

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXI CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**DINÁMICA DEL FLUJO TURBULENTO EN CAVIDADES LATERALES: ESTUDIO
EXPERIMENTAL Y NUMÉRICO DE LOS EFECTOS SOBRE EL TRANSPORTE Y
DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES**

**KARINA SOTO¹, CHRISTIAN GONZÁLEZ¹, CAI WEI², EMMANUEL MIGNOT²,
NICOLAS RIVIERE², CRISTIÁN ESCAURIAZA¹**

RESUMEN

En flujos naturales como en artificiales es común encontrar cavidades laterales que cumplen un papel importante en la dinámica local, tanto en la generación de condiciones favorables para distintos hábitats, como en la dispersión y transporte de contaminantes en sistemas fluviales y costeros. Estas zonas tienen características privilegiadas para la fauna y la flora, pues presentan bajas velocidades, esfuerzos turbulentos reducidos y aireación significativa, además de ser ricas en nutrientes. Si bien ellas son de gran importancia, aún se requiere conocer en detalle la dinámica del flujo para entender los mecanismos de transporte turbulento e intercambio de masa con el canal principal. En este artículo se presentan los resultados de simulaciones numéricas 3D del flujo en un canal principal unido a una cavidad lateral. Se usaron modelos híbridos de turbulencia, a los que se les acopla una ecuación de transporte que entrega resultados cuantitativos del efecto de las estructuras coherentes en la mezcla y dispersión de contaminantes. Algunos de los resultados obtenidos fueron comparados con resultados experimentales en un canal con una cavidad de largo variable. A partir de esta investigación podemos identificar las estructuras coherentes que controlan el transporte y caracterizar el intercambio de masa entre la cavidad y el flujo principal.

¹ Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental. Pontificia Universidad Católica de Chile.

² LMFA, INSA de Lyon, Francia.

1. INTRODUCCIÓN

Dada la gran variedad de formas y características que hay en cauces, tanto naturales como artificiales, encontrar una cavidad lateral junto a un flujo principal no es poco común. Un ejemplo de esto puede ser un puerto conectado al mar abierto, o el espacio entre espigones consecutivos en las riberas de los ríos. Lo interesante es que dentro de estas cavidades se forman zonas de recirculación, las que se caracterizan por tener velocidades bajas y esfuerzos de corte reducido (O'Connor et al., 2010).

Actualmente la literatura reconoce la aparición de celdas de recirculación de distintos tamaños, sentido, cantidad y tiempos de residencia dentro de las cavidades laterales. Lo anterior está directamente determinado por la geometría de la cavidad, y por su razón largo/ancho (Rivière et al., 2010). Esto puede tener gran relevancia en el planteamiento de medidas de restauración fluvial (O'Connor et al., 2010). Por ejemplo, en la descripción de la dispersión de un contaminante y posterior diseño de estrategias de captura de sedimentos contaminados o aumento de tiempos de residencia. En presencia de contaminantes reactivos que afectan la calidad del agua, la comprensión de la dinámica de las zonas de recirculación de vuelve primordial (Jackson et al., 2012). Sin embargo, aún faltan estudios para lograr un entendimiento cabal de la dinámica del flujo en cavidades laterales; los modelos hidrodinámicos computacionales en conjunto con un trabajo experimental parecen apropiados para describir en detalle el flujo en estas zonas.

Los procesos de transporte y mezcla que ocurren entre el flujo de la cavidad lateral y el del canal principal se encuentran controlados por las estructuras coherentes que emergen de la capa de corte situada entre ambas corrientes. De esta forma, a pesar de estar frente a flujos turbulentos, es posible predecir de manera cualitativa qué es lo que sucederá con el sistema a lo largo del tiempo.

A continuación se presenta un estudio sobre el comportamiento de las zonas de recirculación que consta de dos etapas simultáneas. Por un lado, se realizaron experimentos de laboratorio en un canal rectangular, en el que se midió un plano horizontal para analizarlo por medio de fotografías y recolección de datos con tecnología de visualización avanzada (Particle Image Velocimetry, PIV). Por otro lado, se desarrollaron simulaciones 3D empleando modelos híbridos de turbulencia (detached-eddy simulations, DES) (Spalart, 2009) con la configuración experimental. Finalmente se comparan los resultados obtenidos en ambos casos. Además se obtiene información detallada de la dinámica del flujo en la zona de recirculación al acoplar una ecuación de transporte de contaminantes al modelo computacional.

El artículo se encuentra organizado de la siguiente manera. En la sección 2 se describen las características del flujo y las dimensiones del canal a estudiar. En la sección 3 se presenta el modelo numérico y las observaciones del flujo global. En la sección 4 se muestran las características instantáneas del flujo. En la sección 5 se muestra un análisis del flujo al considerar el transporte de un contaminante. Finalmente, en la Sección 6 se presentan las conclusiones y perspectivas a futuro.

2. DESCRIPCIÓN DEL FLUJO

Los experimentos de laboratorio se realizaron en el laboratorio de Mecánica de Fluidos de Lyon en un canal de sección rectangular de ancho $b=0.3\text{m}$ y 4.9 m de largo, con una pendiente horizontal y con una cavidad lateral unida en 90° (ver Fig.1).

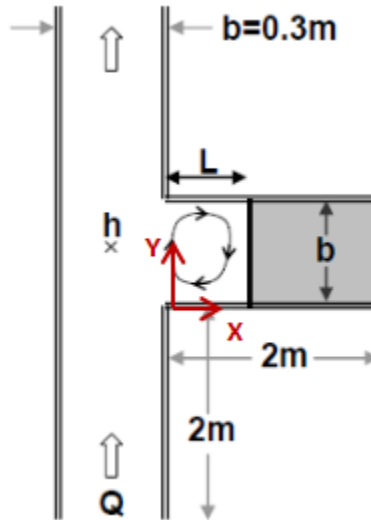


Figura 1. Montaje experimental, donde se muestran las dimensiones del prototipo, la dirección del flujo principal y los ejes coordenados.

El caudal entrante Q es constante con un valor de 3.5 litros/s, e ingresa aguas arriba del canal principal, luego pasa por un aquietador para estabilizar el flujo a la entrada. El número de Reynolds Re tiene un valor cercano a 11667 . La cavidad lateral actúa como una zona cerrada, sin ingreso ni salida de flujo, con un ancho igual al del canal principal. Su largo L es variable ($L=b$ y $L=3b$) y puede ser modificado agregando una placa de vidrio a la pared lateral, donde $L_{\text{máx}}=2\text{m}$. El agua que fluye en el depósito se bombea y pasa a través de un sistema de válvulas y caudalímetros (Promag 50 de Endress Hauser, exactitud ± 0.05 litros/s) para ajustar el caudal Q requerido. El nivel del agua del flujo global está controlado por un vertedero aguas abajo que también ajusta la altura de agua en la cavidad, con $h = 7\text{ cm}$, para lo cual se usa un medidor digital. Se realizaron dos tipos de mediciones en el flujo para conocer los campos de velocidades en las elevaciones $z=2\text{ cm}$ y $z=5\text{ cm}$, los que son explicados a continuación:

- Medición con PIV: Se probaron dos sistemas de iluminación i) Iluminación usando un proyector de diapositivas acoplado a un sistema óptico para generar un haz de luz brillante blanca de 2 a 3 mm de espesor en toda la cavidad y ii) Un láser de 40 mW acoplado a un lente para generar una lámina de luz de 1 mm . Se añadieron partículas de poliamida de $50\text{ }\mu\text{m}$ de diámetro al agua, cuyo movimiento fue capturado por una cámara situada sobre la cavidad. Esta tomó 3000 imágenes consecutivas de 1280×960 píxeles, con una resolución promedio de 0.3 mm por píxel. En el caso de la cavidad cuadrada ($L/b=1$) la luz se colocó al lado del flujo principal ($x < 0$), el campo de la cámara se centró en toda la cavidad y la frecuencia de captura fue fija e igual a 12.2 Hz . Para el caso rectangular ($L/b=3$), como consecuencia de la gran diferencia en la velocidad de rotación entre las dos celdas de recirculación, el campo de velocidad fue medido en dos etapas: (a) Al igual que para la cavidad cuadrada, para la parte de aguas arriba ($0 < x < 500\text{ mm}$) y (b) Mediante la colocación

de una luz aguas abajo de la cavidad ($x > 900$ mm) con una frecuencia de captura de 4 Hz para medir la velocidad de la segunda celda. Los dos campos de velocidades fueron unidos entre sí. Finalmente se orto-rectificaron las imágenes para restarle el fondo y poder calcular el campo de velocidades.

- Trayectorias de trazadores que flotan en la superficie obtenida por fotografías instantáneas: En las trayectorias de la superficie se añaden partículas de baja inercia. El sistema de iluminación descrito anteriormente está asociado a una elevación de 7 cm para iluminar dichas partículas. Una vez que el flujo logra establecerse se toman fotografías usando una cámara situada sobre la cavidad, con un intervalo de 6 s para la razón $L/b=1$, y de 8 s para $L/b=3$.

3. MODELO NUMÉRICO Y FLUJO GLOBAL

Las relaciones matemáticas fundamentales que gobiernan el flujo, utilizadas en las simulaciones para el fluido incompresible, son las ecuaciones no-permanentes de Reynolds en tres dimensiones (3D) para la conservación de la masa y cantidad de movimiento. Para entender el flujo se usó el modelo híbrido DES (detached eddy simulation) (Spalart, 2009). El modelo de turbulencia funciona como URANS cerca de las paredes (unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes), donde se resuelve la viscosidad turbulenta a partir del modelo de Spalart-Allmaras (Spalart y Allmaras, 1994), mientras que en el resto del flujo el mismo modelo funciona como LES (large-eddy simulation). De esta forma se pueden resolver las escalas más relevantes del flujo con bajo costo computacional, y se modela de manera estadística la capa límite turbulenta. Como condiciones de borde se tiene velocidad nula en las paredes y se extrapola la velocidad de la superficie libre para mantener el gradiente constante, manteniendo el esfuerzo de corte igual a cero. En este caso se utilizó una discretización de 6.0 millones de nodos en todo el dominio. El modelo se presenta más detalladamente en los artículos Paik et al, 2007, 2009, 2010; Paik y Sotiropoulos, 2010; Escauriaza y Sotiropoulos, 2011.

El campo de velocidad promedio al interior de la cavidad se puede calcular a partir de la simulación numérica, como se muestra en la Figura 2. Los resultados corresponden al plano horizontal a una elevación de 5 cm con respecto al fondo del canal. En la Figura 2(a) se observa el campo de velocidad que sugiere que al centro de la cavidad lateral la velocidad es muy baja en comparación a los bordes de esta. En la Figura 2(b) se presentan las líneas de corrientes del flujo medio, que muestran claramente la formación de un gran vórtice situado aproximadamente al centro de la cavidad. Esta estructura se ve deformada por el sentido del flujo del cauce principal, además se observa la formación de otros pequeños vórtices producto de la interacción con las paredes en las esquinas de la cavidad.

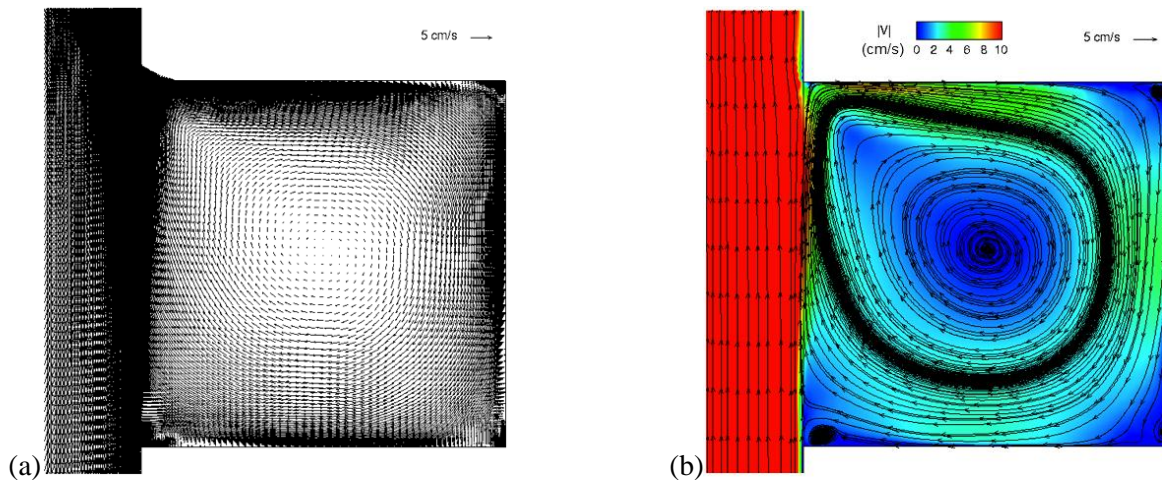


Figura 2. Vista en planta del modelo a una elevación de 5 cm. (a) Campo de velocidad promedio; (b) líneas de corriente promedio, con contornos de la magnitud de velocidad. El sentido del flujo en el canal principal es de abajo hacia arriba.

4. FLUJO INSTANTÁNEO

El flujo instantáneo se caracteriza por la compleja interacción de estructuras coherentes de distintos tamaños y escalas temporales al interior de la cavidad, como se observa en la Figura 3. Animaciones revelan que el mecanismo principal del flujo se desarrolla en la zona de conexión entre el canal principal y la cavidad. Una inestabilidad hidrodinámica conocida como capa de corte se desarrolla entre las zonas de alta y baja velocidad, generando vórtices de manera cuasi-periódica que impactan en la esquina de unión aguas abajo entre el canal principal y la cavidad. Estas estructuras le entregan energía cinética al flujo lateral, induciendo el flujo recirculatorio al interior de la cavidad, pero con múltiples escalas más pequeñas que contribuyen con el transporte de masa y de cantidad de movimiento entre ambas secciones.

Todas estas escalas del flujo turbulento pueden ser capturadas gracias al modelo computacional que permite resolver la dinámica al interior de la cavidad con alta resolución.

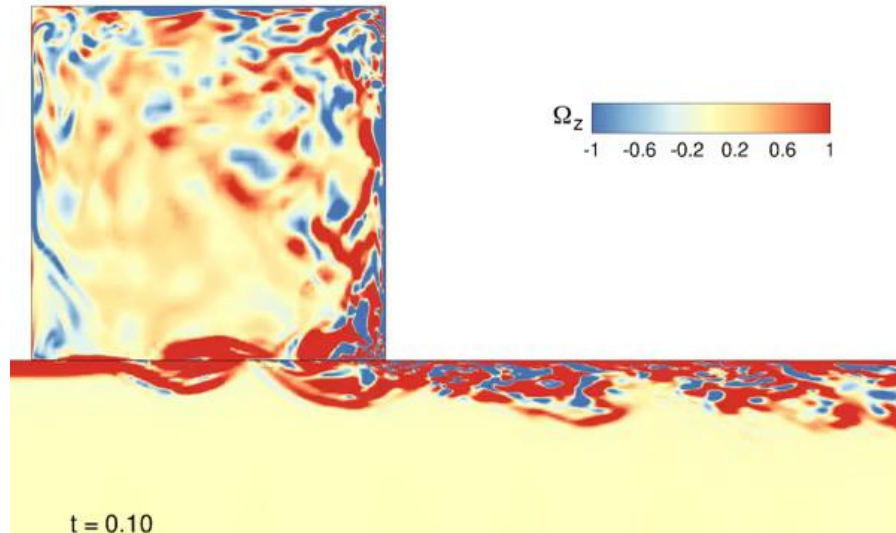


Figura 3. Imagen instantánea de la vorticidad adimensional para $L/b=1$ en el plano horizontal a una elevación de 5 cm sobre el fondo, obtenida del modelo numérico. Los contornos muestran la complejidad de las escalas de la turbulencia al interior de la cavidad, y el efecto aguas abajo en la pared lateral del canal. El flujo principal va de izquierda a derecha.

Para estudiar las frecuencias fundamentales en la zona de interacción entre el flujo principal y la cavidad, se usaron series de tiempo de velocidad longitudinal $u(t)$ (en la dirección del canal principal) obtenidas por PIV y por las simulaciones computacionales. En la Figura 4 se muestran los espectros para el punto $y=b/2$ y $x=20\text{mm}$ en $z=5\text{ cm}$. Se observa que para ambas geometrías, $L/b=1$ y $L/b=3$, hay un evidente máximo de energía medido a una frecuencia de 0.62 Hz o $t=1.61\text{s}$ (Figs. 4b y 4c). El espectro de energía proveniente de las simulaciones es muy similar, pues muestra una energía máxima a una frecuencia $f=0.8\text{ Hz}$ o $t=1.25\text{s}$ (fig. 4a), es decir, su período es ligeramente menor al medido experimentalmente. Estas frecuencias parecen coincidir con la frecuencia de generación de vórtices de la capa de mezcla.

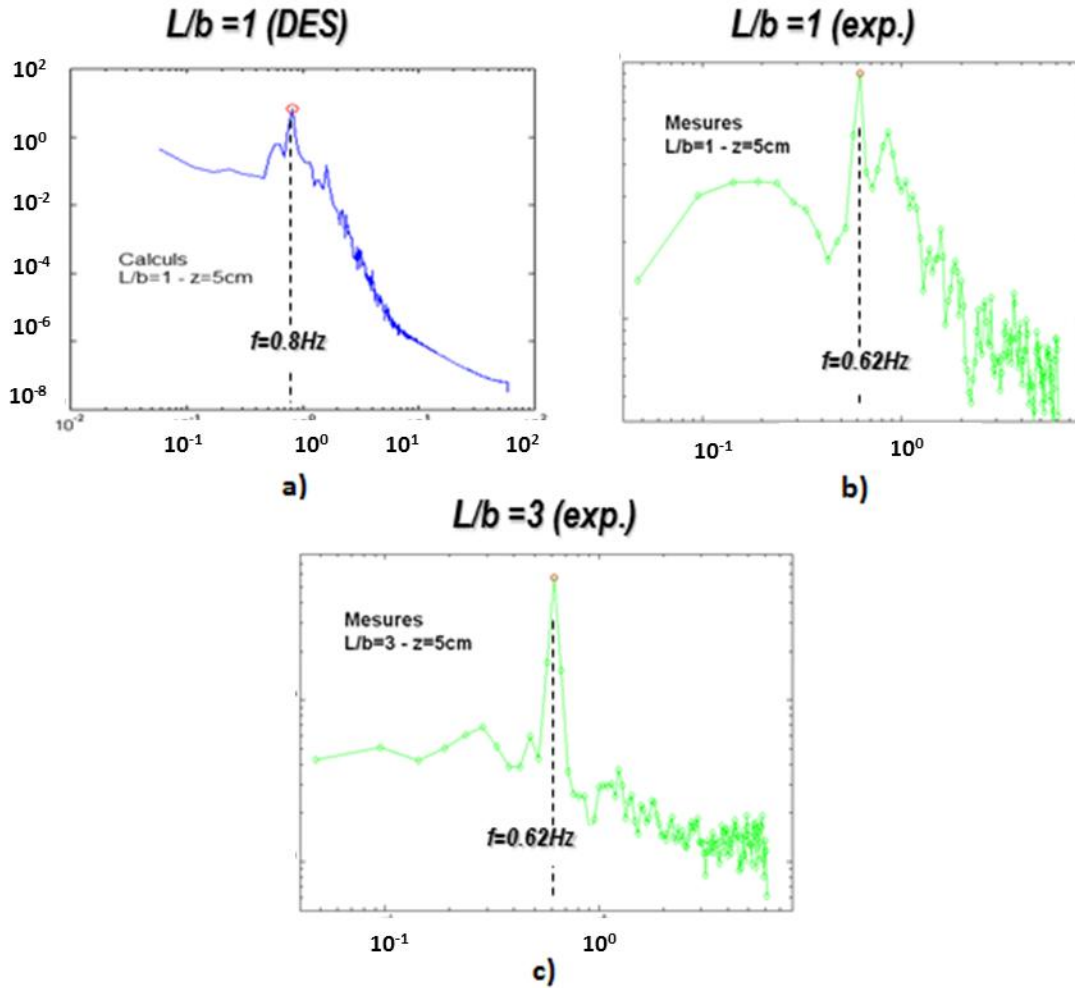


Figura 4. Espectros de energía de la velocidad $u(t)$ en el punto $y=150$ mm, $x=20$ mm. (a) y (b) son los espectros calculados y medidos, respectivamente para una razón de largo y ancho $L/b=1$. (c) es el espectro medido para $L/b=3$. Todas son mediciones de un plano a 5 cm del fondo.

Para analizar la dinámica tridimensional coherente del flujo, se define la variable q (Hunt et al. 1988) como:

$$q = \frac{1}{2} (\Omega_{ij} \Omega_{ij} - S_{ij} S_{ij}) \quad (1)$$

donde Ω_{ij} y S_{ij} denotan la parte antisimétrica y simétrica del tensor del gradiente de velocidades respectivamente. Según Hunt et al. (1988) es posible identificar los vórtices en las regiones donde se cumple que $q > 0$, por lo que la velocidad de rotación local domina la velocidad de deformación.

Utilizando isosuperficies de la variable q ya mencionada, es posible visualizar el flujo 3D, como se muestra en la Figura 5, donde se aprecia en detalle la interacción de las estructuras coherentes y las paredes. Esta imagen incluso sugiere la existencia de otros mecanismos, como inestabilidades centrífugas generadas por la curvatura del flujo al interior de la cavidad. Así se da origen a vórtices de eje horizontal del tipo Taylor-Görtler, que podrían controlar la mezcla y transporte de contaminantes desde y hacia la cavidad.

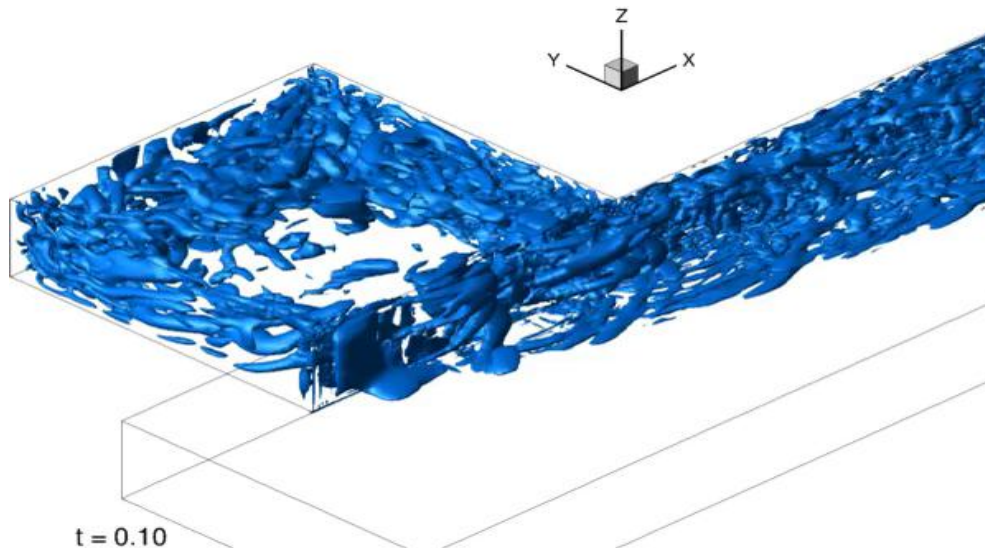


Figura 5. Imagen instantánea de iso-superficies de la variable escalar q (Hunt et al. 1988), permite visualizar la dinámica 3D de las estructuras coherentes al interior de la cavidad. El flujo principal va en la dirección X positiva correspondiente al eje coordenado de la Figura.

5. COMPORTAMIENTO DE UN CONTAMINANTE EN EL FLUJO

En el modelo numérico se añadió una ecuación de transporte de advección-difusión. Se puede simular, entonces, el comportamiento de un contaminante que en el tiempo $t=0$, con concentración igual a 1 aparece en el flujo principal, mientras que en la cavidad lateral la concentración comienza siendo nula. En la secuencia de imágenes de la Figura 6 se muestra cómo a la entrada de la cavidad el transporte se inicia por la generación de vórtices periódicos que conducen la aparición de inestabilidades del tipo Kelvin Helmholtz. La periodicidad de estas estructuras es la que domina los espectros de frecuencia de la Figura 4, además esta continúa aguas abajo del quiebre. Al centro de la celda se muestra una concentración menor asociada a tiempos de residencia mayores.

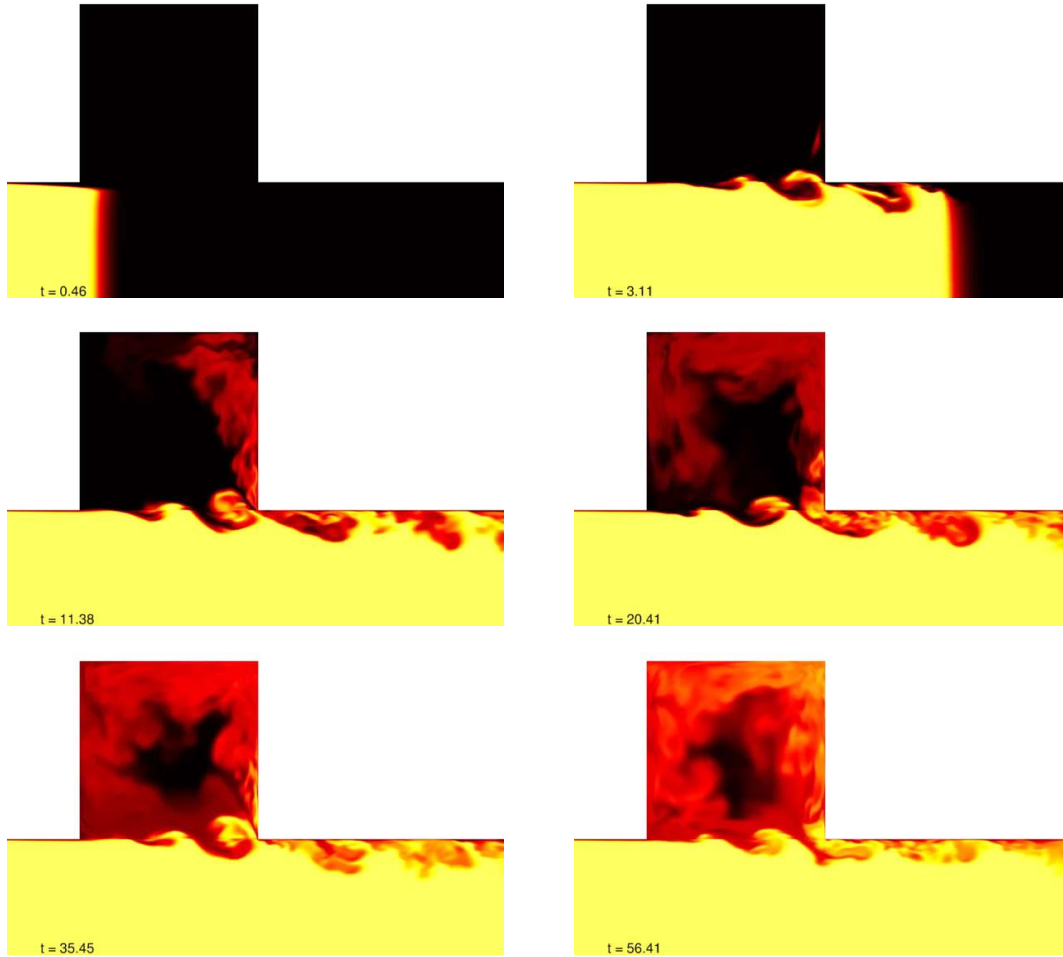


Figura 6. Simulación del comportamiento de un contaminante pasivo en el flujo principal para $z=5$ cm. En amarillo se representa una concentración igual a uno, y en negro una igual a cero. La escala del tiempo t está en segundos.

En la Figura 7 se muestra el gráfico de masa acumulada en la cavidad a lo largo del tiempo. Esta representa la razón entre el volumen de contaminante y el volumen total, como se muestra en la ecuación (2).

$$V_{acumulado} = \frac{\sum V_{ijk} * C_{ijk}}{V_{total}} \quad (2)$$

Donde v_{ijk} y c_{ijk} son el volumen y la concentración respectivamente de cada discretización. La curva obtenida se ajusta a una ecuación del tipo $-t^2 + at$, donde t es el tiempo en segundos y a es una constante.

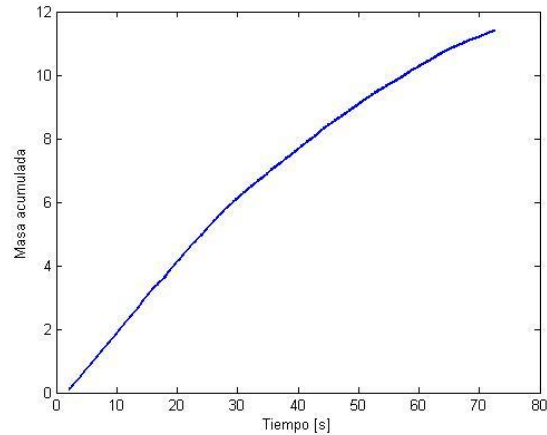


Figura 7. Masa acumulada del contaminante a través del tiempo en la cavidad lateral se ajusta a una ecuación del tipo $-t^2 + at$.

En cuanto a la variación de la concentración con respecto al tiempo, se obtuvo el espectro donde se observan tres frecuencias principales mostradas en la Figura 8. Los valores son $f1= 0.83$, $f2=1.67$ y $f3=2.51$ Hz y las razones entre ellas son $f2/f1=2$, $f3/f1=3$ y $f3/f2=1.5$. Estos resultados reflejan la estrecha relación entre la frecuencia de las estructuras coherentes y el cambio de concentración: en ambos 0.8 Hz es la frecuencia dominante. Además, las frecuencias mayores son armónicos de la principal.

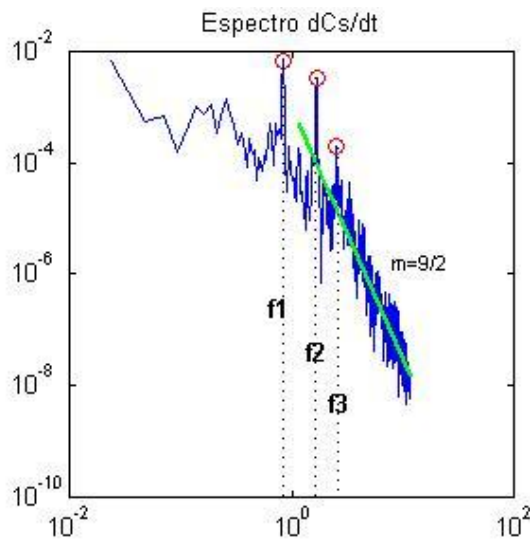


Figura 8. Frecuencias principales del espectro de variación de flujo en la cavidad lateral, obtenidas de la modelación numérica. Los valores correspondientes son $f1= 0.83$, $f2=1.67$ y $f3=2.51$ Hz. La recta que se aproxima a los datos tiene una pendiente $m=9/2$.

6. CONCLUSIONES

De las mediciones y cálculos realizados se obtuvieron resultados que describen la clara aparición de un vórtice principal al interior de la cavidad lateral cuya velocidad disminuye hacia el centro para $L/b=1$. La formación de éste es producto de la capa de corte producida entre las zonas de alta y baja velocidad, donde se forman inestabilidades de Kelvin Helmholtz. La frecuencia experimental con la que estas aparecen es 0.62 Hz, y la frecuencia simulada es ligeramente superior e igual a 0.8 Hz. Al añadir un contaminante, en el modelo numérico, se observa cómo los vórtices, principalmente del tipo Kelvin Helmholtz que se generan a la entrada de la cavidad lateral, producen cambios de alta frecuencia en la concentración total y en flujo de masa hacia la cavidad. La importante relación entre la distribución del contaminante y la dinámica del flujo queda respaldada por la similitud existente entre la frecuencia de las estructuras coherentes con la frecuencia del flujo de concentración. Con respecto al flujo de masa, este crece de manera cuadrática al interior de la cavidad, de acuerdo a los cálculos preliminares.

Para continuar este estudio se sugiere modelar cavidades de tamaños variables y trabajar con contaminantes que además de transportarse, sean capaces de degradarse en el flujo (sustancias reactivas). Además se propone hacer un estudio Lagrangiano para calcular los tiempos de residencia de un contaminante, y así compararlos con la periodicidad de las inestabilidades mostradas.

7. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos Fondecyt 1130940 and ECOS/Conicyt C11E02 de colaboración entre Francia y Chile.

REFERENCIAS

- Escauriaza, C., and F. Sotiropoulos (2011), Lagrangian model of bed-load transport in turbulent junction flows, *J. Fluid Mech.*, 666, 36–76.
- Hunt, J.C.R., Wray, A.A., Moin, P. (1988) Eddies, stream, and convergence zones in turbulent flows. In: *Proceedings of the Summer Program. Center for Turbulence Research*, pp. 193–208. NASA Ames/Stanford University
- Jackson, T.R., R. Haggerty, S. V. Apte, A. Coleman and K. Drost, (2012) Defining and measuring the mean residence time of lateral surface transient storage zones in small streams. *Water Resources Research*, 48, W10501, doi:10.1029/2012WR012096.
- O'Connor, B. L., M. Hondzo, and J. W. Harvey (2010), Predictive modeling of transient storage and nutrient uptake: Implications for stream restoration, *J. Hydraul. Eng.*, 136(12), 1018–1032, doi:10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000180.
- Paik, J., and F. Sotiropoulos (2010), Numerical simulation of strongly swirling turbulent flows through an abrupt expansion, *Int. J. Heat Fluid Fl.*, 31, 390–400.
- Paik, J., C. Escauriaza, and F. Sotiropoulos (2007), On the bi-modal dynamics of the turbulent horseshoe vortex system in a wing-body junction, *Phys. Fluids*, 19, 045,107.
- Paik, J., F. Sotiropoulos, and F. Porté-Agel (2009), Detached eddy simulation of the flow around two wall-mounted cubes in tandem, *Int. J. Heat Fluid Fl.*, 30, 286–305.
- Paik, J., C. Escauriaza, and F. Sotiropoulos (2010), Coherent structure dynamics in turbulent flows past in-stream structures: Some insights gained via numerical simulation, *J. Hydraul. Eng.*, 136, 981–993.
- Riviere, N., M. García, and E. Mignot (2010), Characteristics of the recirculation cell pattern in a lateral cavity, *International Conference on Fluvial Hydraulics (River Flow 2010), Braunschweig, Germany*.
- Spalart, P. R. (2009), Detached-eddy simulation, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 41, 181–202.
- Spalart, P.R., Allmaras, S.R. (1994), A one-equation turbulence model for aerodynamic flows. *Rech. Aerosp.* 1, 5–21.