

EFFECTOS PERIÓDICOS DE REMANSO EN CONFLUENCIAS

Horacio Herrero, Carlos Marcelo García, Leticia Tarrab, Matías Ragessi y Andrés Rodríguez

Laboratorio de Hidráulica – Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba
Av. Filloy s/n, Ciudad Universitaria. Córdoba. Tel: (0351) 433-4446 - E-mail: hsherrero@yahoo.com.ar

RESUMEN

En este trabajo se exploran experimentalmente los efectos de remanso, en los flujos convergentes, de los procesos turbulentos presentes en la zona hidrodinámica de la confluencia la cual incluye la zona de estancamiento y la interfase de mezcla. Para ello se utilizó una instalación experimental de laboratorio que reproduce la región de la confluencia de dos flujos que no presentan diferencia de densidades. Durante el ensayo experimental se utilizaron modernas técnicas de medición de velocidades de flujo y visualización. La caracterización del flujo se basa en valores medios de velocidad del flujo, parámetros turbulentos, y análisis espectral. Los resultados muestran que la región de estancamiento influye en el proceso de desprendimiento de vórtices en la interfase de mezcla, de manera similar a lo que sucede en la zona de estancamiento detrás de un obstáculo. Además, oscilaciones de baja frecuencia se observan en las señales de velocidad registradas aguas arriba de la confluencia con escalas de tiempo similares a las de desprendimiento de vórtices. El análisis espectral muestra que la escala de tiempo de estas oscilaciones es dos órdenes de magnitud mayor que la escala de tiempo de la turbulencia generada por la fricción del fondo. Los experimentos y la metodología de trabajo presentados en este trabajo proveen información para la comprensión de la hidrodinámica del flujo en confluencias.

ABSTRACT

This work presents laboratory measurements of a stream confluence with no density difference in the inflows aiming at exploring both the hydrodynamic processes in the stagnation-zone and mixing interface and their backwater effects on the converging flows. During the test, experimental techniques for measuring velocity and flow visualization have been used. The flow characterization is based on mean velocity values, turbulence parameters, and spectral analysis. The results show that the stagnation region influences the process of vortex shedding in the mixing interface similarly to what happens in the stagnation zone of a turbulent wake. In addition, low-frequency oscillations are observed upstream the confluence in the converging flows with time scales similar to the interface vortex shedding period. The spectral analysis also shows that the time scale of the low frequency oscillations is two orders of magnitude larger than the turbulent time scale generated by bed friction, and it can be concluded that they are a consequence of the backwater effects. The reported experiments and work methodology presented in this paper provides information to the understanding processes on the hydrodynamics of stream confluences.

INTRODUCCIÓN

La dinámica del flujo en confluencias fluviales ha recibido un considerable interés científico mediante la realización de estudios experimentales de laboratorio y campo, y simulaciones numéricas. Existe evidencia en la literatura de que la zona hidrodinámica de la confluencia (ZHC), la cual incluye las zonas de estancamiento y la interfase de mezcla, presenta un complejo conjunto de procesos turbulentos, como por ejemplo separación lateral y movimiento helicoidal del flujo, separación vertical de flujo causada por las variaciones espaciales en la morfología del fondo, y estructuras turbulentas generadas por esfuerzos de corte lateral entre los flujos convergentes (Rhoads y Sukhodolov, 2001). Sin embargo, no existen antecedentes sobre estudios que exploren los efectos de remanso que tienen estos procesos en la región del flujo localizada inmediatamente aguas arriba de la confluencia.

En este trabajo se exploran experimentalmente los efectos de remanso, en los flujos convergentes, de los procesos turbulentos presentes en la zona hidrodinámica de la

confluencia. Para ello se utilizó una instalación experimental de laboratorio que reproduce la región de la confluencia de dos flujos que no presentan diferencia de densidades. Durante el ensayo experimental se utilizaron modernas técnicas de medición de velocidades de flujo y visualización.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los experimentos se realizaron en una instalación experimental que representa la región de la confluencia de dos flujos (canales 1 y 2 en la Figura 1) construida en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina (Bonisconti, 2008). La topografía de dicha instalación se representó utilizando como sedimento para el fondo de los canales arena natural cuasi uniforme (lavada y tamizada), con D_{50} cercano a 0.5 mm, mientras que para recubrimiento de los taludes se utilizó grava con un D_{50} de 6 mm. Una compuerta de eje horizontal localizada aguas abajo permitió ajustar la condición de contorno de nivel de superficie libre en el sistema. Los caudales fueron generados con una bomba sumergible (caudal máximo de 70 l/seg). Dichos caudales se aforaron utilizando un vertedero de placa triangular y verificados con un tanque volumétrico de 3 metros de profundidad y sección cuadrada de 1.5 metros de lado equipado con un limnógrafo "OTT" tipo Thalímedes (Bonisconti, 2008).

La condición experimental analizada en este trabajo presenta una relación de caudales entre los canales 1 y 2 de aproximadamente 1:3, respectivamente. El flujo total en el sistema fue 11.3 l/seg con un aporte de 3.8 l/seg del canal 1 y de 7.5 l/seg del canal 2. Para esta condición experimental la profundidad del flujo en el canal 1 fue de 9.8 cm y para el canal 2 la profundidad del flujo fue de 10.8 cm.

Las técnicas experimentales que han sido empleadas con el fin de producir una completa caracterización experimental del flujo turbulento fueron: velocimetría acústica Doppler (ADV), velocimetría por seguimiento de partículas (PTV), y visualización del flujo utilizando trazadores.

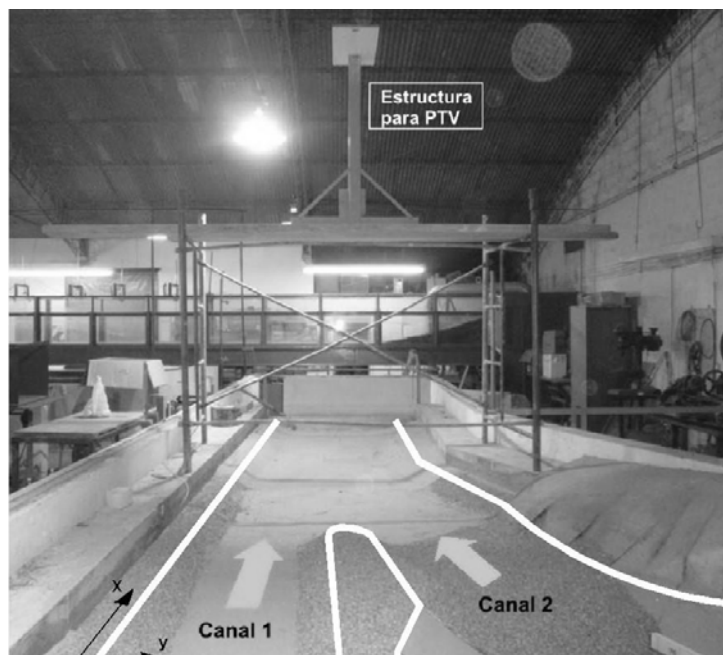


Figura 1.- Instalación experimental

Para la aplicación de la técnica ADV se definieron 18 localizaciones para registrar series temporales de velocidad en el tramo final de cada uno de los canales y en las zonas de estancamiento e interfase de mezcla (Figura 2).

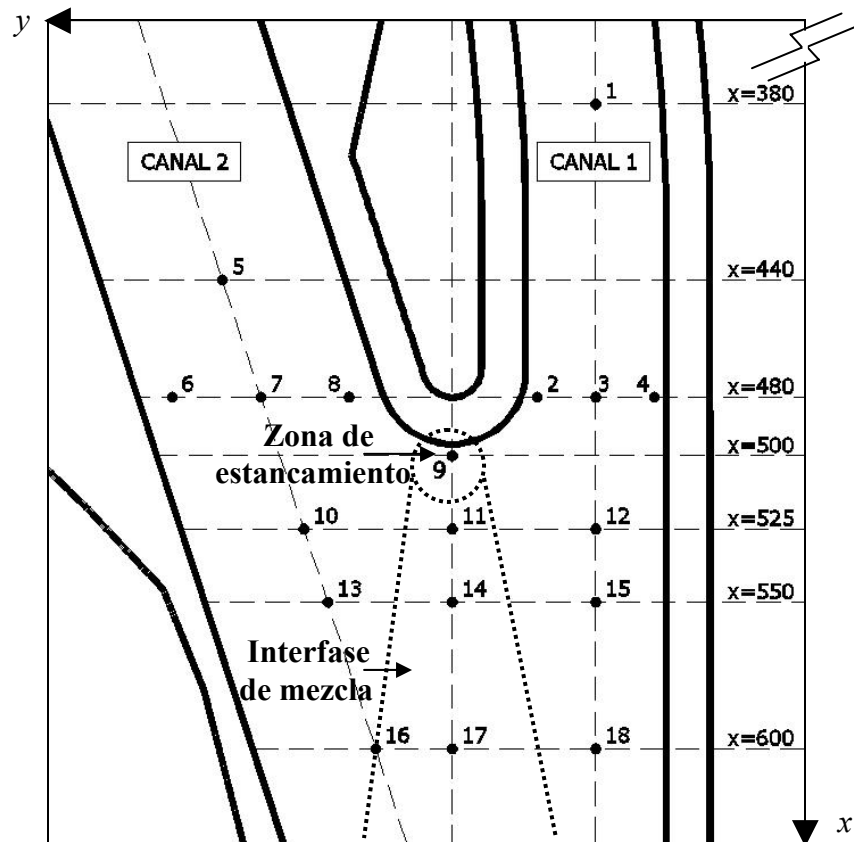


Figura 2.- Localizaciones donde se realizaron mediciones de velocidad con ADV.

Los valores de velocidad en las localizaciones indicadas en la Figura 2 fueron registrados con un MicroADV Sontek de 16 MHz montado sobre una estructura metálica apoyada sobre las paredes laterales del modelo, orientado de manera tal que el la componente u del vector velocidad coincidió con la dirección x (ver figura 2). La temperatura del agua durante el ensayo fue de 13.5°C . La señal de velocidad fue registrada a una frecuencia f_R de 25 Hz, que satisface la condición $F = f_R \times T_1 > 20$ (García et al., 2005). La escala de tiempo T_1 , representativa de la turbulencia generada por la fricción del fondo, se puede estimar como $T_1 = L/U_c$, siendo L una escala de longitud de los vórtices más grandes (del orden de la profundidad del flujo h) y U_c la velocidad convectiva, del orden de la velocidad media en la dirección longitudinal del flujo \bar{u} (García et al., 2007). Para una configuración de registro óptima, se realizó un análisis de sensibilidad basado en evaluar los indicadores relacionados a la calidad de la señal (correlación y la relación señal/ruido). La configuración óptima quedó determinada por una frecuencia de registro de 25 Hz y un rango de velocidad de 30 cm/seg. Mediciones preliminares de velocidad del flujo en la localización 1 mostraron una variación cuasi-periódica de los valores de la componente longitudinal del flujo, con un período (escala de tiempo del proceso), de aproximadamente 20 segundos. Para caracterizar los patrones medios del flujo, el tiempo de medición debe ser como mínimo igual a 20 escalas de tiempo del proceso analizado. Basado en este requerimiento, se midió para la condición experimental

analizada durante un tiempo de 600 segundos (10 minutos) en cada una de las localizaciones indicadas en la Figura 2.

Para la aplicación de la metodología PTV se utilizó una estructura sobre el canal (ver Figura 1), para ubicar la cámara digital a fin de que área de captura de la cámara abarque el área de estudio. La captura de imágenes digitales se realizó con una cámara digital Nikon con una resolución de 640x480 píxeles con una frecuencia de adquisición de 30 imágenes por segundo. La captura de imágenes se realizó durante 5 minutos, en forma simultánea con los primeros 5 minutos de medición de velocidad con ADV en la localización 1. El material empleado como trazador en este caso fue poli-propileno color gris con forma de partículas aproximadamente esféricas, con una densidad de 0.908 y un diámetro cercano a los 3 mm. El sembrado de partículas en la superficie del flujo se realizó de forma manual en el canal 1 y las partículas se recolectaron con una red a la salida del modelo. Previo al sembrado se tomaron imágenes de una grilla ubicada en forma horizontal al nivel de superficie libre, con el fin de obtener una correspondencia entre el tamaño del píxel de la imagen y la distancia real.

Para aplicar la técnica de visualización mediante trazadores se utilizó un conducto que pasa por debajo del fondo del canal y que emerge en la zona de estancamiento. El trazador utilizado fue fluoresceína en solución en agua, y las imágenes fueron tomadas con la misma cámara digital y desde la misma posición que en la técnica de PTV.

RESULTADOS

a) Zona de estancamiento e interfase de mezcla.

La zona de estancamiento en confluencias (representada en la Figura 2), se caracteriza por la presencia de velocidades longitudinales negativas asociadas a la recirculación del flujo en esa región (Rhoads y Sukhodolov, 2001). Esta característica se observa en la Figura 3 para las mediciones de velocidad registradas en la localización 9, no sólo para la componente longitudinal sino también para la transversal.

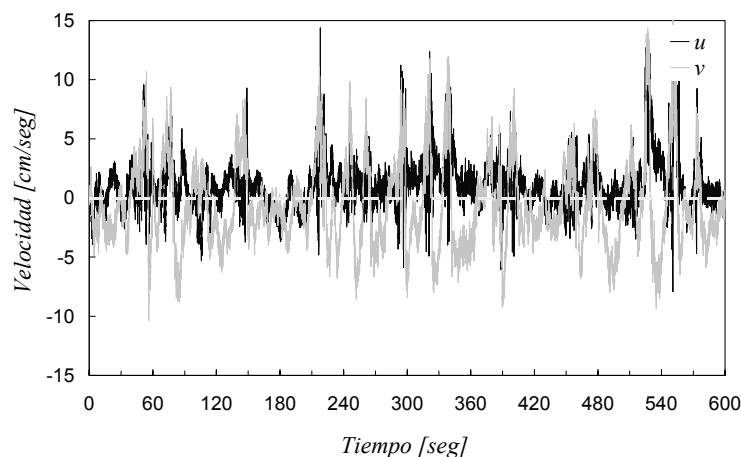


Figura 3.- Señales de velocidades registradas en la zona de estancamiento (localización 9).

La interfase de mezcla, comienza en la zona de estancamiento y puede estar conectada a esta última hidrodinámicamente. La analogía de una interfase de mezcla en una confluencia con una capa de corte ha sido generalmente utilizada, sin embargo, la geometría de las confluencias a menudo induce el desarrollo de características similares a las asociadas con estelas turbulentas someras, siendo ésta una analogía alternativa que ha recibido poca

atención (Rhoads y Sukhodolov, 2008). Las estelas turbulentas someras se desarrollan generalmente cuando existe un déficit de velocidad en un flujo de profundidad limitada, de la misma forma que si pasara a través de un obstáculo aislado (Chen y Jirka, 1995). La estela turbulenta crece aguas abajo, lateralmente, a través de la expansión de vórtices bidimensionales coherentes que se forman aguas abajo del obstáculo. La evolución de la estructura turbulenta de una estela somera está estrechamente relacionada con un parámetro adimensional de estabilidad S_w (Rhoads y Sukhodolov, 2008).

$$S_w = c_f \frac{D}{h}, \quad (1)$$

donde D es la dimensión transversal del obstáculo, h es la profundidad del flujo, y c_f es un coeficiente de fricción el cual puede ser estimado a partir de la fórmula de Manning-Strikler:

$$c_f^{-1/2} = \alpha \left(\frac{h}{K_s} \right)^{1/6} \quad (2)$$

En la ecuación 2, K_s es la altura de rugosidad del fondo y α un parámetro igual a 8.1 (García, 2007). En este trabajo se adopta un valor de $K_s = D_{50} = 0.5mm$ (sedimento del fondo). De esta forma, para una profundidad de flujo de 10 cm, $c_f \approx 0.0025$. Luego, $S_w \approx 0.005 < 0.2$ el cual corresponde a una estructura turbulenta con un mecanismo de desarrollo y desprendimiento de vórtices (Chen y Jirka, 1995).

El mecanismo de desarrollo y desprendimiento de vórtices, en sus distintas fases, se representa en las Figuras 4a, 4b y 4c. Estas figuras se derivan a partir del análisis digital de la secuencia de campos de velocidades superficiales obtenida utilizando la técnica de PTV. El período característico de este proceso T_2 es de aproximadamente 20 segundos.

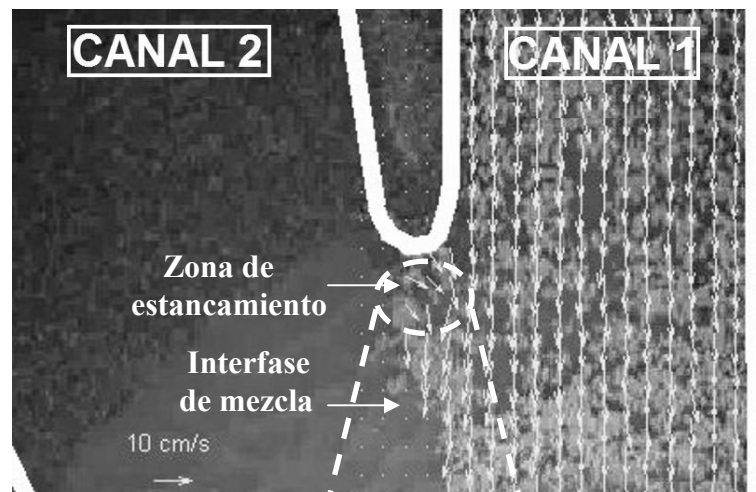


Figura 4a.- Formación y desprendimiento de vórtices – Fase 1

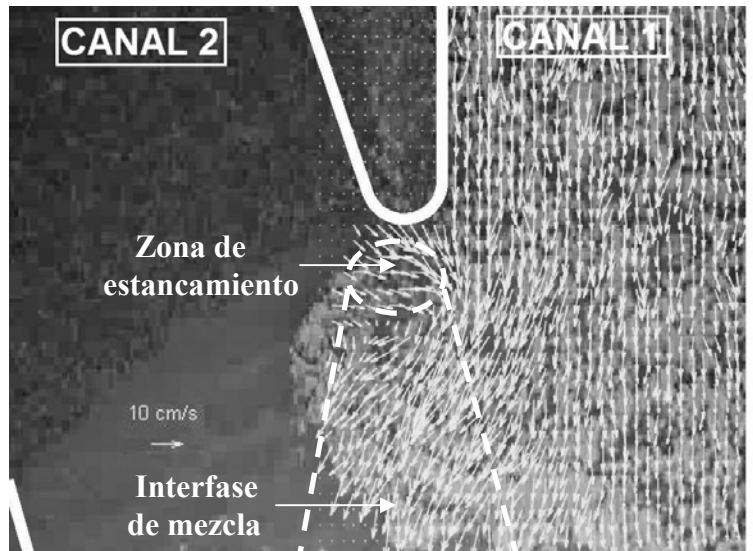


Figura 4b.- Formación y desprendimiento de vórtices – Fase 2

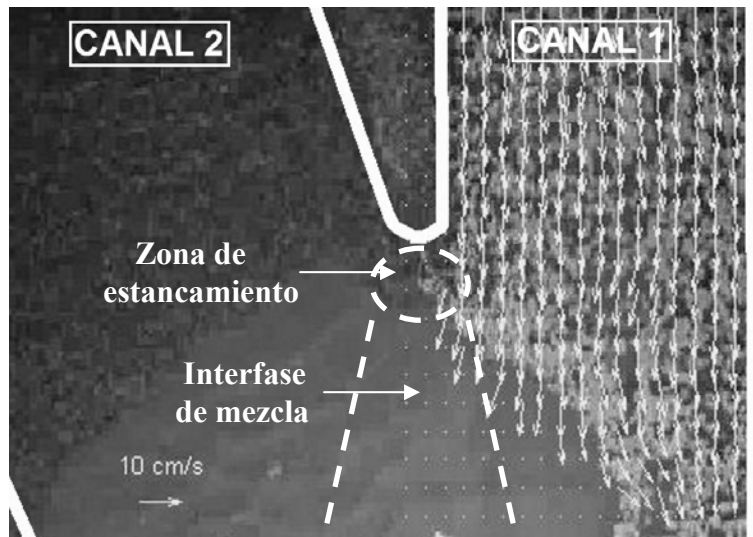


Figura 4c.- Formación y desprendimiento de vórtices – Fase 3

El comportamiento cuasi-periódico del flujo en la zona de estancamiento e interfase de mezcla se representa también a partir de la función autocorrelación R_{yy} para la componente transversal de la velocidad del flujo v . La Figura 5 incluye las funciones de autocorrelación R_{yy} correspondientes a señales de velocidad registradas en cuatro progresivas aguas abajo de la confluencia (localizaciones 9, 11, 14 y 17 de la Figura 2). Las funciones R_{yy} para las distintas progresivas presentan tiempos del primer cruce a cero aproximadamente constantes y oscilaciones con un período similar a T_2 . Por otro lado, los valores de R_{yy} para un mismo tiempo decrecen hacia aguas abajo en la interfase de mezcla, lo que implica menores valores de la escala integral de tiempo (calculada como la integral de la función R_{yy} hasta el primer cruce a cero; García et.al, 2007)

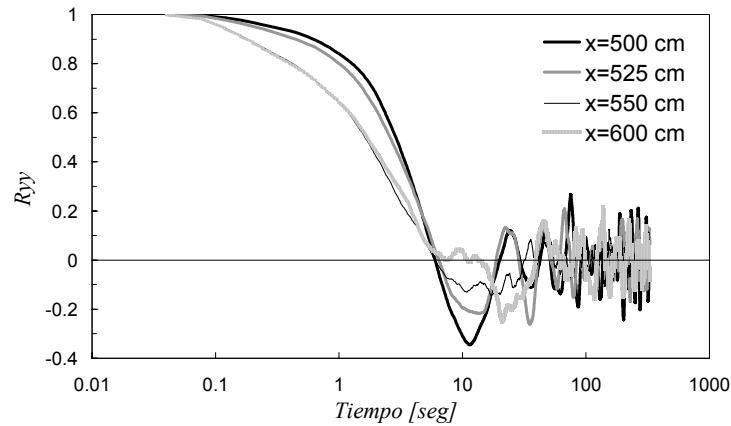


Figura 5.- Función autocorrelación R_{yy} en la zona de estancamiento ($x=500$ cm, localización 9) y en la interfase de mezcla ($x=525$, $x=550$ y $x=600$, localizaciones 11, 14 y 17 respectivamente)

Un parámetro utilizado para caracterizar el flujo en la zona de la confluencia es la velocidad media del flujo en la dirección longitudinal. En la Figura 6 se puede distinguir claramente que en la zona de estancamiento, la velocidad media en la dirección longitudinal es muy baja (menor a 2 cm/seg.) mientras que en puntos ubicados en la interfase de mezcla la velocidad supera los 8 cm/seg. También se puede observar que existe un gradiente de velocidades longitudinales importante entre los canales 1 y 2.

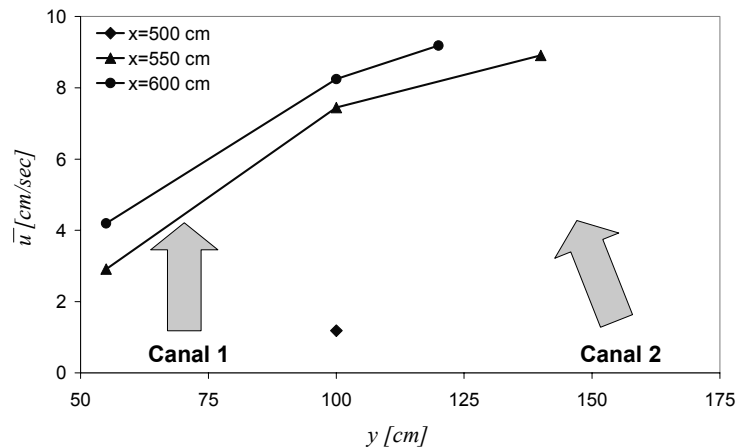


Figura 6.- Valores medios de la componente de velocidad en la dirección longitudinal en la zona de estancamiento e interfase de mezcla.

Otra característica importante de la interfase de mezcla son los altos niveles de turbulencia presentes en esta zona. En la Figura 7 se incluyen los niveles de turbulencia representados por la energía cinética turbulenta $TKE = 0.5(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})$, donde $\overline{u'^2}$, $\overline{v'^2}$ y $\overline{w'^2}$ son las varianzas de la señal de velocidad en las componentes longitudinal, transversal y vertical, respectivamente. En esta figura se observa que los niveles más altos ocurren a lo largo de la interfase de mezcla y que los valores de TKE máximos en cada sección decrecen hacia aguas abajo.

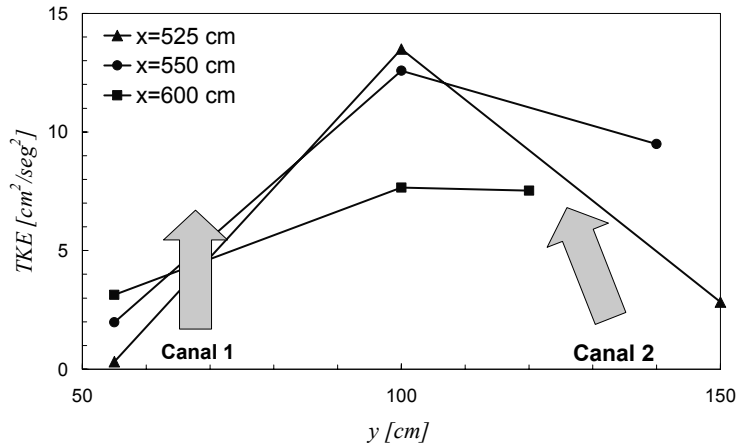


Figura 7.- Energía cinética turbulenta (TKE) en distintas localizaciones en la transversal para distintas progresivas.

b) Efecto de remanso en la región aguas arriba de la confluencia.

Las Figuras 8 y 9 muestran respectivamente la serie temporal de velocidad con su correspondiente espectro de energía para la componente longitudinal de velocidad del flujo registrada con ADV en la localización 1.

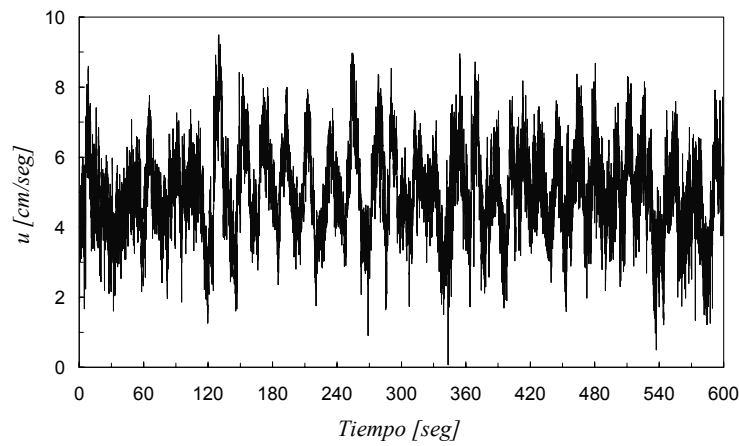


Figura 8.- Serie temporal de velocidades longitudinales en la localización 1.

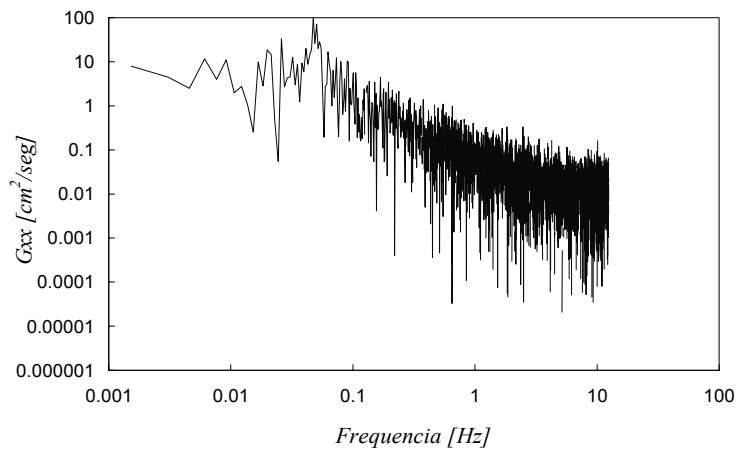


Figura 9.- Espectro de energía (G_{xx}) de la serie temporal de velocidad longitudinal en la localización 1.

La señal de velocidad que se incluye en la Figura 8 presenta dos componentes: una componente con fluctuaciones cuasi-periódica o de baja frecuencia (con velocidades máximas cercanas a 10 cm/seg. y valores mínimos cercanos a cero), y una componente con fluctuaciones de alta frecuencia debido a la propia turbulencia del flujo generada por la fricción del fondo. Mediante un filtro pasa-bajo (frecuencia de corte = 0.06 Hertz) se separaron ambas componentes, obteniendo un período T_3 para la componente de baja frecuencia de aproximadamente 20 segundos, la cual se distingue claramente por un pico en el espectro de energía G_{xx} para una frecuencia de 0.05 Hz (Figura 9). Este período T_3 es similar al período de formación y desprendimiento de vórtices T_2 observado en la zona de estancamiento e interfase de mezcla. Esta similitud consolida la hipótesis de que las fluctuaciones observadas aguas arriba de la confluencia se generan por el efecto de remanso de los procesos turbulentos observados en la zona hidrodinámica de la confluencia. Finalmente se generó una segunda serie temporal de velocidad a partir de la medición con la técnica PTV en un punto ubicado sobre el eje de simetría del Canal 1 inmediatamente antes de entrar en la confluencia (localización 3 en la Figura 2). La Figura 10 muestra una comparación entre las señales de velocidad filtradas (frecuencia de corte = 0.06 Hertz) y no filtradas, registradas en forma simultánea en las localizaciones 1 y 2 durante 120 segundos.

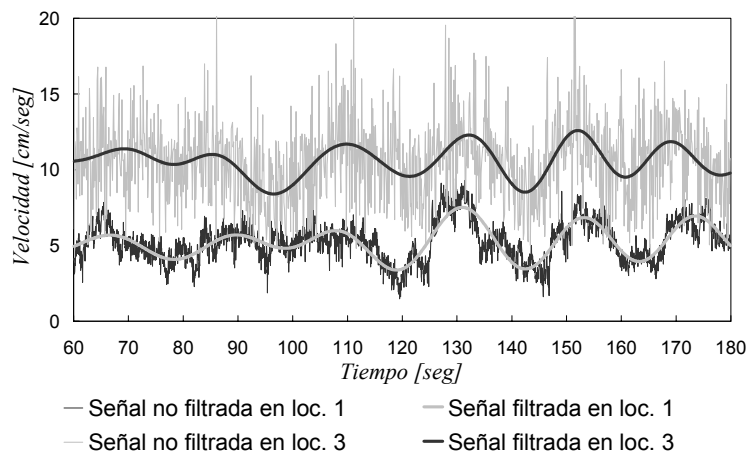


Figura 10.- Señales de las resultantes de velocidad en las direcciones longitudinal y transversal, filtradas y no filtradas, registradas simultáneamente en las localizaciones 1 y 2

Esta figura muestra claramente que existe un comportamiento temporal similar entre las componentes de baja frecuencia de las señales de velocidad registradas en ambos puntos. Los valores de velocidad medidos en la localización 3 son mayores que en la localización 1 debido a que la primera representa velocidades superficiales obtenidas a partir de la técnica PTV, mientras que en la otra localización la serie temporal de velocidad se registró con ADV a 4 cm del fondo.

CONCLUSIONES

Se observó un efecto cuasi-periódico de remanso aguas arriba de la confluencia con un período T_3 similar al período de formación y desprendimiento de vórtices T_2 observado en la zona de estancamiento e interfase de mezcla aguas abajo de la confluencia. Esta similitud consolida la hipótesis de que las fluctuaciones observadas aguas arriba de la confluencia se generan por el efecto de remanso de los procesos turbulentos observados en la zona

hidrodinámica de la confluencia.

Si se comparan las escalas de tiempo de la turbulencia propia del flujo debido a la fricción del fondo $T_1 \approx 2\text{seg}$ con la escala de tiempo de los desprendimientos de vórtices $T_2 \approx 20\text{seg}$, T_2 es un orden de magnitud mayor que T_1 .

Los resultados presentados en este trabajo brindan un aporte a la comprensión de la hidrodinámica del flujo en confluencias a través de un conjunto de datos experimentales útiles para validar modelos numéricos utilizados para la caracterización de la dinámica de flujos en confluencia con diferentes condiciones geométricas. En trabajos futuros se extenderá este análisis para distintas condiciones experimentales cambiando la relación de caudales entre ambos canales.

LISTA DE SÍMBOLOS

- x : dirección longitudinal del flujo.
 y : dirección transversal del flujo.
 D_{50} : diámetro del sedimento tal que el 50% de la muestra queda retenido.
 u : valor instantáneo de velocidad en la dirección longitudinal del flujo.
 v : valor instantáneo de velocidad en la dirección transversal del flujo.
 \bar{u} : valor medio de la señal de velocidad para la componente longitudinal del flujo.
 \bar{v} : valor medio de la señal de velocidad para la componente transversal del flujo.
 $\overline{u^2}$: varianza de la señal de velocidad para la componente longitudinal del flujo.
 $\overline{v^2}$: varianza de la señal de velocidad para la componente transversal del flujo.
 $\overline{w^2}$: varianza de la señal de velocidad para la componente vertical del flujo.
 TKE : Energía cinética turbulenta.
 F : parámetro adimensional que cuantifica efectos del filtrado del ADV.
 f_R : frecuencia de registro del ADV.
 T_1 : escala de tiempo de la turbulencia generada por la fricción del fondo.
 T_2 : escala de tiempo del proceso de desprendimiento de vórtices en la zona de estancamiento e interfase de mezcla.
 T_3 : escala de tiempo del proceso cuasi-periódico de remanso de baja frecuencia observado aguas arriba de la confluencia.
 L : escala de longitud de los vórtices más grandes generados por la fricción del fondo.
 U_c : velocidad convectiva de los vórtices de escala L .
 S_w : parámetro adimensional de estabilidad.
 c_f : coeficiente de fricción.
 D : dimensión transversal del obstáculo.
 h : profundidad del flujo.
 α : parámetro de la ecuación de Manning-Strikler.
 K_s : altura de rugosidad en la ecuación de Manning-Strikler.
 R_{yy} : función autocorrelación para la componente transversal del flujo.

Agradecimiento. A la Secretaría de Ciencia y Técnica de la Universidad Nacional de Córdoba por el financiamiento de una beca para el primer autor para llevar adelante esta investigación, y al Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Nacional de Córdoba por el facilitar las instalaciones, instrumentos y recursos humanos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bonisconti, G. (2008). “Construcción y operación del modelo físico de las obras de evacuación de caudales del Aprovechamiento Múltiple Presa Los Monos”. *Tesis de Grado de la carrera de ingeniería civil, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. Universidad Nacional de Córdoba.

Chen, D., y Jirka, G. H. (1995), Experimental study of plane turbulent wakes in a shallow waterlayer, *Fluid Dyn. Res.*, 16, 11– 41.

García M. H. (2007) “Sedimentation engineering: processes, measurements, modeling, and practice”. *ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 110*

García C. M., Cantero M., Niño, Y. y García M. H. (2005). “Turbulence measurements with Acoustic Doppler Velocimeters”. *CivilJ. Hydr. Engrg. ASCE. 131*, 1062-1073.

García C. M., Cantero M., Jackson P. y García M. H. (2007). “Characterization of the flow turbulence using water velocity signals recorded by acoustic doppler velocimeters”. *Civil Engineering Studies, Hydraulic Engineering Series N° 75*.

Rhoads, B. L. y Sukhodolov, A. (2001). “Field investigation of three-dimensional flow structure at stream confluences: 1. Thermal mixing and time-averaged velocities”. *Water resources research, vol. 37, no. 9*, pages 2393–2410.

Rhoads, B. L., y Sukhodolov, A. (2008). “Lateral momentum flux and the spatial evolution of flow within a confluence mixing interface”, *Water resources research, vol. 44*, w08440, doi:10.1029/2007wr006634.