

VALIDACIÓN COMPUTACIONAL DE ANALOGÍAS DE FLUJO ALREDEDOR DE UNA PILA Y EN UNA CONFLUENCIA.

Cecilia Pozzi Piacenza^a, Iván M. Ragessi^a, Carlos M. García^{a,c}, Santiago Márquez
Damian^{b,d} y Horacio Herrero^a

^a*Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA). Laboratorio de Hidráulica de la Fac. Cs.
Exactas, Físicas y Naturales de la Univ. Nacional de Córdoba, Argentina.
cecilia.pozzi.piacenza@unc.edu.ar*

^b*Centro de Investigación de Métodos Computacionales, Predio CONICET Santa Fe, Colectora Ruta
Nac 168, Km 472, Paraje El Pozo, 3000 Santa Fe, Argentina.*

^c*Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina.*

^d*Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Santa Fe (UTN-FRSF), Argentina.*

Palabras clave: Recursos Hídricos, pila y confluencia fluvial, métodos numéricos y experimentales.

Resumen. Las confluencias son ambientes complejos presentes en los sistemas fluviales que juegan un rol importante en su hidrodinámica, ya que la convergencia de dos o más flujos produce patrones complejos de movimiento. Una característica hidrodinámica relevante es la formación de una interfase de mezcla entre los flujos convergentes y el desarrollo de estructuras de flujo coherentes de gran escala dentro de esta interfaz. Los procesos hidrodinámicos que se desarrollan en las interfaces de mezcla están gobernados por diferentes parámetros geométricos y del flujo. En este trabajo se analiza el comportamiento hidrodinámico de una confluencia de dos flujos paralelos a partir de una simulación numérica tridimensional validada con datos experimentales específicamente registrados para este proyecto. A partir de los resultados se ha verificado la analogía existente entre el comportamiento del flujo en una confluencia, con respecto del que sucede aguas abajo de una pila cilíndrica cuando la relación de momentos de los flujos convergentes es igual a la unidad.

Para realizar este trabajo se ha implementado un modelo numérico en tres dimensiones, utilizando como herramienta el código libre y abierto OpenFOAM® (Open Field Operation and Manipulation). El modelo numérico fue validado utilizando datos experimentales específicamente registrados para este estudio en un canal de sección rectangular a fondo rígido en las instalaciones del Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA), Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay. En la etapa de validación se compararon los campos de velocidades longitudinales y los tiempos característicos de las estructuras coherentes, observadas en la instalación experimental y en las simulaciones numéricas.

Con el modelo numérico validado se ha comenzado a evaluar el comportamiento del flujo para distintas relaciones de caudales y momentos de flujo.

1 INTRODUCCIÓN

Las confluencias son elementos presentes en los sistemas fluviales que juegan un rol importante en su hidrodinámica y son ambientes complejos, ya que la convergencia de dos o más flujos produce complejos patrones de movimiento de fluidos. Una característica hidrodinámica relevante de las confluencias fluviales es la formación de una interfase de mezcla entre los flujos convergentes y el desarrollo de estructuras coherentes de escalas mayores a la profundidad del flujo dentro de esta interfaz (Constantinescu et al. 2011). Estos procesos hidrodinámicos que se desarrollan en las interfaces de mezcla están gobernados por diferentes parámetros geométricos y del flujo, siendo los principales parámetros las relaciones de cantidad de movimiento y de velocidad entre los dos flujos convergentes, la magnitud de los ángulos entre los flujos de entrada y el canal aguas abajo, la densidad de las masas de fluidos de aproximación y los cambios en la batimetría en la entrada a la confluencia graduales (fondo concordantes) o bruscos (fondo no concordante). Debido a la gran cantidad de parámetros interactuando de manera conjunta, resulta complicado realizar de manera adecuada una correcta caracterización de la hidrodinámica en estos ambientes.

Herrero (2014) presentó una investigación experimental de laboratorio sobre una confluencia fluvial con geometría simple y fondo concordante, en la cual se evaluaron las características hidrodinámicas en la interfase de mezcla, verificando que los procesos turbulentos observados en esa zona de mezcla presentan características similares a los que se desarrollan aguas abajo de un obstáculo. En la búsqueda de extender este estudio a diferentes condiciones geométricas y de flujo (Chang et al, 2011) es que se han realizado simulaciones numéricas del flujo aguas abajo de un obstáculo y de una confluencia de flujos paralelos (Pozzi Piacenza et al, 2014). En este trabajo se presenta la validación del modelo numérico del flujo aguas abajo de un obstáculo utilizando datos experimentales y los avances en la validación del modelo numérico de una confluencia fluvial.

2 OBJETIVO

En este trabajo se presenta una simulación numérica tridimensional del comportamiento hidrodinámico del flujo aguas abajo de una pila cilíndrica y de una confluencia de dos flujos paralelos para verificar la analogía existente entre los patrones cuando la relación de momentos de los flujos convergentes es igual a la unidad. La simulación numérica ha sido validada a través del contraste con datos experimentales específicamente registrados para este trabajo.

3 INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

Los datos experimentales fueron medidos en un canal horizontal de sección rectangular de 1.5 m de ancho y 18 m de longitud, con paredes de mampostería con terminaciones de revoque fino y fondo de arena de diámetro nominal $d_{50} = 0.8$ mm, rigidizado mediante el cernido de una delgada capa de cemento en la zona de estudio para evitar erosiones locales durante las mediciones (Herrero, 2014). La instalación experimental se encuentra en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de la República (Uruguay). Para representar las tipologías o configuraciones de flujos a ensayar se utilizó una tubería cilíndrica de policloruro de vinilo (PVC por sus siglas en inglés) de 16 cm de diámetro que representa la pila (Figura 1). Para representar la confluencia se agregó un tabique divisor centrado respecto al tubo cilíndrico, de esta forma se dividió el canal generando la confluencia (Figura 2).



Figura 1.- Vista frontal (izq.) y en planta (der.) de la instalación para evaluar el flujo alrededor de una pila.



Figura 2.- Vista frontal (izq.) y en planta (der.) de la instalación para evaluar al flujo en una confluencia de flujos paralelos.

3.1 Configuraciones y condiciones de flujo.

Se representaron experimentalmente diversos escenarios y en este trabajo se presentan los resultados obtenidos para la condición de mayor caudal y profundidad del flujo ($Q = 80$ l/s y $H = 0.26$ m). Para las condiciones experimentales ensayadas, el flujo de aproximación puede describirse con los siguientes parámetros hidráulicos: Velocidad de aproximación (U_m) de 0.21 m/s (flujo alrededor de una pila) y 0.23 m/s (confluencia de flujos paralelos); Números de Reynolds ($Re = U_m H / \nu$ donde ν es la viscosidad cinemática del agua) iguales a 53333 y 59701 (para pila y la confluencia, respectivamente), Reynolds del obstáculo ($Re_D = U_m D / \nu$) iguales a 33000 y 36800 (para pila y la confluencia, respectivamente) y Froude ($Fr = U_m / (gH)^{0.5}$) iguales a 0.13 y 0.14 (para pila y la confluencia, respectivamente) en condiciones de régimen subcrítico. Las profundidades de escurrimiento crítico (y_c) son 0.066m y 0.087m para la pila y confluencia, respectivamente. Asumiendo la validez de la hipótesis de similitud entre el comportamiento del flujo en la interfaz de mezcla de una confluencia con las características del flujo detrás de un obstáculo, el Re_D simulado en este trabajo se encuentra en un rango que garantiza una frecuencia adimensional de desprendimientos de estructuras coherentes (Número de Strouhal) constante igual a 0.2. Valores de Re_D menores a 300 se encuentra en un régimen denominado “laminar”, en el cual la frecuencia adimensional crece con Re_D (Schewe, 1983).

Para caracterizar experimentalmente el flujo se utilizaron dos modernas técnicas hidroacústicas de medición de velocidades de flujo: Perfilador de Velocidad por Ultrasonido (UVP por sus siglas en inglés) y Velocímetro Acústico Doppler (ADV por sus siglas en inglés). Con UVP se midieron: a) Perfiles verticales medios de velocidades en una localización de la línea

central de los flujos de aproximación (caracterizando el flujo no perturbado aguas arriba; estas localizaciones no se muestran en Figura 3); y b) series temporales de velocidad longitudinal del flujo en perfiles longitudinales localizados a mitad de la profundidad del flujo distribuidos en forma transversal a lo largo del canal (localizaciones transversales adimensionales $y/d = -3.8, -2.8, -1.9, -0.9, 0, 0.9, 1.9, 2.8, 3.8$), en un área ubicada hasta 50 cm aguas abajo del obstáculo. Con ADV se midieron series temporales de las tres componentes del vector velocidad del flujo en distintas localizaciones aguas abajo de los obstáculos, en particular a lo largo de la zona de estancamiento y de la interfase de mezcla, las localizaciones corresponden a los puntos 1 a 10 en la Figura 3.

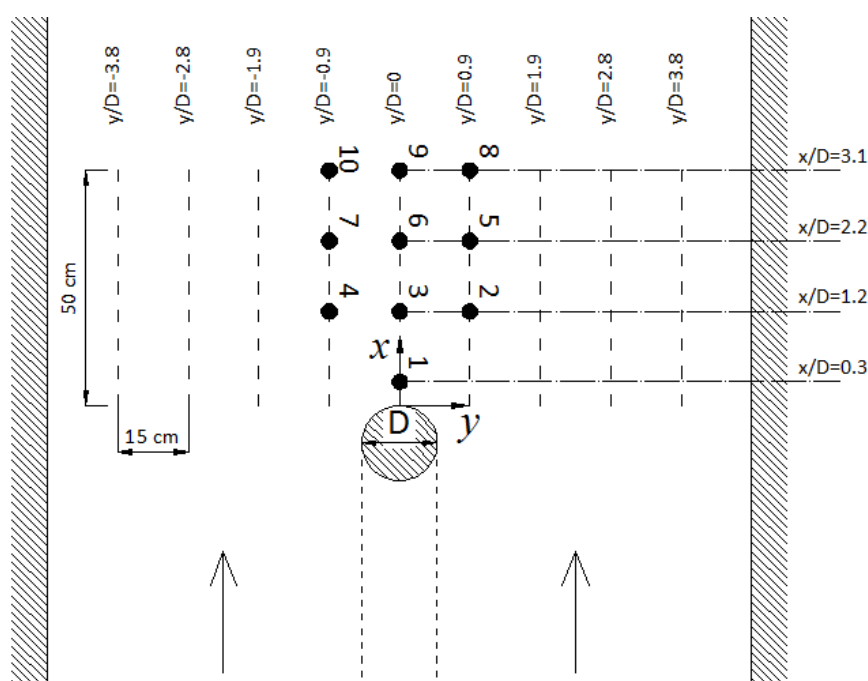


Figura 3.- Ubicación de los puntos de medición con UVP y ADV.

3.2 Resultados experimentales.

En las Figuras 4 y 5 se muestran en la región aguas abajo de la pila y la confluencia las velocidades medias longitudinales obtenidas experimentalmente adimensionalizadas con la velocidad media del flujo de aproximación. En relación a la incertidumbre de los valores medidos experimentalmente, se implementó para su estimación la metodología de remuestreo por bloques móviles (MBB por sus siglas en inglés) propuesta por García et al (2006) con lo cual se obtuvo que el coeficiente de variación de los valores medios de velocidad del flujo registrados con ADV están en el orden del 1%. En las Figuras 4 y 5, las progresivas longitudinales y transversales (x e y , respectivamente) fueron adimensionalizadas con la longitud característica correspondiente al diámetro de la pila (D).

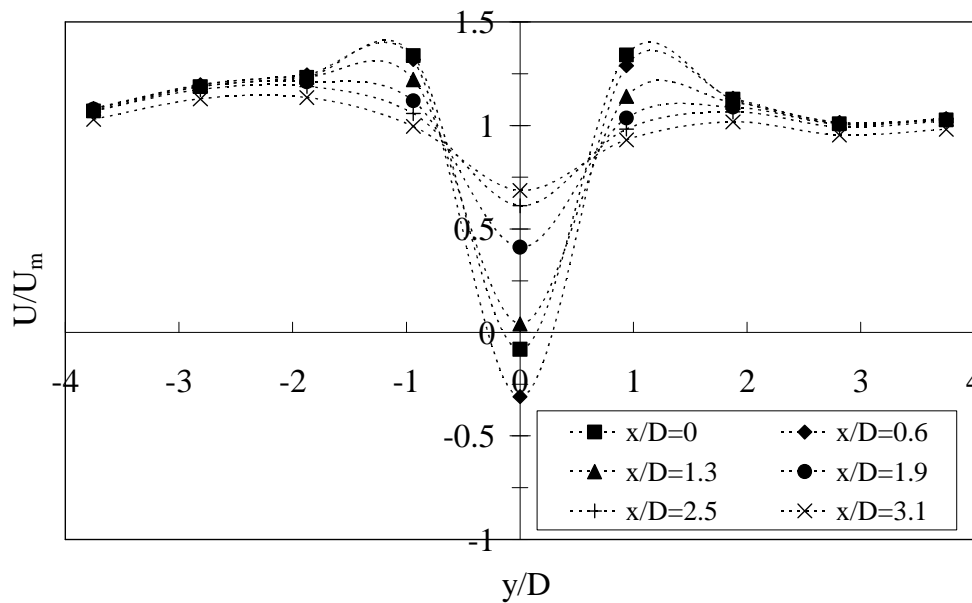


Figura 4.- Perfiles transversales de velocidades medias longitudinales U adimensionalizadas registradas experimentalmente en la zona de mezcla aguas abajo del obstáculo para distintas localizaciones.

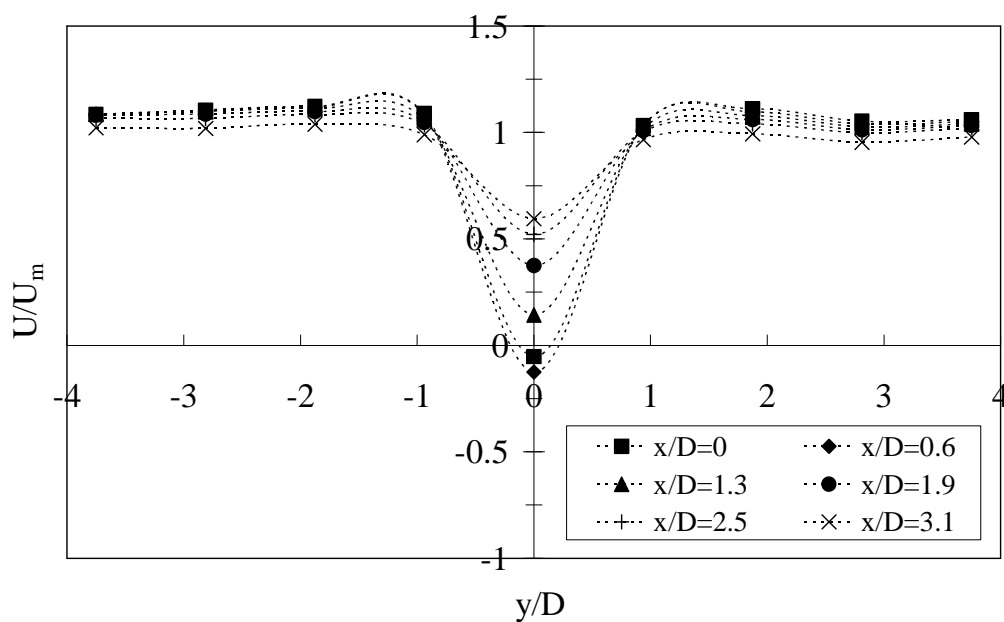


Figura 5.- Perfiles transversales de velocidades medias longitudinales U adimensionalizadas registradas experimentalmente en la zona de mezcla aguas abajo de la confluencia para distintas localizaciones.

En la Figura 6 se incluye el resultado de la visualización de los procesos turbulentos presentes en la interfase de mezcla aguas abajo de la confluencia. Diferentes trazadores (colorantes) fueron inyectados en cada uno de los flujos paralelos aguas arriba de la zona de estancamiento de la confluencia. Se puede observar en la visualización la zona de estancamiento y el proceso de formación y desprendimiento de vórtices aguas abajo de la confluencia.



Figure 6.- Visualización del flujo en la interfase de mezcla aguas abajo de la confluencia de flujos paralelos.

4 MODELACION NUMERICA DEL FLUJO

4.1 Descripción de los modelos numéricos computacionales utilizados.

En este trabajo se ha utilizado un modelo numérico computacional de simulación de las ecuaciones que describen el flujo turbulento para una configuración tridimensional del dominio utilizando un esquema de volúmenes finitos, desarrollado en el código libre y abierto OpenFOAM(R) (Open Field Operation and Manipulation, OpenFOAM Team, 2007). En este trabajo se utilizó específicamente la aplicación “*pisoFoam*” que resuelve las ecuaciones completas de Navier Stokes y Continuidad. La simulación se realizó con un modelo de tipo de Simulación de Grandes Vórtices (LES por sus siglas en inglés) para flujo incompresible en una sola fase en condiciones de densidad y viscosidad constantes.

4.2 Dominio de simulación y malla de volúmenes finitos.

La malla utilizada en las simulaciones se compone de volúmenes de tamaño variable. En ambos casos se ha trabajado con una malla de volúmenes finitos tridimensional realizada utilizando *snappyHexMesh* de OpenFOAM(R). En las Figuras 7 y 8 se muestran vistas de la geometría y un detalle de la discretización del dominio empleado en las simulaciones. La malla está conformada por volúmenes hexaédricos con 5 niveles de discretización del dominio. La cantidad de niveles de mallado se estableció a los fines de concentrar la mayor cantidad de elementos pequeños en la zona de estancamiento y de desprendimiento de vórtices. Se realizaron varias iteraciones iniciando con sólo 3 niveles de la mallado. Inicialmente se utilizó otra configuración de la malla distribuyendo los elementos en dirección radial al obstáculo (trabajando solamente con *blockMesh*) con la que se realizaron las primeras modelaciones en las cuales se logró caracterizar de forma eficiente el flujo medio pero no así las frecuencias de desprendimiento de vórtices en las zonas de interés. Finalmente la opción de trabajar con *snappyHexMesh* y 5 niveles de mallado produjo el resultado óptimo en la caracterización no solo del flujo medio aguas abajo de la pila sino también de la frecuencia de desprendimiento de vórtices. Esta configuración del mallado da como resultado, en planta, elementos de un tamaño mínimo de 2 mm de lado a un máximo de 6.5 cm. Los elementos de menores dimensiones se utilizaron en las áreas de mallado ubicadas aguas abajo del obstáculo y la confluencia. Se trabajó incrementando en forma gradual el tamaño de los elementos en las zonas de menor interés del dominio. En la tercera dimensión en vertical se utilizaron elementos de 4 mm de lado haciendo un total de 64 elementos en la zona de mayor discretización del dominio. Las mallas de volúmenes finitos se conformaron por 7748560

elementos para el flujo en presencia de un obstáculo (pila) y 7538008 para la confluencia.

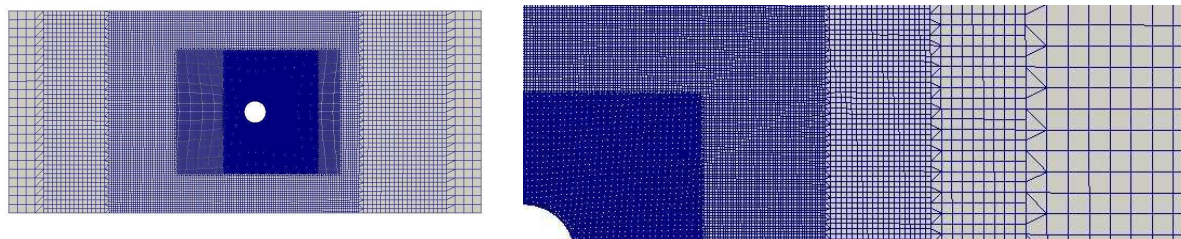


Figura 7.- Vista en planta de la geometría (izq.) y detalle de la malla de volúmenes finitos en la zona de la nariz de la pila(der.).

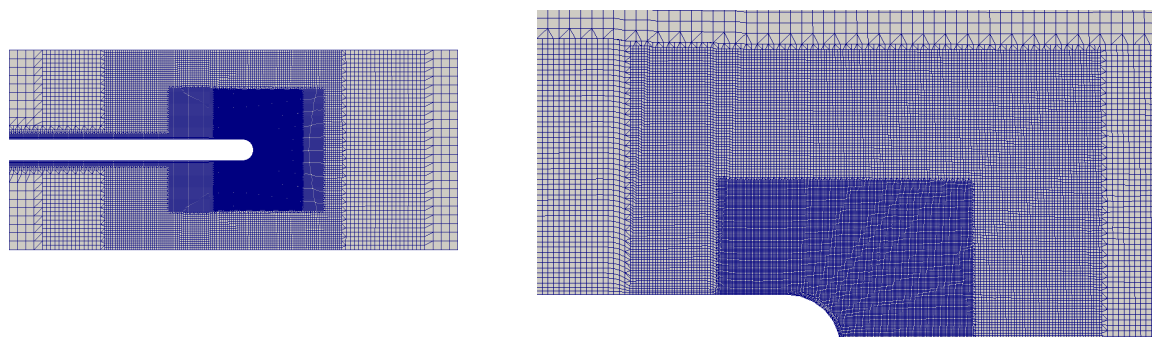


Figura 8.- Vista en planta de la geometría (izq.) y detalle de la malla de volúmenes finitos en la zona de la nariz de la confluencia(der.).

4.3 Condiciones iniciales y de borde

Se utilizó una simulación de tipo LES, el modelo utilizado para incorporar el aporte a las fluctuaciones turbulentas de las escalas de flujo mas pequeñas fue el de Smagorinsky adoptando en este caso los ajustes de Márquez Damián y Nigro (2010).

Para las modelaciones se utilizó la aplicación “PisoFoam” de OpenFOAM(R), se establecieron condiciones iniciales y de borde para las variables: presión y velocidad instantánea que para estos casos se hace igual al valor medio medido en el flujo de aproximación.

Se estableció como valores iniciales iguales a cero las variables en todo el dominio salvo las zonas donde se establecieron condiciones de borde específicas.

Las condiciones de borde se detallan a continuación:

a) Condiciones a la entrada: gradiente de presión nulo y valores de velocidad media medidos experimentalmente;

b) Condiciones a la salida: se calculó la presión estática media para la zona correspondiente a la salida del modelo y se estableció gradiente de velocidades igual a cero;

c) Condiciones en paredes y fondo: gradiente de presión nulo, se estableció que las velocidades sean iguales a cero. Se utilizó la función de pared nutUSpaldingWallFunction de la biblioteca de OpenFOAM(R), con los ajustes de Márquez Damián y Nigro (2010).

d) condiciones en superficie libre: se impuso, basados en que los resultados experimentales no evidencian oscilaciones en la superficie libre, una superficie rígida sin esfuerzos de corte (con deslizamiento) para que no afecte al flujo interno (la condición slip en inglés). De esta manera es posible simplificar el modelo de dos fases (agua-aire) a una fase (agua), al simular

la superficie libre. Esta simplificación permite reducir el esfuerzo computacional necesario y trabajar con un modelo menos complejo respecto a las condiciones de borde, parámetros físicos y ecuaciones a resolver.

El tiempo de simulación utilizado fue de 125 s (iniciando en $t=0$ s) para todas las condiciones con un paso de tiempo Δt de 0.01 s. El paso de cálculo Δt se eligió en función de las frecuencias de los desprendimientos de vórtices observados en los experimentos, y el tiempo total de corrida se definió de manera de visualizar por lo menos 30 de las mayores estructuras turbulentas en el dominio (escala característica de tiempo del orden de 4 segundos). Los valores numéricos de las condiciones de borde se establecieron de acuerdo a los establecidos durante las actividades experimentales (ver sección anterior 3.1).

4.4 Resultados de las Simulaciones Numéricas

La Figura 9 muestra el campo instantáneo de las magnitudes de velocidades de flujo [m/s] para el análisis del caso de flujo alrededor de una pila.

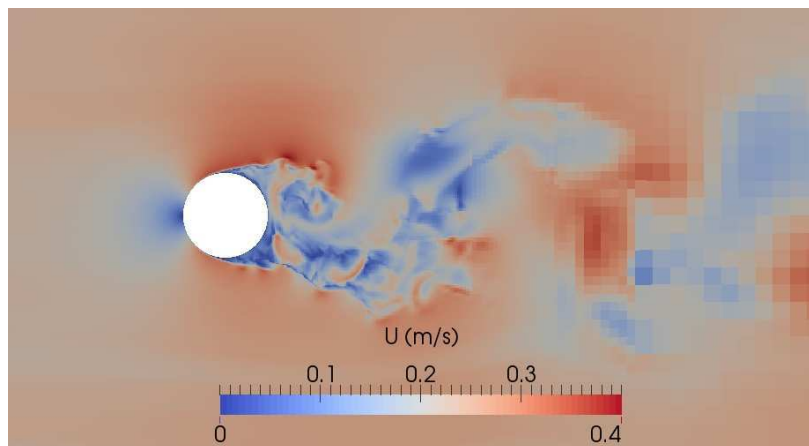


Figura 9.- Campo instantáneo de las magnitudes de velocidades de flujo [m/s] para la pila

Las Figura 10 muestra el campo instantáneo de las magnitudes de velocidades de flujo [m/s] en el caso de flujo aguas debajo de una confluencia.

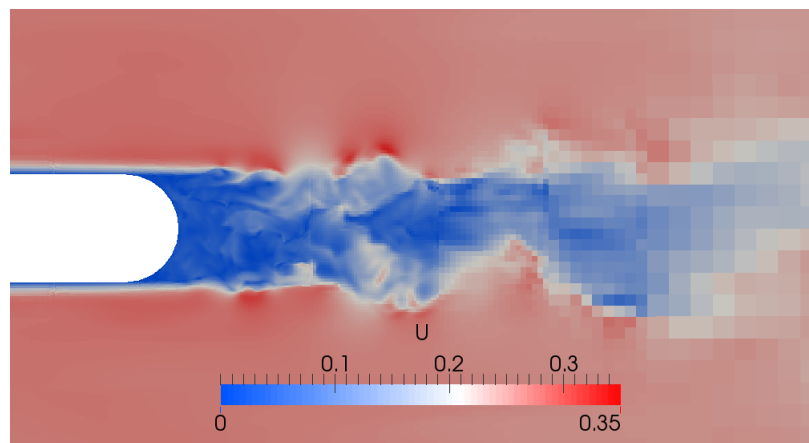


Figura 10.- Campo instantáneo de las magnitudes de velocidades de flujo [m/s] para la confluencia

Estos campos de flujo modelados numéricamente presentan visualmente un muy buen acuerdo con los observados experimentalmente representando las principales características del flujo: zonas de estancamiento; de aceleración del flujo, de generación y de desprendimiento de vórtices.

En la Tabla 1 se muestran los valores de velocidades longitudinales medias U determinados experimentalmente y utilizando simulaciones numéricas para las localizaciones indicadas en la Figura 2. Se incluyen en esta tabla los puntos localizados en la línea central del canal (1, 3, 6, 9) y hacia la margen derecha (2, 5, 8).

Tabla 1.- Velocidades longitudinales medias vmx para pila y confluencia en cada localización indicada en la Figura 3. $Q = 80$ l/s. La incertidumbre (representada por el coeficiente de variación) de los valores medios de velocidad del flujo registrados con ADV están en el orden del 1%. (García et al, 2006).

Pto.	Resultado Experimental PILA	Simulación numérica 3D con LES PILA	Resultado Experimental CONFLUENCIA	Simulación numérica 3D con LES CONFLUENCIA
	U [cm/s]	U [cm/s]	U [cm/s]	U [cm/s]
1	-5.74	-4.19	-2.91	-2.59
2	23.56	23.23	22.50	23.00
3	-1.05	8.50	2.48	1.67
5	18.83	20.86	22.26	21.81
6	14.39	13.06	13.53	13.95
8	19.09	20.88	21.97	21.50
9	16.50	14.34	16.98	16.78

Las velocidades medias longitudinales modeladas muestran una buena aproximación respecto a los datos experimentales tanto en el caso de la pila como en el de la confluencia de flujos paralelos. La discrepancia de signo opuesto que se observa entre el valor numérico y el experimental en el punto 3 de la pila se debe a que esa localización se encuentra en una zona de marcado gradiente de velocidad debido a que se encuentra en el límite aguas abajo de la zona de estancamiento. Aun cuando la longitud de la zona de estancamiento se ha logrado representar correctamente, los valores de velocidad observados en esa zona son muy sensibles a pequeñas variación de la longitud de esa zona .

En las Figuras 11 a 12 se presentan los perfiles de velocidad media longitudinal (U) adimensionalizados respecto a la velocidad de aproximación (U_m) obtenidos experimentalmente y a través de las simulaciones numéricas. La línea punteada en las Figuras 9 a 11 representa la proyección de la posición de la nariz de la confluencia. En las Figuras se han contrastado los resultados numéricos (representados en línea de trazos) con los relevados experimentalmente con UVP (representados con símbolos).

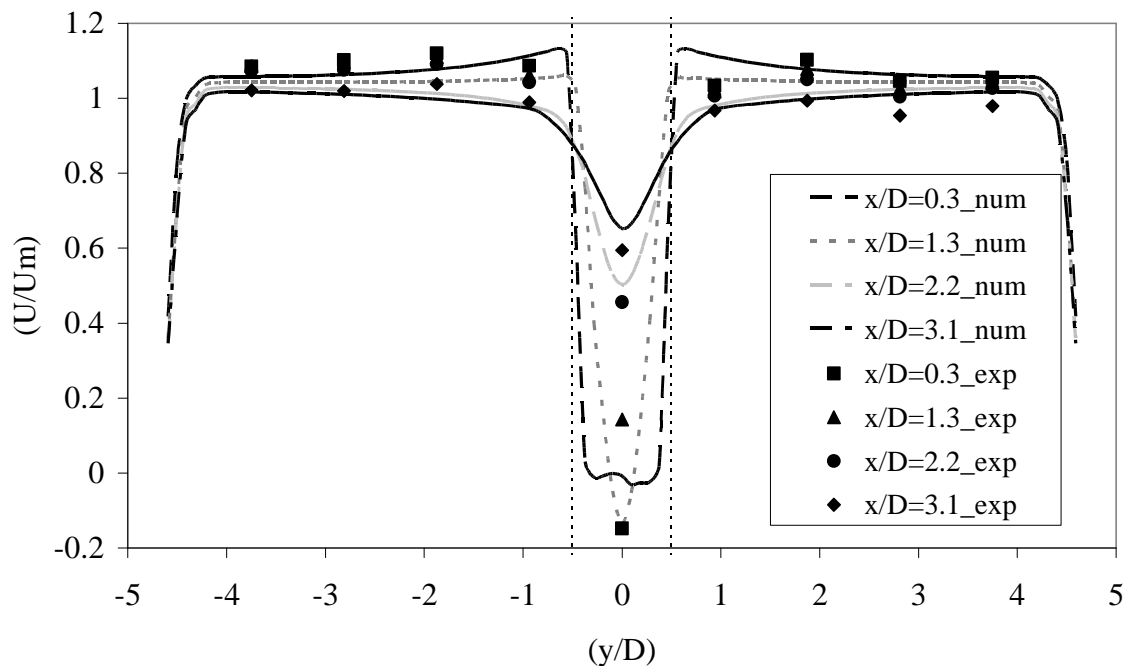


Figura 11.- Perfiles de velocidad media longitudinal del flujo adimensionalizados. Caso: PILA. Los resultados numéricos se representan en línea continua y los experimentales con símbolo. Diámetro del extremo de la pila= 0.16 m. Caudal $Q = 80$ l/s;

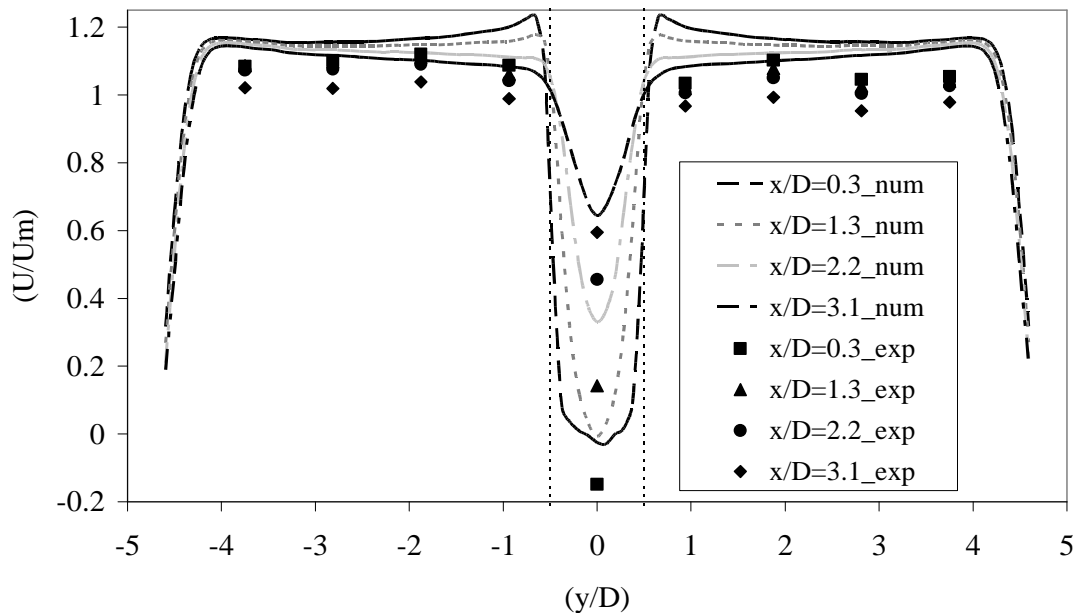


Figura 12.- Perfiles de velocidad media longitudinal del flujo adimensionalizados. Caso: CONFLUENCIA. Los resultados numéricos se representan en línea continua y los experimentales con símbolo. Diámetro del extremo de la confluencia = 0.16 m. Caudales de tributarios, $Q_1 = 40$ l/s; $Q_2 = 40$ l/s.

Se observa una buena caracterización del flujo en la zona de estancamiento tanto para la pila como para la confluencia, en el caso de la confluencia los resultados numéricos poseen una mayor dispersión respecto a los experimentales, en comparación con los resultados de la pila.

4.5 Análisis espectral

El análisis de resultados del modelado de la pila se ha completado con el estudio de la evolución temporal de las fluctuaciones del flujo. Para ello se realizó un análisis espectral de la series temporales de velocidad de flujo (longitudinal – x y transversal - y) medidas y simuladas para diversos puntos del dominio (ver Figura 3). En base a este análisis se determinó la frecuencia característica de las fluctuaciones del flujo (frecuencia en la cual se encuentra el valor máximo del espectro de energía), (Garcia et al, 2005). En la Tabla 3 se muestran los resultados de análisis de frecuencias. Además en esa tabla se presenta el cálculo del número de Strouhal (St), el cual está relacionado a la frecuencia de desprendimiento de vórtices. La expresión del número de Strouhal es la siguiente:

$$St = f \frac{D}{U_m} \quad (1)$$

Donde f es la frecuencia de desprendimiento de vórtices, D el diámetro del obstáculo y U_m , la velocidad media del flujo de aproximación.

Los resultados previos de Schewe (1983) mostraron que el número de Strouhal del flujo alrededor de un cuerpo sumergido (pila cilíndrica) aumenta como el número de Reynolds del obstáculo (Re_D) aumenta, alcanzando un valor aproximadamente constante de $S \approx 0.2$ por Re_D entre 300 y 3×10^5 . Las condiciones de flujo evaluadas aquí tienen $Re_D \approx 3 \times 10^4$, en el rango donde se esperan valores constantes del número de Strouhal.

En las Tablas 2 y 3 se muestran los valores del número de Strouhal obtenidos del análisis de las series provenientes de los estudios experimentales (Herrero, 2014 y Herrero et al, 2016) y numéricos del flujo aguas abajo de la pila. Para la componente longitudinal solo se detalla las frecuencias en las localizaciones que fue posible observar una frecuencia característica de las fluctuaciones. Los resultados reportados muestran un buen acuerdo entre los resultados experimentales y numéricos.

Tabla 2.- Máxima energía en el espectro de las fluctuaciones ($Max G_{xx}$), frecuencias características de las fluctuaciones del flujo (f) y Número de Strouhal (St) en cada localización para las componentes longitudinal (x) de la velocidad del flujo. Resultados experimentales y numéricos. Flujo aguas abajo de la pila. $Q = 80$ l/s.

Pto.	Resultado experimental			Resultado Numérico		
	$Max G_{xx}$	f	St	$Max G_{xx}$	f	St
1						
2	670.46	0.27	0.21	1337.19	0.28	0.28
3						
5	1019.24	0.26	0.20	1659.72	0.28	0.22
6						
8	729.02	0.27	0.21	1376.78	0.28	0.22
9						

Tabla 3.- Máxima energía en el espectro de las fluctuaciones ($Max G_{yy}$), frecuencias características de las fluctuaciones del flujo (f) y Número de Strouhal (St) para las componentes transversales (y) de la velocidad del flujo. Resultados experimentales y numéricos. Flujo aguas abajo de la pila. $Q = 80$ l/s.

<i>Pto.</i>	<i>Resultado Experimental</i>			<i>Resultado Numérico</i>		
	<i>Max G_{yy}</i>	<i>f</i>	<i>St</i>	<i>Max G_{yy}</i>	<i>f</i>	<i>St</i>
1	3172.65	0.28	0.22	6260.56	0.28	0.22
2	623.91	0.27	0.21	1151.57	0.28	0.22
3	13006.10	0.27	0.21	11561.68	0.28	0.22
5	1746.55	0.26	0.20	1652.10	0.28	0.22
6	8137.90	0.27	0.21	7332.22	0.28	0.22
8	1645.46	0.27	0.21	1477.41	0.28	0.22
9	6216.74	0.27	0.21	5273.33	0.28	0.22

5 CONCLUSIONES

El modelo numérico computacional implementado para simular (con las mismas condiciones hidráulicas) dos diferentes configuraciones de flujos (flujo en presencia de un obstáculo y confluencia de flujos paralelos) reproduce los principales procesos físicos observados durante los experimentos, logrando representar adecuadamente las zonas de estancamiento, de aceleración del flujo, y la formación y desprendimiento de vórtices. A pesar de que la simulación numérica proporciona la información necesaria, en este trabajo no se evalúa la fuerza de arrastre sobre la pila.

Del contraste entre las caracterizaciones de las dos condiciones de flujo analizadas, se deduce que los campos medios observados para la configuración de flujo en presencia de un obstáculo presentan valores similares (diferencia de menos de 5%) a los observados para la configuración de confluencia de flujos paralelos en distancias mayores de 2 diámetros aguas abajo del obstáculo.

En ambas configuraciones se representa la zona de estancamiento con una longitud similar a la observada experimentalmente. Del contraste entre las simulaciones realizadas, se deduce que los campos medios observados aguas debajo de la pila representan de forma adecuada el campo del flujo medio. La simulación del proceso de generación y desprendimiento de vórtices en la región aguas abajo es similar al observado experimentalmente.

El análisis espectral de las series de tiempo para el flujo aguas debajo de la pila presenta frecuencias características de las fluctuaciones (desprendimientos de vórtices) muy similares a las observadas experimentalmente. Los valores del número de Strouhal calculados en la zona de mezcla para las componentes longitudinal y transversal de la velocidad en diferentes localizaciones son similares a los resultados experimentales.

REFERENCIAS

- Chang, W. Y., G. Constantinescu, W. F. Tsai, and H. C. Lien (2011), Coherent structure dynamics and sediment erosion mechanisms around an in-stream rectangular cylinder at low and moderate angles of attack. *Water Resour. Res.*, 47. W12532.
- Constantinescu, G., S. Miyawaki, B. Rhoads, A. Sukhodolov, and G. Kirkil (2011). Structure of turbulent flow at a river confluence with momentum and velocity ratios close to 1: Insight provided by an eddy resolving numerical simulation, *Water Resour. Res.*, 47,

W05507.

- García C., Cantero, M. I.; Niño, Y. y García M. (2005). Turbulence measurements with acoustic Doppler velocimeters”. *Journal of Hydraulics Engineering*, 131 (12), 1062-1073.
- García C., Jackson P., y García M. (2006). Confidence intervals in the determination of turbulence parameters. *Experiment in Fluids*. 40: 514 – 522.
- Herrero, H. (2014). Evolución espacial y temporal de la hidrodinámica en confluencias fluviales. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba. Marzo de 2014. 119 págs.
- Herrero, H. S., García, C. M., Pedocchi, F., López, G., Szupiany, R. N., y Pozzi Piacenza, C. E. (2016). Flow structure at a confluence: experimental data and the bluff body analogy. *Journal of Hydraulic Research*, 54(3), 263-274.
- Kai Fan, L. (2005). Simulation of Flow around Bluff Bodies and Bridge Deck Sections using CFD. Tesis Doctoral. Universidad de Nottingham, Inglaterra. 251pp.
- Márquez Damián, S y Nigro, N. (2010). Comparison of single phase laminar and large eddy simulation (LES) solvers using the OpenFoam suite. *Mecánica Computacional Vol XXIX*, págs 3721-3740.
- OpenFOAM(R) Team (2007): “User Guide OpenFOAM(R), Foundation. <http://www.opencfd.co.uk/openfoam/>
- Pozzi Piacenza, C.; Marquez Damian, S.; Herrero, H.; Ragessi, I.M. Furlan P. y Garcia, C. M. (2014). “Evaluación de simulaciones numéricas bi y tridimensionales del flujo en una confluencia fluvial”. *Mecánica Computacional Vol XXXIII*, págs. 323-336. ISSN 1666-6070.
- Rhoads, B. L. y Sukhodolov, A. N. (2008). Lateral momentum flux and the spatial evolution of flow within a confluence mixing interface, *Water Resour. Res.* 44 , W08440.
- Schewe, G. (1983). “On the force fluctuations acting on a circular cylinder in cross-flow from subcritical up to transcritical Reynolds numbers”. *Journal of Fluid Mechanics*, 133:265-285.