

## EVALUACIÓN DE SIMULACIONES NUMERICAS BI Y TRIDIMENSIONALES DEL FLUJO EN UNA CONFLUENCIA FLUVIAL

**Cecilia Pozzi Piacenza<sup>a</sup>, Santiago Márquez Damian<sup>b</sup>, Horacio Herrero<sup>a,c</sup>, I. Matías Ragessi<sup>a,c</sup>, Paloma Furlan<sup>a</sup> y Carlos Marcelo García<sup>a,c</sup>**

<sup>a</sup> *Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA). Laboratorio de Hidráulica. Fac. de Cs. Exactas, Físicas y Naturales de la Univ. Nacional de Córdoba, Argentina. cpozzi@efn.uncor.edu*

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

<sup>c</sup> *Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas - CONICET.*

**Palabras clave:** Recursos Hídricos, confluencias fluviales, métodos numéricos y experimentales.

**Resumen.** Las confluencias son ambientes complejos presentes en los sistemas fluviales debido a que la convergencia de dos o más flujos produce complejos patrones hidrodinámicos. 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 presenta la evaluación numérica del comportamiento hidrodinámico de una confluencia de dos flujos paralelos. Para ello se han utilizado, en el código libre y abierto OpenFOAM(R) (Open Field Operation and Manipulation), modelos numéricos en dos y tres dimensiones para representar flujos turbulentos a los fines de evaluar las bondades y limitaciones de cada uno de ellos. Estos modelos fueron validados 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 incluida en este trabajo se compararon los campos medios de velocidades observados en la instalación experimental y en las simulaciones numéricas. Los modelos numéricos computacionales utilizados para simular la confluencia de flujos paralelos reproducen cualitativamente los principales procesos físicos observados durante los experimentos, logrando representar las zonas de estancamiento, de aceleración del flujo, y la formación y desprendimiento de vórtices. Trabajos futuros prevén la aplicación del modelo numérico finalmente seleccionado para representar el flujo para distintos rangos de condiciones geométricas (diámetro de la nariz de la confluencia y ángulo de aproximación) y de flujo (relación 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. Sin embargo es necesario extender el estudio a diferentes condiciones geométricas y del flujo, de forma tal de evaluar los alcances de esta similitud (Chang et al, 2011). A los fines de extender el estudio es que se realizó en primera instancia un modelo numérico bidimensional (Pozzi et al. 2013) cuya validación a través de datos experimentales arrojó un buen acuerdo en el campo del flujo medio y una buena representación del proceso de generación y desprendimiento de vórtices en la región aguas debajo de la confluencia. Sin embargo se observó la existencia de una zona de estancamiento de menor extensión en el modelo numérico respecto al experimental debido a la existencia de procesos tridimensionales incompatibles con el modelado bidimensional.

## 2 OBJETIVO

En este trabajo se presentan simulaciones numéricas bi y tridimensionales del comportamiento hidrodinámico de una confluencia de dos flujos paralelos utilizando dos modelos alternativos de simulación de las ecuaciones que describen este comportamiento. La validación de las distintas simulaciones se realiza a través del contraste con datos experimentales.

## 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). Como se observa en la Figura 1, para representar la configuración de flujo a ensayar se utilizó una tubería cilíndrica de policloruro de vinilo (PVC por sus siglas en inglés) de diámetro  $D = 16$  cm, a la cual se le adosó un tabique divisor centrado respecto al tubo cilíndrico. De esta forma se dividió el canal generando una confluencia de flujos paralelos.



Figura 1.- Vista frontal (izq.) y en planta (der.) de la instalación experimental.

### 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) con una distribución del flujo de 50% del caudal fluyendo por cada tributario. Para esta condición, el flujo de aproximación puede describirse con los siguientes parámetros hidráulicos: Velocidades de aproximación ( $U_m$ ) 0.23 m/s; Números de Reynolds ( $Re = U_m H / \nu$ ) donde  $\nu$  es la viscosidad cinemática del agua) igual a 59701, Número de Reynolds del obstáculo ( $Re_D = U_m D$ ) igual a 36800, y Froude ( $Fr = U_m / (g \cdot H)^{0.5}$ ) de 0.14, en condiciones de régimen subcrítico. 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 modernas técnicas de medición. Con un Perfilador de Velocidad por Ultrasonido (UVP por sus siglas en inglés) se midieron: a) Perfiles verticales medios de velocidades longitudinales y verticales en los flujos de aproximación; y b) series temporales de velocidad longitudinal del flujo en perfiles longitudinales localizados a mitad de la profundidad del flujo distribuidos en todo el ancho del canal (con una separación entre ellos de 0.15 m definida arbitrariamente), en un área ubicada hasta 50 cm aguas abajo del obstáculo.

También se utilizó un Velocímetro Acústico Doppler (ADV por sus siglas en inglés) para medir 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 (Figura 2).

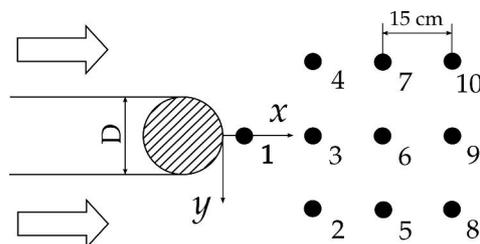
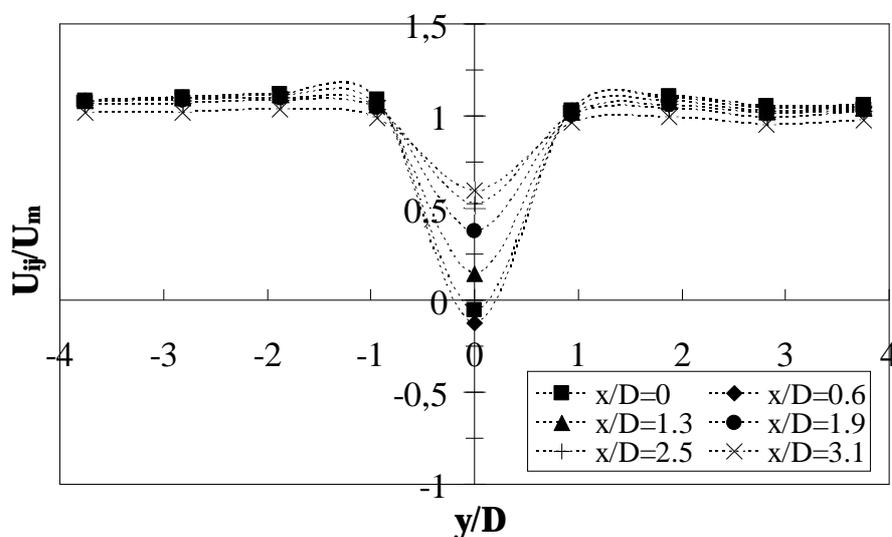


Figura 2.- Ubicación de los puntos de medición con velocímetros acústicos Doppler.

### 3.2 Resultados experimentales.

En la Figura 3 se muestran en la región aguas abajo de 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, García et al (2006) mostraron que el coeficiente de variación de los valores medios de velocidad del flujo registrados con ADV están en el orden del 1%. En la Figura 3, las progresivas transversales ( $y$ ) fueron adimensionalizadas con la longitud característica correspondiente al diámetro de la confluencia ( $D$ ).

Figura 3.- Perfiles transversales de velocidades medias longitudinales  $U$  adimensionalizadas registradas experimentalmente en la zona de mezcla aguas abajo de la confluencia para distintas localizaciones  $i,j$ .

En la Figura 4 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 4.- 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 han utilizado dos modelos numéricos computacionales alternativos de simulación de las ecuaciones que describen el flujo turbulento utilizando un esquema de volúmenes finitos, ambos desarrollados en el código libre y abierto OpenFOAM(R) (Open Field Operation and Manipulation, OpenFOAM Team, 2007).

Se utilizó la aplicación “pisoFoam” que resuelve la ecuaciones completas de Navier Stokes y Continuidad para flujo incompresible a una sola fase en condiciones de densidad y viscosidad constantes.

Este modelo se ha utilizado para distintas configuraciones del dominio: a) configuración 1: bidimensional, y b) configuración 2 y 3: tridimensional. La configuración 1 corresponde a un modelo bidimensional a una sola fase en condiciones de densidad y viscosidad constantes, en la configuración 2 se liberó la tercera dimensión utilizando el mismo esquema de cálculo, finalmente la configuración 3 corresponde a la de un modelo de tipo LES para flujo incompresible en una sola fase en condiciones de densidad y viscosidad constantes.

En la Tabla 1 se presenta un resumen de las configuraciones utilizadas.

Tabla 1.- Configuraciones modeladas.

<i>Configuración del modelo numérico</i>	<i>Dominio</i>	<i>Ecuaciones simuladas numéricamente</i>
Configuración 1	2D	Navies Stokes + continuidad (ecuaciones completas sin modelo de cierre)
Configuración 2	3D	Navies Stokes + continuidad (ecuaciones completas sin modelo de cierre)
Configuración 3	3D	Navies Stokes + continuidad (cierre turbulento LES)

### 4.2 Dominio de simulación y malla de volúmenes finitos.

La malla utilizada en las simulaciones se compone de volúmenes de tamaño variable. En todos los casos se ha trabajado con la misma malla de volúmenes finitos de base, incorporando para las configuraciones 2 y 3 la discretización en la tercera dimensión. En la Figura 5 se muestra una vista de la geometría de la confluencia y un detalle de la discretización del dominio empleado en las simulaciones. La malla está conformada por hexaedros. Se han utilizado, en planta, elementos de un tamaño mínimo de 2 mm de lado a un máximo de 2 cm. Los elementos de menores dimensiones se utilizaron en las áreas de mallado ubicadas aguas abajo de la confluencia. Se trabajó incrementando en forma gradual el tamaño de los elementos en las zonas de menor interés del dominio.

Para las simulaciones tridimensionales (configuraciones 2 y 3) se utilizó de base la malla bidimensional (en planta), se extendió la tercera dimensión en vertical con 52 elementos que aumentan su tamaño desde la zona inferior del canal hacia la superficie libre, de 3 mm a 6 mm cubriendo 0.26 m. Las mallas de volúmenes finitos se conformaron por 308920 elementos

para el caso bidimensional y 5619040 elementos para el caso tridimensional.

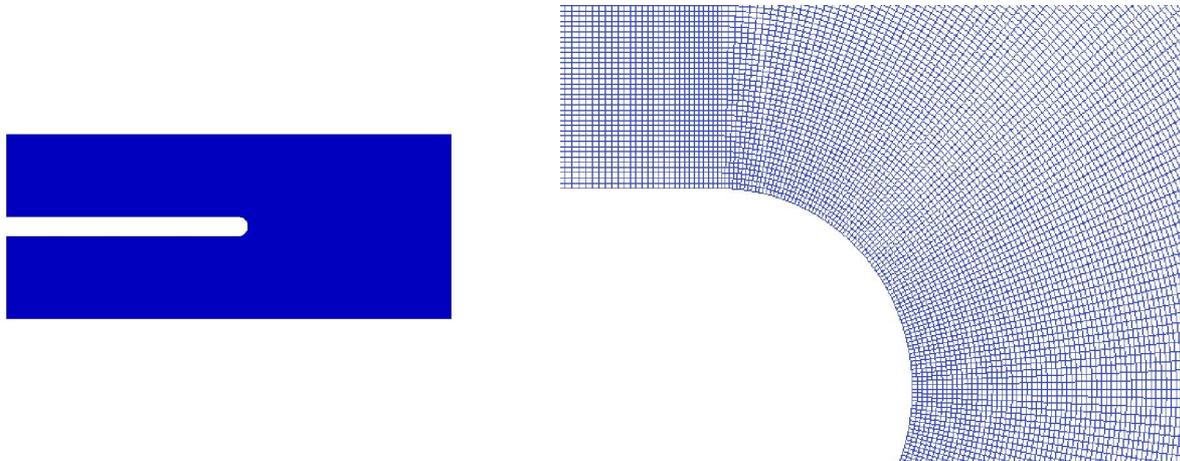


Figura 5.- Vista en planta de la geometría (izq.) y detalle de la malla de volúmenes finitos en la zona de la nariz de la confluencia (der.).

### 4.3 Condiciones iniciales y de borde

Para las configuraciones 1 y 2 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;
- d) condiciones en superficie libre: Para la configuración 1 (2D) se modeló con un esquema bidimensional por lo que se impuso como vacía (“empty”) la tercera dimensión en las condiciones de borde, debido a que en las mediciones experimentales se observaron velocidades muy pequeñas en la dirección vertical (componente  $z$ ) en relación a las registradas para las componentes  $x$  e  $y$  (longitudinal y transversal).

Para la configuración 2 (3D) se impuso, sobre la base de observaciones experimentales, 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. La configuración 2 permitió evaluar cambios en la zona de estancamiento.

El tiempo de simulación utilizado fue de 250 s (iniciando en  $t=0$  s) para todas las condiciones con un paso de tiempo  $\Delta t$  de 0.005 s. El paso de cálculo  $\Delta t$  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).

Para la configuración 3 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 condiciones iniciales se partió del campo obtenido en la configuración 2. Las condiciones de borde se detallan a continuación:

- a) Condiciones a la entrada: gradiente de presión nulo y campo de velocidad media con una fluctuación turbulenta sobre la base de los datos experimentales;
- 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).
- c) condiciones en superficie libre: gradiente de presión nulo, se impuso una superficie rígida sin esfuerzos de corte (con deslizamiento) para que no afecte al flujo interno (la condición `slip` en inglés), basados en que los resultados experimentales no evidencian oscilaciones en la superficie libre.

Utilizando como punto de partida el flujo desarrollado en la configuración 2, se simuló un periodo de 150 s con un paso de tiempo  $\Delta t$  de 0.005 s, siguiendo las mismas consideraciones en cuanto al tiempo de simulación definido para las dos configuraciones anteriores.

#### 4.4 Resultados de las Simulaciones Numéricas

Las Figuras 6 a 8 muestran tres campos instantáneos de las magnitudes de velocidades de flujo [m/s] en la confluencia para las tres configuraciones modeladas. Estos campos de flujo simulados numéricamente presentan visualmente un 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.

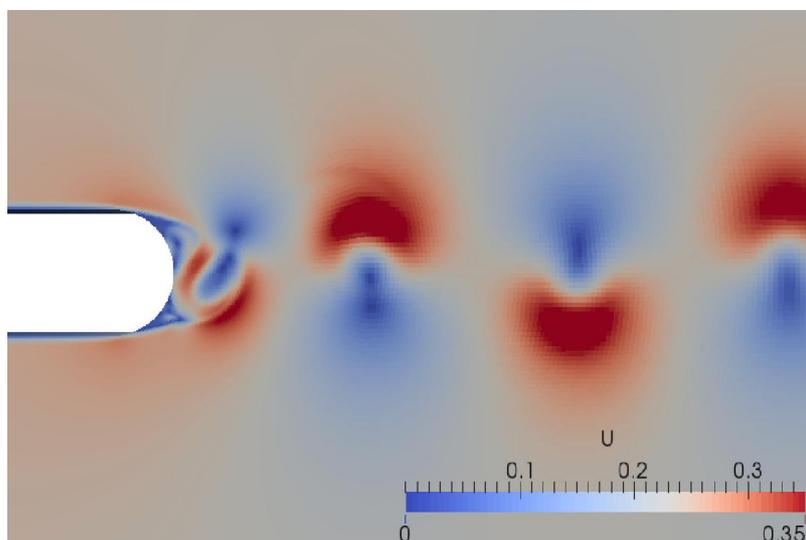


Figura 6.- Campo instantáneo de las magnitudes de velocidades de flujo [m/s] para la configuración 1 (2D),

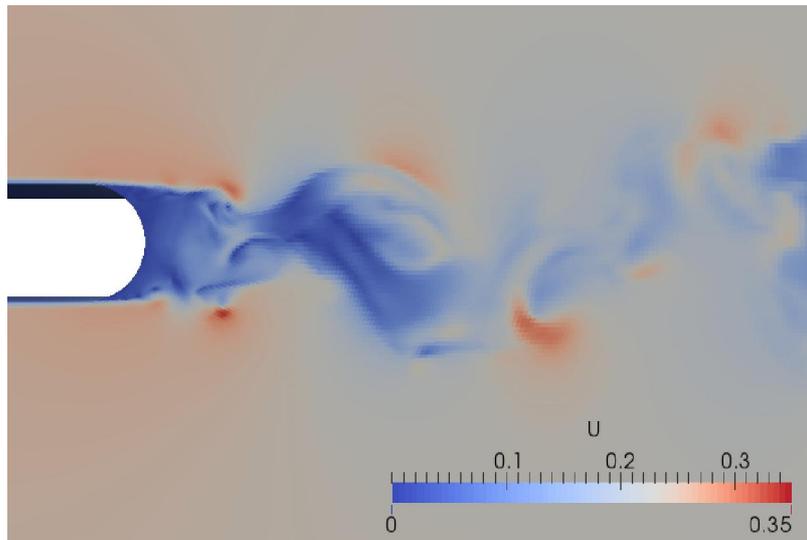


Figura 7.- Campo instantáneo de las magnitudes de velocidades de flujo [m/s] para la configuración 2 (3D).

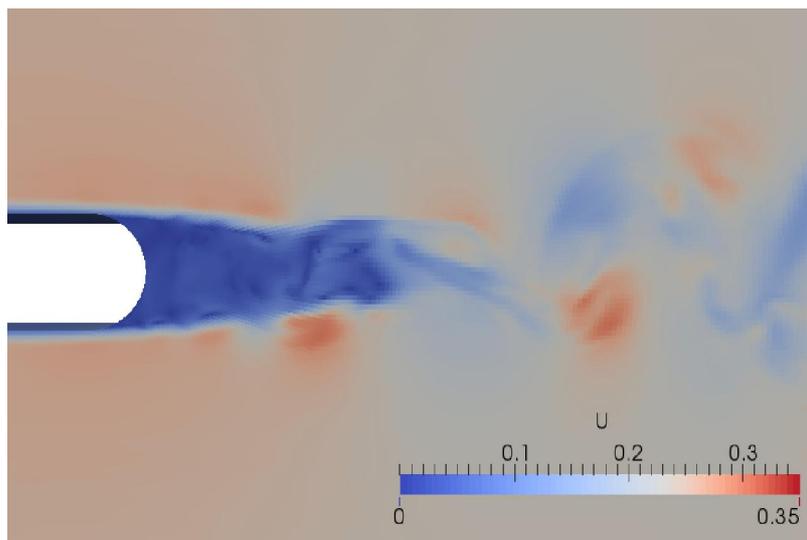


Figura 8.- Campo instantáneo de las magnitudes de velocidades de flujo [m/s] para la configuración 3 (3D\_LES).

Como se observa en las Figuras 7 y 8, las simulaciones 3D representan de mejor manera el desarrollo de la zona de estancamiento respecto al modelo 2D, y una mejor aproximación a la visualización experimental, (ver Figura 4). La Figura 6 muestra una sobreestimación de la intensidad de las fluctuaciones de velocidad generadas por los desprendimientos de estructuras coherentes, comparado con las observaciones experimentales. Así, cualitativamente se ha obtenido una importante mejora en la caracterización del flujo medio específicamente en la zona de estancamiento.

En la Tabla 2 se muestran los valores de velocidades longitudinales medias  $U$  determinados experimentalmente y utilizando simulaciones numéricas para las localizaciones indicadas en la Figura 2. Sólo 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 2.- Velocidades longitudinales medias  $\bar{u}$  en cada localización indicada en la Figura 3.  $Q = 80$  l/s. El coeficiente de variación de los valores de velocidad del flujo registrados con ADV están en el orden del 1%. (García et al, 2006).

<i>Pto.</i>	<i>Resultado experimental</i>	<i>Configuración 1 Simulación numérica 2D</i>	<i>Configuración 2 Simulación numérica 3D</i>	<i>Configuración 3 Simulación numérica 3D con LES</i>
	<i>U[cm/s]</i>	<i>U[cm/s]</i>	<i>U[cm/s]</i>	<i>U[cm/s]</i>
1	-2.91	4.58	-2,59	-0.5
2	22.50	20.86	23.00	24.1
3	2.5	10.53	1.67	-3.2
5	22.3	20.23	21.81	22.6
6	13.5	10.31	13.95	13.0
8	21.97	20.23	21.50	22.3
9	16.98	10.31	16.78	15.7

Las velocidades medias longitudinales simuladas muestran una buena aproximación respecto a los datos experimentales, aunque para la zona de estancamiento se observa una mayor diferencia en los puntos 1 y 3 en el caso de la simulación bidimensional, debido a que la zona de estancamiento simulada numéricamente es de menor longitud mientras que en los puntos 8 y 9 (ubicados a 0.50 cm del obstáculo y en la calle de vórtices) se obtiene una mejor aproximación. Al pasar a simulaciones tridimensionales, con y sin cierre turbulento se puede apreciar una mejora importante en la simulación de los valores de las velocidades longitudinales, principalmente utilizando la configuración 2.

En las Figuras 9 a 11 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). Utilizando el modelo numérico con la configuración 1 (Figura 9) se observa una buena aproximación del flujo en casi todo el dominio de simulación, como por ejemplo en la zona correspondiente a la calle de vórtices. Se observan algunas discrepancias en la zona de estancamiento de menor extensión en el modelo numérico respecto al experimental debido a la existencia de procesos tridimensionales incompatibles con el modelado bidimensional. Para el caso de la configuración 2 (Figura 10) se observa una mejora substancial en la caracterización del flujo en la zona de estancamiento ya que hay un mejor acuerdo en los valores del perfil correspondiente a la localización  $x/D=0.3$ . En el caso correspondiente a la configuración 3 se observa una mejora en la caracterización del flujo en la zona de estancamiento en comparación con el modelo bidimensional (configuración 1), presentándose unas pequeñas diferencias en la localización cercana a la nariz de la confluencia (correspondiente a la zona de estancamiento). Estas deficiencias pueden deberse a la necesidad de realizar ajustes en las funciones de pared elegidas, evidenciándose la necesidad de realizar un análisis de sensibilidad para este caso.

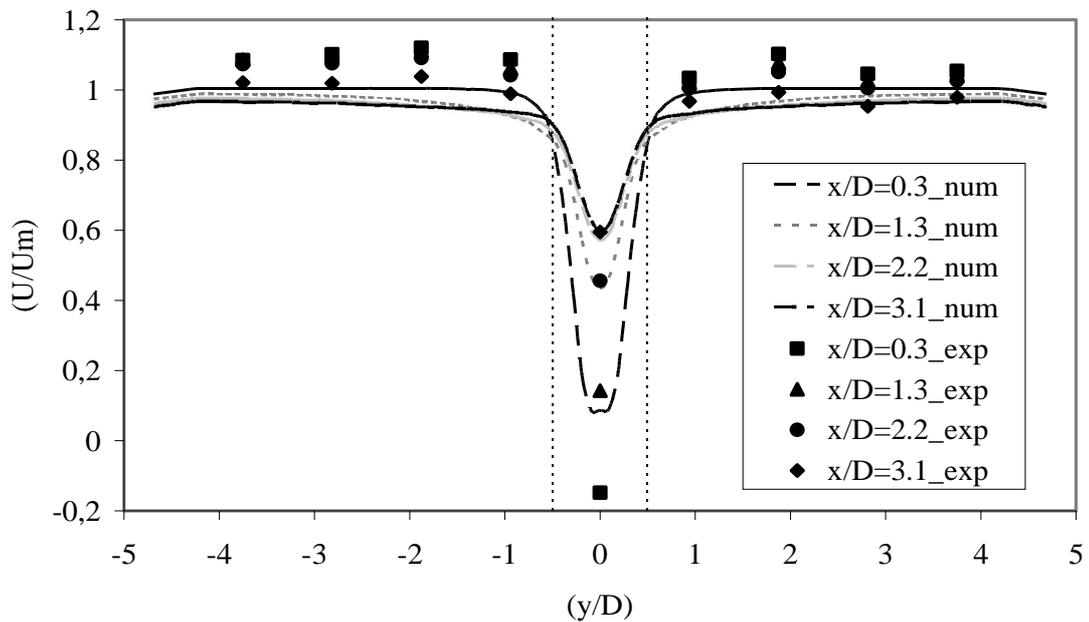


Figura 9.- Perfiles de velocidad media longitudinal del flujo adimensionalizados. Configuración 1. Los resultados numéricos se representan en línea continua y los experimentales con símbolo. Diámetro del extremo de la confluencia = 0.16 m. Caudales de tributarios,  $Q_1 = 40$  l/s;  $Q_2=40$  l/s.

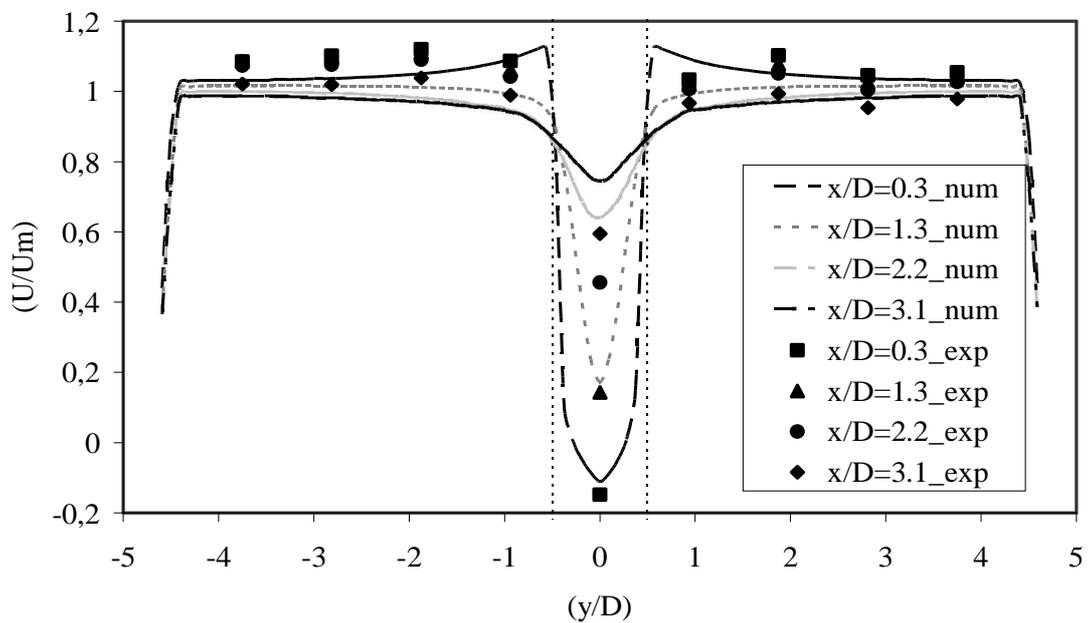


Figura 10.- Perfiles de velocidad media longitudinal del flujo adimensionalizados. Configuración 2. Los resultados numéricos se representan en línea continua y los experimentales con símbolo. Diámetro del extremo de la confluencia = 0.16 m. Caudales de tributarios,  $Q_1 = 40$  l/s;  $Q_2=40$  l/s.

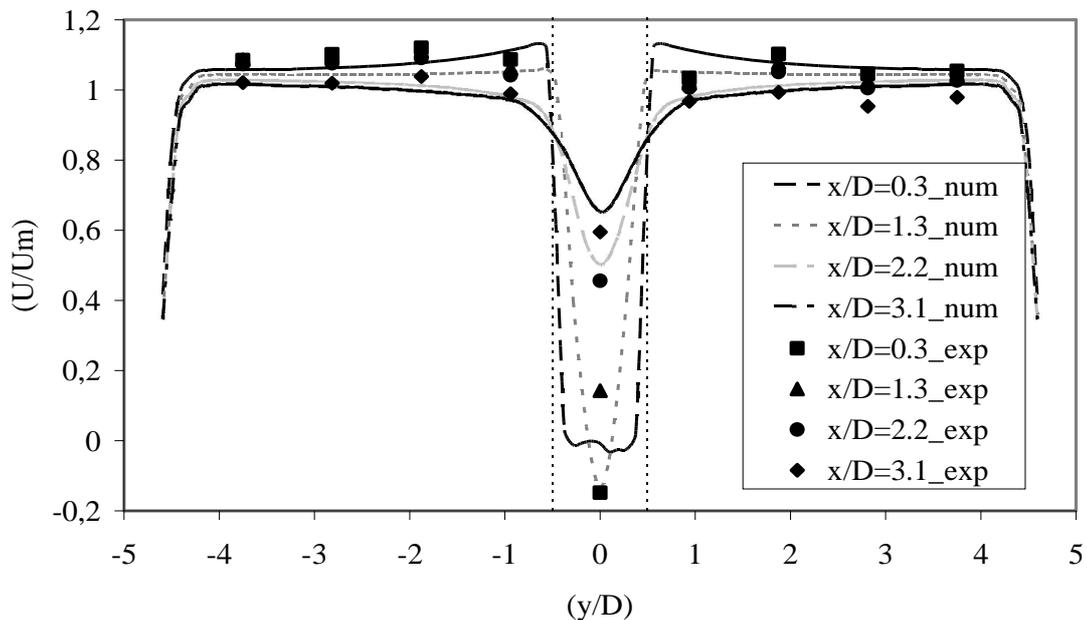


Figura 11.- Perfiles de velocidad media longitudinal del flujo adimensionalizados. Configuración 3. Los resultados numéricos se representan en línea continua y los experimentales con símbolo. Diámetro del extremo de la confluencia = 0.16 m. Caudales de tributarios,  $Q_1 = 40$  l/s;  $Q_2 = 40$  l/s.

En las Figuras 12 a 14 se presentan los gráficos de los residuos. Los valores presentados corresponden a residuos adimensionales y se calcularon como la diferencia entre los valores simulados numéricamente y los valores observados experimentalmente. Como se observa en las figuras, se obtienen sobre-estimaciones en los resultados en la zona de estancamiento y sub-estimaciones, menores al 10%, en la zona de mezcla verificándose el principio de continuidad. En general las máximas diferencias se observan en la zona de estancamiento (ver Figuras 9 a 11).

Además los residuos obtenidos no son valores aleatorios sino que al observar las figuras existen zonas que se modelaron numéricamente mejor que otras, así como se observa también una notoria disminución en los valores de los residuos para la Configuración 3

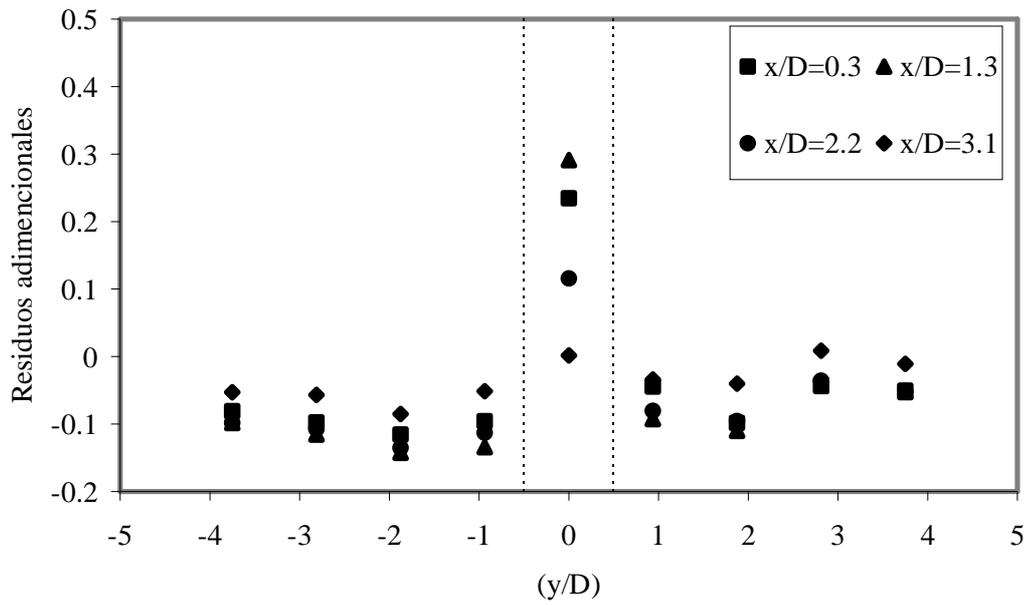


Figura 12.- Residuos adimensionales (valores simulados – valores observados). Configuración 1. Diámetro del extremo de la confluencia = 0.16 m. Caudales de tributarios,  $Q_1 = 40$  l/s;  $Q_2=40$  l/s.

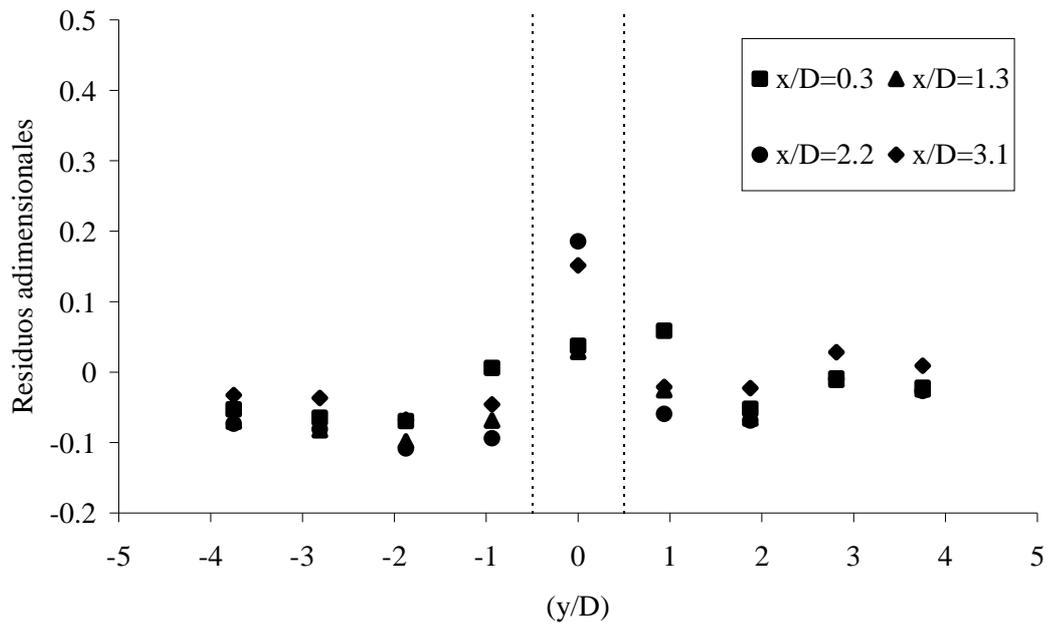


Figura 13.- Residuos adimensionales (valores simulados – valores observados). Configuración 2. Diámetro del extremo de la confluencia = 0.16 m. Caudales de tributarios,  $Q_1 = 40$  l/s;  $Q_2=40$  l/s.

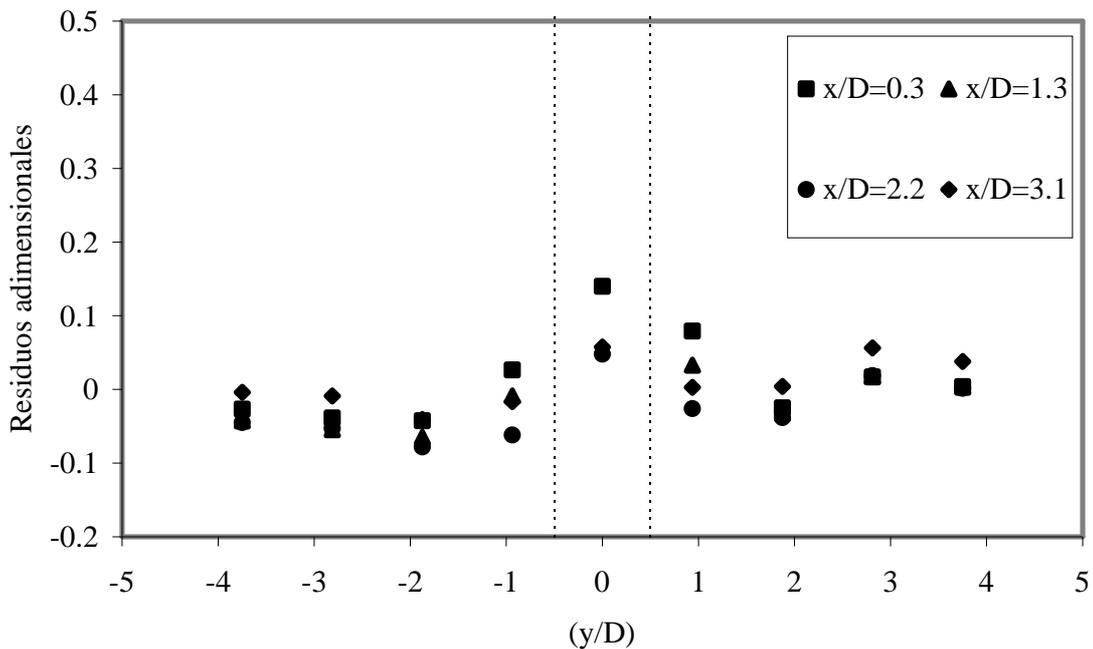


Figura 14.- Residuos adimensionales (valores simulados – valores observados). Configuración 3. Diámetro del extremo de la confluencia = 0.16 m. Caudales de tributarios,  $Q_1 = 40$  l/s;  $Q_2 = 40$  l/s.

Finalmente se ha comenzado el abordaje de un análisis cuantitativo de la evolución temporal del flujo para las tres simulaciones. 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) y se determinó la frecuencia característica de las fluctuaciones del flujo (frecuencia en la cual se encuentra el valor máximo del espectro de energía). El análisis espectral de las series temporales de velocidades de flujo medidas y simuladas con todas las configuraciones muestran valores de frecuencias aún elevados comparándolos con los registrados en el modelo experimental. En lo que se refiere a la simulación realizada con la configuración 3 se ha incluido también el cálculo de  $\mathcal{M}$  un parámetro adimensional que relaciona la velocidad de corte con la viscosidad cinemática muy útil para evaluar la calidad de la malla en una simulación de tipo LES. Los valores resultantes dan cuenta de zonas en el dominio con valores máximos de 64, existiendo zonas con valores de 4 u 11 en promedio, en base a esto se realizarán mejoras en la discretización del dominio, refinando localmente la malla.

## 5 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Los modelos numéricos computacionales utilizados para simular la confluencia de flujos paralelos reproducen cualitativamente los principales procesos físicos observados durante los experimentos, logrando representar las zonas de estancamiento, de aceleración del flujo, y la formación y desprendimiento de vórtices.

En el avance en la complejidad del modelo numérico utilizado, pasando de simulación 2D a 3D, se han observado mejoras substanciales en la configuración de zona de estancamiento al incluir en la simulación la tercera dimensión en la representación de una zona de estancamiento como la observada en la evaluación experimental.

Del contraste entre las simulaciones realizadas, se deduce que los campos medios observados para la configuración 1 representan de forma adecuada el campo del flujo medio en general, sin embargo presenta un déficit de la velocidad generada por la presencia de una zona de estancamiento de menor longitud que la experimental, debido a la presencia de fenómenos tridimensionales. La simulación del proceso de generación y desprendimiento de vórtices en la región aguas abajo es similar al observado experimentalmente. Las simulaciones tridimensionales (con y sin modelo de cierre de la turbulencia) presentaron un muy buen acuerdo al analizar el campo del flujo medio simulado en la zona de estancamiento y su contraste con el relevado en el canal experimental.

El análisis espectral de las series de tiempo para las 3 configuraciones de flujo presenta frecuencias características de las fluctuaciones de mayor escala (desprendimientos de vórtices) superiores a las observadas experimentalmente. En este aspecto se continúa trabajando con el fin de realizar mejoras en la discretización del dominio de simulación. Estas mejoras incluyen refinamiento local de la malla en las zonas de la interfase de mezcla y cambios en los parámetros tanto en el esquema de modelado LES como de la función de pared a los fines de mejorar la representatividad del modelo en el dominio de las frecuencias.

## 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., Jackson P., y García M. (2006). Confidence intervals in the determination of turbulence parameters. *Experiment in Fluids*. 40: 514 – 522.
- Herrero, H., García C, López G, Pedocchi F. (2013). Evaluación experimental de una analogía para la caracterización del flujo turbulento en confluencias. III Simposio sobre Métodos Experimentales en Hidráulica, Santa Fe, Argentina.
- 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.
- 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*, págs3721-3740.
- OpenFOAM(R) Team (2007): “User Guide OpenFOAM(R), Foundation. <http://www.opencfd.co.uk/openfoam/>
- Pozzi Piacenza, C.; Herrero, M.; Furlan, P.; Ragessi, M.; Marquez Damian, S.; Lopez, G.; Pedocchi, F.; Garcia, C.. (2013). Simulación numérica y experimental del flujo en una confluencia. *Mecánica Computacional Vol XXXII*.
- 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.