34	388,53

5 RESULTADOS

A continuación se muestran los resultados obtenidos para el campo de velocidad y la evolución de la misma en distintas secciones de interés ubicadas longitudinal y transversalmente al cauce. Por falta de espacio en este apartado se presentan los resultados asociados a la recurrencia de 10 años únicamente. En las figuras siguientes se presenta la evolución del campo de velocidad para cada una de las tres alternativas analizadas.

En la Figura 3 se presenta el campo de velocidad para el caso de rugosidad uniforme en todo el dominio modelado. Se observa la existencia de velocidades en un entorno uniforme a los 2,50 m/s prácticamente en todo el dominio que no llega a secarse.

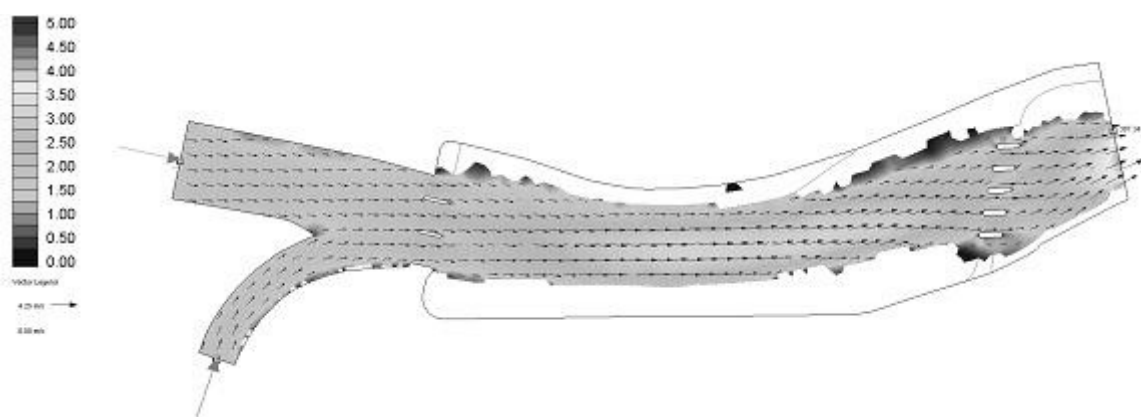


Figura 3.- Campo de velocidad con rugosidad uniforme

En la Figura 4 se presentan los resultados obtenidos al hacer variar la rugosidad de acuerdo al tipo de material predominante en el lecho. Como se observa se produce un cambio importante en el patrón de velocidades como fruto de la adecuación del coeficiente de Manning. Se presentan velocidades máximas del orden de 5 m/s en la zona del canal de estiaje entre los puentes Antártida y Centenario. Ese es el cambio fundamental a pesar de la pequeña

área de influencia del canal de estiaje en comparación con el resto del dominio. Asimismo, se observa una disminución del área mojada por los caudales circulantes, debido a las mayores velocidades del flujo con respecto al caso anterior con rugosidades uniformes más elevadas.

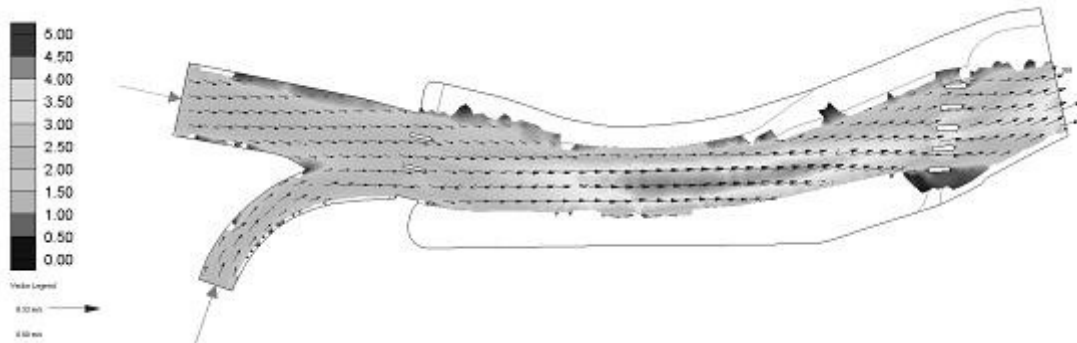


Figura 4.- Campo de velocidad con rugosidad variable

En la Figura 5 se muestran los resultados obtenidos al incorporar el término de vorticidad en la ecuación de modelado. Como se observa en la figura no se obtienen mejoras substanciales en el patrón de velocidad en el tramo del río. En cambio, en la distribución de velocidades obtenida para el arroyo La Cañada se observa una mejora importante en el patrón de velocidades: se obtiene una mejor representación del flujo en la zona interna de la curva por efecto de haber incorporado la vorticidad.

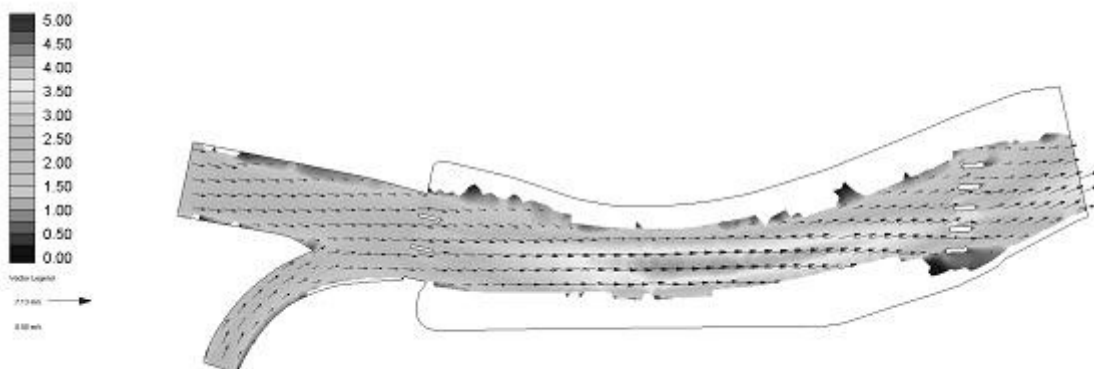


Figura 5.- Campo de velocidad con vorticidad.

A los efectos de obtener una representación de la evolución del perfil de velocidades en distintas zonas de interés se trazaron sobre el dominio modelado un perfil longitudinal (en la zona de la tolva) y 2 perfiles transversales (uno aguas abajo del puente y otro al inicio de la confluencia).

En la Figura 6 se presenta el perfil de velocidades a lo largo de la sección longitudinal de la tolva. Se observa en la figura la influencia aguas abajo en la distribución de velocidades debida a la presencia de las pilas del puente Antártida ubicado aproximadamente en progresiva 550 y las pilas del puente Centenario en progresiva 1025 de la figura. Asimismo, se observa el incremento en el módulo de las velocidades al considerar una rugosidad variable de magnitud inferior, mientras que la vorticidad no implica ningún cambio sustancial.

En la Figura 7 se observa el perfil de velocidades para la sección ubicada aguas abajo del puente Antártida (Sección 3). Se puede apreciar el efecto de las pilas sobre el perfil en las

progresivas 50 y 75 aproximadamente. También, se nota la diferencia de los perfiles entre el caso con rugosidad uniforme y con rugosidad. No se aprecian en este caso variaciones importantes en el perfil por efecto de la verticidad debido a que el efecto de la curvatura del río en este tramo está ausente.

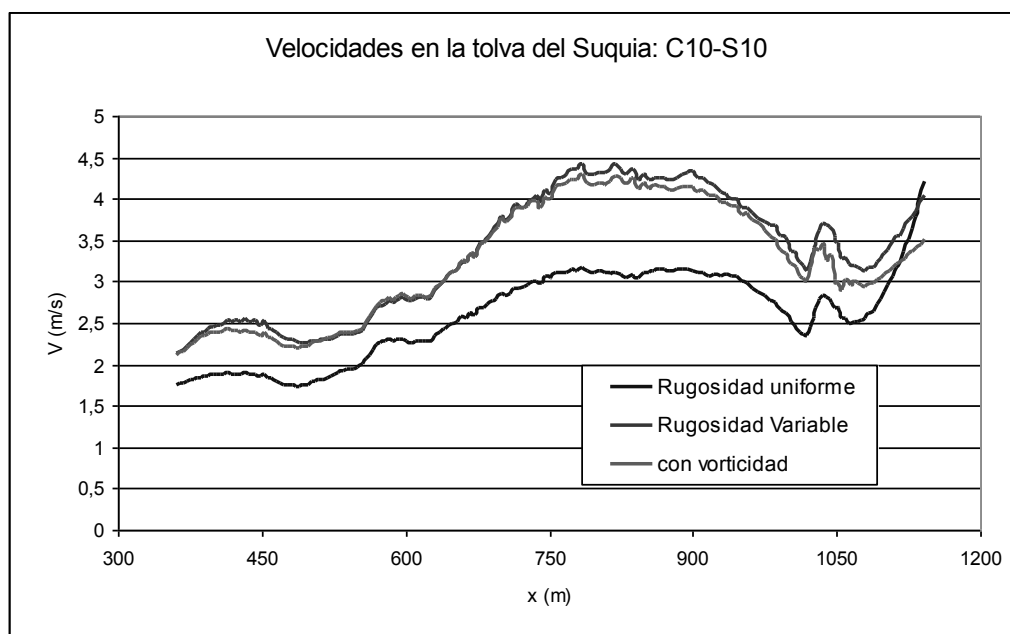


Figura 6.- Perfil de velocidades en el eje de la tolva. Tr: 10 años.

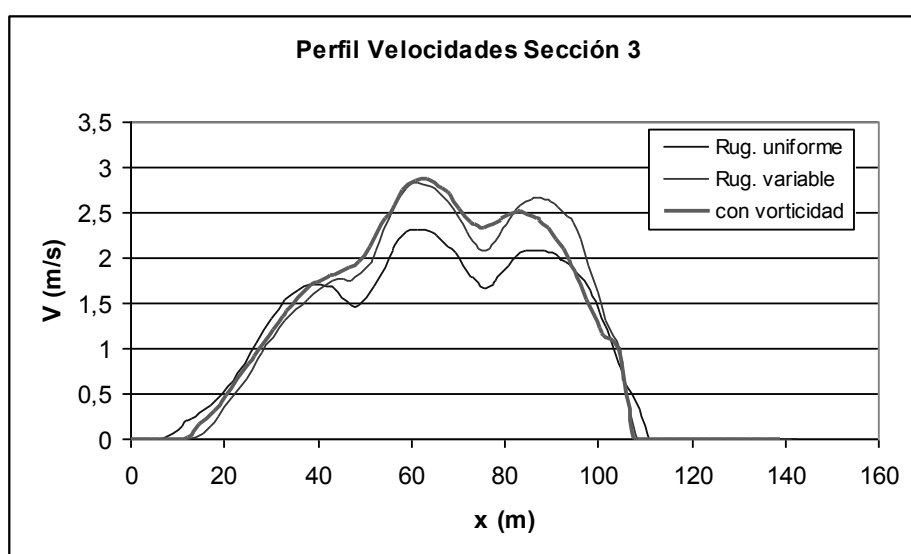


Figura 7.- Perfil transversal de velocidades aguas abajo puente. Tr: 10 años.

La Figura 8 corresponde a la sección transversal ubicada en la zona de inicio de la confluencia del Río Suquia con el arroyo La Cañada (Sección 5). Se observa aquí también la diferencia de los perfiles al variar la rugosidad y la influencia del vértice de la confluencia en la distribución de la velocidad.

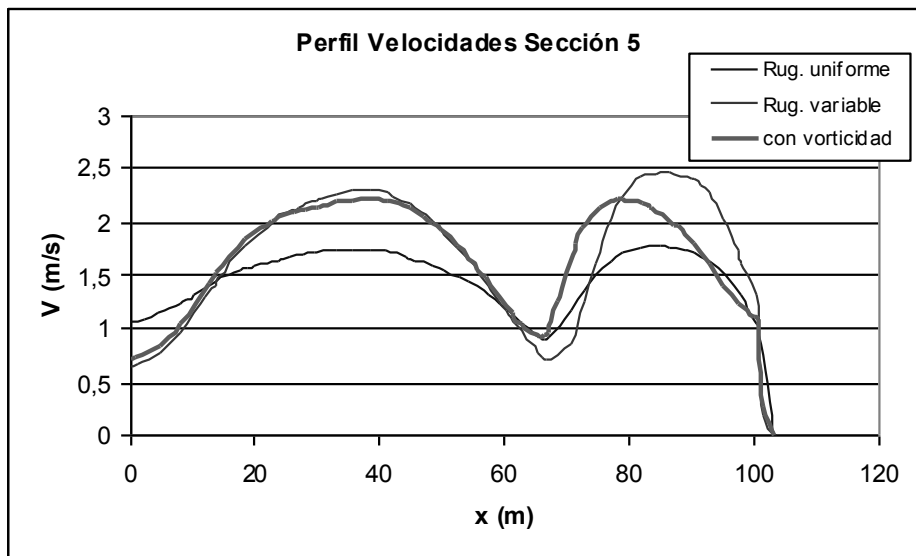


Figura 8.- Perfil transversal de velocidades al inicio de la confluencia. Tr: 10 años.

En la Figura 9 se presenta evolución del tirante en el perfil longitudinal en la tolva del Río Suquia para las tres alternativas analizadas correspondientes a un caudal de 10 años de tiempo de recurrencia escurriendo por el Río Suquia y el Arroyo La Cañada. Se observa la disminución de los tirantes en toda la sección, entre el caso con rugosidad uniforme y con rugosidad variable. La vorticidad no influye sobre los tirantes de la sección del eje de la tolva.

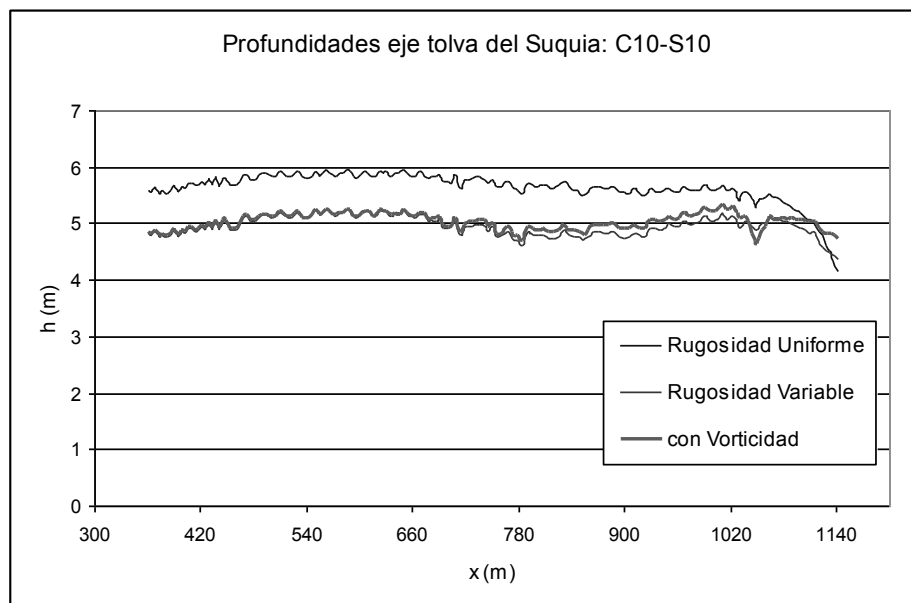


Figura 9.- Perfil longitudinal de distribución del tirante. Tr: 10 años.

6 COMPARACION CON EL MODELO FISICO

En este apartado se muestran las comparaciones de los niveles y de las velocidades obtenidas tanto con el modelo físico como con el modelo numérico. Las comparaciones de las velocidades se han podido efectuar solamente en pocos puntos debido a la dificultad de realizar mediciones de este tipo en el modelo físico. Sin embargo, se disponen de numerosos puntos de mediciones de niveles. En la Figura 10 se muestran los puntos de medición del

modelo físico que tienen su correspondencia en el modelo numérico.

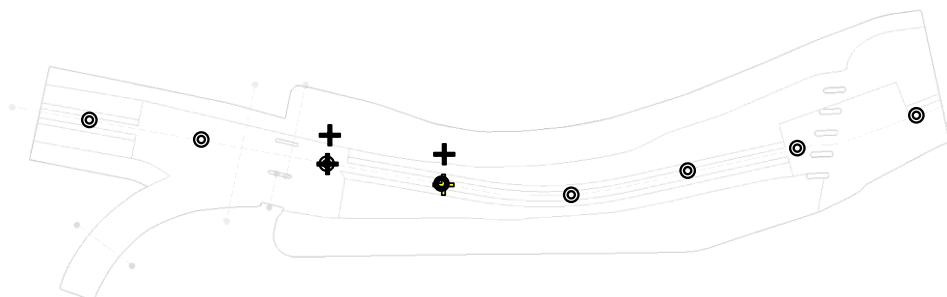


Figura 10.- Puntos de mediciones de velocidad (evidenciados con cruces negras) y de niveles (círculos negros) en el modelo físico, ubicados en el modelo numérico.

En la Figura 11 se muestran los resultados de niveles obtenidos con el modelo físico y con el modelo numérico con rugosidad variable y con vorticidad incluida, para una recurrencia de 10 años. En la Figura 12 se muestran los mismos resultados para el caso de 25 años de recurrencia.

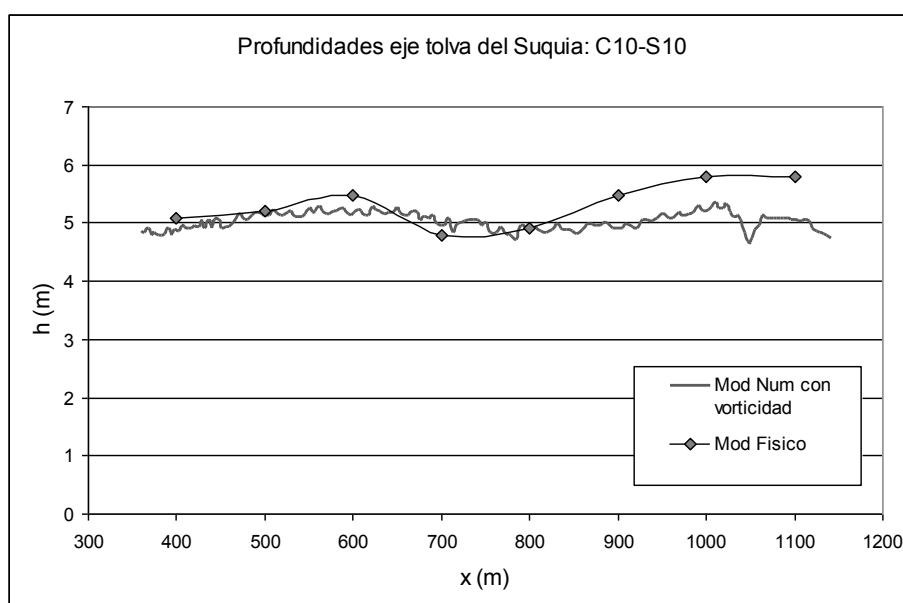


Figura 11.- Comparación entre los niveles medidos en modelo físico y numérico. Tr: 10 años.

Se observa una buena concordancia de los resultados de niveles entre modelo numérico y modelo físico, en general. Se observa una diferencia en los resultados en la parte final del río, debido a que el modelo numérico no puede simular el efecto de ahogamiento del puente Antártida que actúa como una barrera y genera un remanso aguas arriba. El modelo numérico trabaja con aproximación bidimensional y no puede simular la obstrucción generada por la parte superior del puente. En la Tabla 3 se muestran los valores de velocidades medidas en el modelo con respecto a las velocidades obtenidas numéricamente.

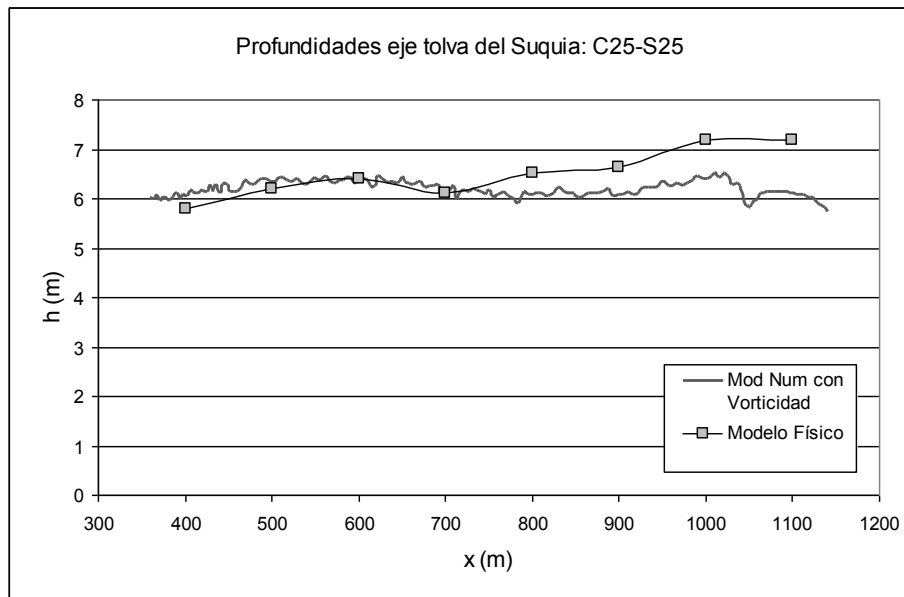


Figura 12.- Comparación entre los niveles medidos en modelo físico y numérico. Tr: 25 años.

Tabla 3.- Comparación entre los valores medidos de velocidad en el modelo físico con los modelados numéricamente (en los casos de rugosidad variable y con vorticidad).

	Progresiva [m]	V _{xmed} MF** [m/seg]	V _{xmed} MN** [m/seg]	Prof. MF** [m]	Prof. MN** [m]	Froude MF**	Froude MN**
Suquia	600 (C)	3,96	2,81	5,48	5,23	0,54	0,11
Suquia	600 (MI)	3,19	1,84	4,04	3,86	0,51	0,08
Suquia	700 (C)	5,09	3,73	4,80	4,98	0,74	0,11
Suquia	700 (MI)	4,85	2,98	3,41	3,78	0,84	0,1

En el caso de las velocidades, se observa que las mediciones realizadas en el modelo físico dan magnitudes más elevadas que las que se obtienen con el modelo numérico en los mismos puntos. Cabe evidenciar que las velocidades medidas en el modelo físico se han obtenido por una medición en un volumen de fluido en un punto en la vertical mediante ADV, mientras que las velocidades del modelo son promediadas en toda la columna de agua. Por lo tanto, en función del tipo de perfil vertical de velocidades que puede resultar del flujo (en un proceso que es altamente tridimensional) la medición puntual de velocidad puede ser superior al promedio vertical obtenido con el modelo numérico.

7 CONCLUSIONES

Se ha detectado una diferencia importante en la configuración del flujo entre los casos con rugosidad uniforme y no uniforme. La rugosidad variable (correspondiente al tipo de material del lecho) produce resultados más acordes a lo representado por el modelo físico.

Las modelaciones que incluyen el término de vorticidad mejoran considerablemente la representación del patrón del flujo en la zona de curvatura de la Cañada. En el resto del dominio se conserva el patrón de velocidades y niveles obtenido con la alternativa de rugosidad variable sin vorticidad. Por lo tanto, para el nivel de precisión esperado, es suficiente solo el ajuste por rugosidad dado la mayor inversión en tiempo computacional que

requiere el cálculo por vorticidad.

En comparación con el modelo físico los valores del tirante en la sección longitudinal y en los puntos testigo ubicados en la planicie de inundación se encuentran dentro de los límites esperables. Por otro lado, en la zona aguas abajo del modelo cercana a la condición de borde la modelación matemática no puede representar el remanso producido por la presencia del puente, por lo cual se observa solo en esa zona puntual una diferencia entre los niveles modelados matemática y físicamente. En cuanto a la velocidad en la sección longitudinal, para ambas recurrencias los valores modelados se encuentran por debajo de los del modelo físico pero en un rango aceptable.

REFERENCIAS

- RMA2 WES Versión 4.3. (1996). "Manual del Usuario". US Army Corps of Engineers. Waterways Experiment Station Hydraulics Laboratory, Walla Walla, Wash.
- Norton, William R., Ian P. King and Gerald T. Orlob. (1973). "A finite element model for lower granite". Final report prepared for Walla Walla District, U.S. Army Corps of Engineers, Walla Walla, Wash.
- Streeter, Víctor L y Wylie, E. Benjamín. (1999) "Mecánica de Fluidos". Novena Edición. Editorial McGraw Hill.