

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XVII CONGRESO CHILENO DE HIDRÁULICA

CARACTERIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL FLUJO Y TRANSFERENCIA DE MASA EN ZONAS DE RECIRCULACIÓN LATERAL EN CANALES ABIERTOS

WERNHER BREVIS¹
YARKO NIÑO²

RESUMEN

El presente trabajo resume los resultados de mediciones experimentales, en tres niveles de profundidad, realizadas con el fin de caracterizar la estructura del flujo y transporte de masa en una zona de recirculación formada por una cavidad lateral en un canal abierto. Los datos fueron obtenidos por medio de velocimetría por imágenes (rastreo de partículas) y fluorescencia inducida por láser. Para este caso de estudio, se usó una cavidad rectangular de razón de aspecto, largo-ancho, 2 y un flujo turbulento en el canal con números de Reynolds de 26000 y de Froude de 0.24. Los resultados muestran que la estructura del flujo en la zona de recirculación no sufre cambios importantes con la profundidad, excepto en la zona cercana al lecho donde parte de la estructura observada desaparece. El transporte de masa muestra una marcada evolución, este cambio puede ser debido a la variación en la estructura interna de la cavidad o a la influencia de la distribución de velocidad existente en el canal, la cual cambia el gradiente horizontal canal-cavidad en el plano de medición, modificando las estructuras formadas en la interfaz.

¹ Alumno programa de Doctorado en Fluidodinámica, Universidad de Chile.

² Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos 20 años la ecuación de transporte usada en la modelación de calidad de aguas en ríos ha sido modificada, incorporando nuevos componentes que consideran el efecto de las zonas de recirculación, llamadas comúnmente zonas muertas (Bencala & Walters, 1985). La influencia de estas zonas produce diferencias entre las concentraciones medidas en terreno y modeladas por medio de las ecuaciones clásicas. Chapra & Runkel (1999), De Smedt et. al. (-), Czernuszenko & Rowinski, (1997), por mencionar algunos autores, han incorporado el efecto de las zonas muertas considerando un modelo de transferencia de primer orden (Modelo de Almacenamiento Transitorio), con el fin de mejorar los resultados de las ecuaciones clásicas. No obstante, incluso considerando el modelo de zonas muertas, la asimetría de las concentraciones observadas no parecen disminuir como la teoría predice (Nordin & Troutman, 1980).

Shields et al. (1995) presentan resultados de experimentos de restauración fluvial y concluyen la importancia de zonas de circulación desde un punto de vista ecológico. En base a estos antecedentes, es claro que el conocimiento de la estructura del flujo y transferencia de masa en estas zonas puede ser relevante para variadas investigaciones ambientales.

El estudio del flujo en zonas muertas en ríos ha sido desarrollado principalmente en Japón (Nezu, 2005; Muto, 2000), también a partir de investigaciones numéricas (Hanking et. al., 2001), y en una configuración de flujo similar, en términos de patrones generales de circulación, el flujo entre espigones. Investigaciones realizadas por Weitbrecht & Jirka (2001) y Uijtewaal et. al. (2001) para el caso de flujo entre espigones, señalan la posibilidad de usar un modelo de transferencia de masa de primer orden, obtenido por medio de mediciones superficiales. Sin embargo, McCoy et. al. (2005), como conclusión de simulaciones numéricas del tipo “Large Eddy Simulation”, señala que el proceso no muestra un comportamiento puro de primer orden y que además existe un cambio del mismo con la profundidad.

Muto et al. (2000b) como conclusión de experimentos en una cavidad lateral en un canal abierto con razón de aspecto de 1 y 3, muestran que el intercambio de masa para estas cavidades es mayor que para cavidades cuadradas. Este intercambio se debería, principalmente, a inestabilidades en el flujo interno. Además, la región de alta turbulencia se encuentra en la interfaz entre el canal y la cavidad lateral.

Este trabajo presenta la caracterización del flujo en una zona de recirculación rectangular (zona muerta), en tres niveles de profundidad, formada en una cavidad lateral con una razón de aspecto, relación largo-ancho, de 2. La estructura de flujo se caracterizó por medio de señales de velocidad obtenidas por PTV (velocimetría por rastreo de partículas) y el transporte de masa por medio de curvas de concentración obtenidas con LIF (fluorescencia inducida por láser), técnica usada además para visualizar los patrones de flujo e intercambio de masa.

2. DESCRIPCIÓN DE LOS EXPERIMENTOS

Los experimentos se hicieron en un canal de laboratorio de dimensiones 1200 cm de largo, 30 cm de ancho, 30 cm de profundidad, y con una pendiente longitudinal de 0.001. Una reducción del ancho de 10 cm fue instalada a lo largo de un lado del canal y una cavidad rectangular fue posicionada 300 cm aguas arriba del fin del canal. Una representación esquemática de la instalación se muestra en la Figura 1. Las condiciones hidráulicas para el experimento, profundidad (H), caudal (Q), velocidad media (U), radio hidráulico (R), números de Reynolds ($Re=UH/\nu$) y de Froude ($Fr = U/(gH)^{1/2}$), se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Condiciones hidráulicas de los experimentos

H (cm)	Q (cm ³ /s)	U (cm/s)	R(cm)	Re	Fr
10,7	7800	24,4	6,25	26000	0,24

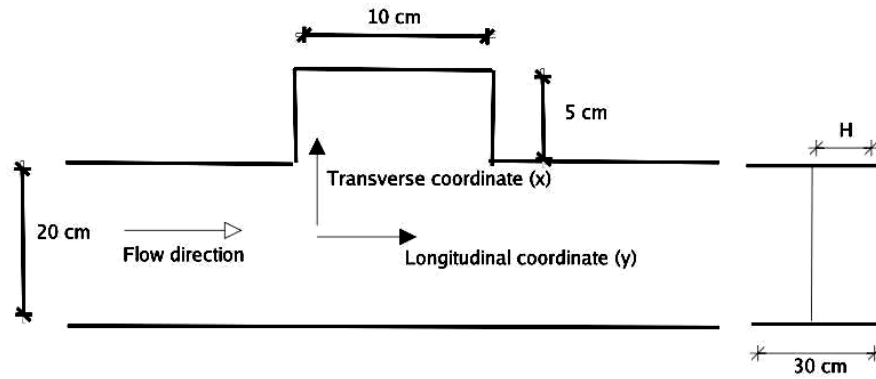


Figura 1. Representación esquemática de la instalación.

Las dimensiones de la cavidad usada fueron: 10 cm de largo (L) y 5 cm de ancho (w). Consecuentemente, la razón de aspecto fue $L/w=2$. Esta configuración fue elegida debido a que presenta mayores similitudes a zonas muertas en ríos que cavidades profundas (razones de aspecto menor a 2) y también muestra algunos aspectos típicos del flujo entre espigones, flujo de interés desde un punto de vista de ingeniería de ríos (Weitbrecht et al. (2002), Uijtewaal et. al. (2001). Este tipo de zonas de recirculación (cavidades de razón de aspecto 2) presentan un intercambio de masa más alto que cavidades de razón de aspecto 1 y el proceso de intercambio de masa es dominado por varias inestabilidades, en cambio en el caso de cavidades profundas el intercambio es gobernado por el vórtice principal generado (Shankar & Deshpande, 2000). Dos técnicas experimentales, PTV y LIF, fueron usadas en tres distintos planos horizontales de la cavidad, ubicados en distintas profundidades, 20, 60 y 100 mm, por encima del lecho de canal, con la finalidad de describir la variación del transporte de masa y de la estructura del flujo con la profundidad. Para las dos técnicas se usó una luz láser de dos colores con 400 MW de potencia y una cámara digital de 30 Hz. El PTV se usó debido a la sensibilidad de la estructura del flujo dentro de la cavidad a perturbaciones externas, un fenómeno observado por Nezu et al. (2005) en una cavidad rectangular, también de razón de aspecto 2, lo cual hizo imposible el uso de un sensor ADV. Para el PTV se usaron partículas acrílicas como trazadores y para LIF una tinta verde fluorescente. El análisis de la información entregada por las imágenes se hizo mediante un

software computacional desarrollado para estos efectos y basado en algoritmos existentes. Una descripción general de esta metodología se da en la siguiente sección.

2.1 Velocimetría por imágenes (*Particle Tracking Velocimetry, PTV*)

Este método se usó para determinar la estructura del flujo. Su característica principal es que la información puede ser obtenida desde cada partícula trazadora presente en el flujo; una clara diferencia con *Particle Image Velocimetry* (PIV) donde la información es promediada sobre un grupo de partículas. PTV entrega información de velocidad a lo largo de la trayectoria de las partículas, esto es en un esquema Lagrangeano de referencia, y difiere de PIV porque la velocidad es medida en ubicaciones aleatorias en vez de sobre una malla regular (Cenedese & Querzoli, 1997). La determinación del campo de flujo se obtuvo por medio de la aplicación de un algoritmo dinámico, binario, espacial, basado en la correlación cruzada entre dos imágenes secuenciales, algoritmo propuesto por Hassan et al. (1992). A partir de la distribución aleatoria de partículas, se obtiene el campo de velocidades sobre una malla regular por medio de interpolación. En base a los resultados obtenidos por David et. al. (2002), el método de ponderación con el inverso de la distancia usando una ventana adaptiva Gaussiana fue empleada para la interpolación. Como conclusión, David et al. (2002) subraya que este método da resultados confiables para altos gradientes de velocidad. El algoritmo implementado se probó en datos sintéticos obtenidos mediante la implementación computacional de flujo inviscido alrededor de un cilindro (Hassan et. al., 1992) y usando imágenes estándar proveídas por la Sociedad de Visualización del Japón. Los vectores erróneos, menores que el 10 %, fueron eliminados usando un filtro de correlación y filtros de dirección-magnitud. Musalem (1999) basado en análisis dimensional y Valdés (1995) basado en la propagación de errores del método PTV, concluyeron que en las mediciones de velocidad y vorticidad los errores del método son del orden del 15 % y 20 % respectivamente, y para reducirlos el nivel de *threshold* tiene que ser tomado cuidadosamente y la densidad de partículas en el flujo debe ser alta.

Las mediciones fueron desarrolladas para una única condición hidráulica, siendo registrados 1000 pares de imágenes para planos ubicados a 20, 60 y 100 mm sobre lecho de canal.

2.2 Fluorescencia inducida por laser (*Laser Induced Fluorescence, LIF*)

Para evitar variaciones en las condiciones de luz ambiental, se construyó una cámara oscura en el área de trabajo. Con el objetivo de encontrar la relación entre intensidad de luz en las imágenes y la concentración de trazador en el flujo, diferentes concentraciones conocidas fueron iluminadas por láser y la intensidad de luz reflejada fue medida con la cámara de video. La curva de calibración resultante se usó para la determinación del campo de concentración en la cavidad a partir de mediciones de intensidad de luz reflejada por el flujo. La concentración media se obtuvo promediando el campo de concentración en el área de la zona de recirculación.

3. ESTRUCTURA DEL FLUJO

Las series de tiempo de campos de velocidad obtenidos de las imágenes de video fueron promediados para obtener una descripción de las propiedades medias dentro de la cavidad. En esta sección se presentan y analizan los campos de velocidad y cantidades derivadas.

3.1 Campo de Velocidad

El campo de velocidad promediado sobre todas las componentes de la serie de imágenes son presentados en las Figuras 2, 3 y 4. Tal como en resultados anteriores obtenidos por Weitbrecht (2001) y Uijtewaal (2001) para espigones y Muto et al. (2000a) para áreas de recirculación, es posible identificar un sistema de dos vórtices. El principal (rotación antihoraria) que ocupa tres cuartos del área de la cavidad es inducido por el flujo del canal principal y el secundario (rotación horaria) por el primario. El núcleo del vórtice primario (velocidad casi cero) no cambia su posición en los tres niveles. Es también posible reconocer una zona de velocidad alta en la interfaz de los dos vórtices. La región de baja velocidad es de mayor extensión a 20 mm del fondo. En general, la magnitud de velocidad no tiene cambios importantes con la profundidad y el máximo de esta variable es cerca de 6 veces menor que la velocidad media del canal principal. Del campo de vectores es posible identificar la zona de ingreso de fluido en los tres niveles, ubicada en el vértice de aguas abajo.

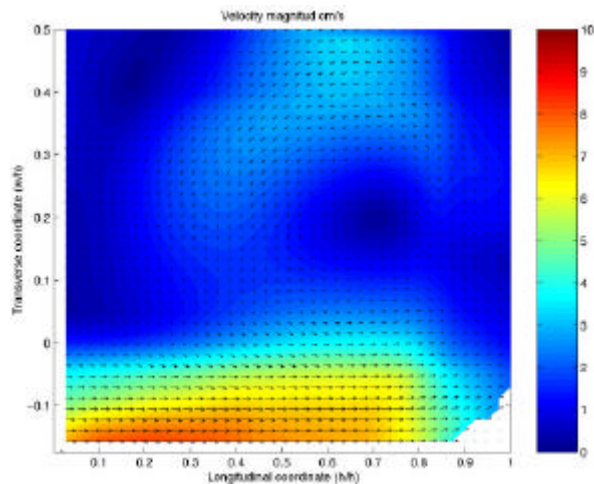


Figura 2: Campo de velocidad a 100 mm.
(Escala entre 0 cm/s, azul, y 10 cm/s, rojo)

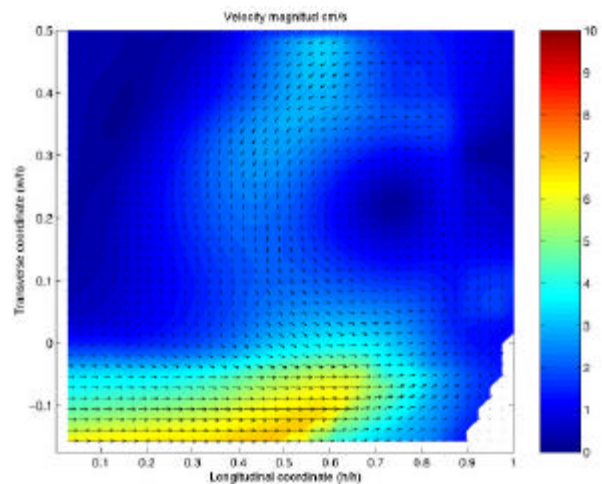


Figura 3: Campo de velocidad a 60 mm.
(Escala entre 0 cm/s, azul, y 10 cm/s, rojo)

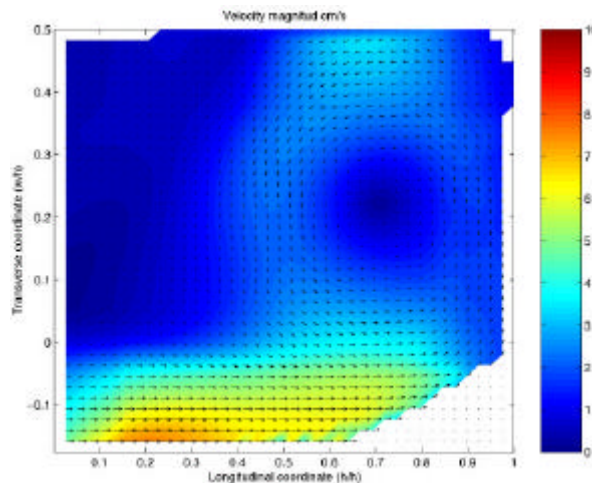


Figura 4: Campo de velocidad a 20 mm.
(Escala entre 0 cm/s, azul, y 10 cm/s, rojo)

3.2 Vorticidad

Los campos de vorticidad se pueden ver en las Figuras 5, 6 y 7. Una comparación entre los tres niveles muestra que el cambio principal en vorticidad se produce en la región de baja velocidad (zona de aguas arriba). A menor profundidad es posible reconocer un desplazamiento de la magnitud de vorticidad en dirección hacia la interfaz. Por otro lado, hay una zona de alta vorticidad en la interfaz, producida por la capa de corte entre cavidad y canal, y también entre el vórtice primario y la pared del canal, debido principalmente al alto gradiente de velocidad producido por la zona de alta velocidad, descrito anteriormente.

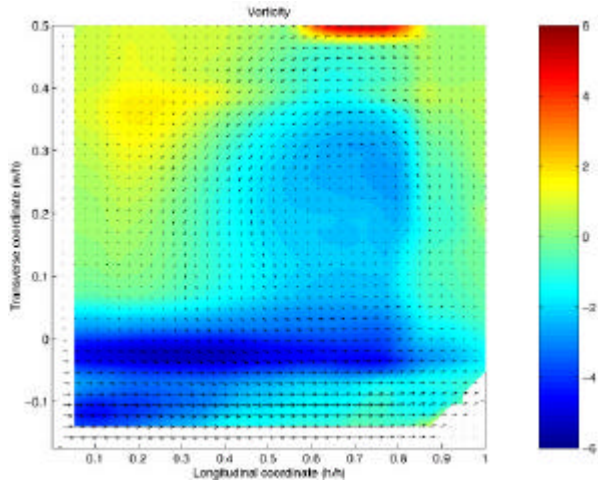


Figura 5: Campo de vorticidad a 100 mm.
(Escala entre -6, azul, y 6, rojo)

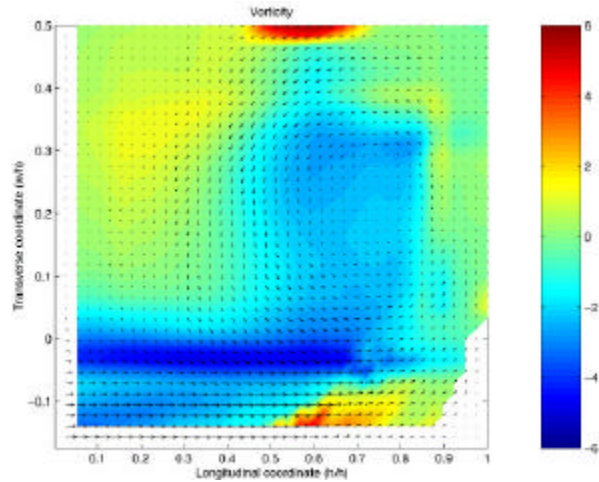


Figura 6: Campo de vorticidad a 60 mm.
(Escala entre -6, azul, y 6, rojo)

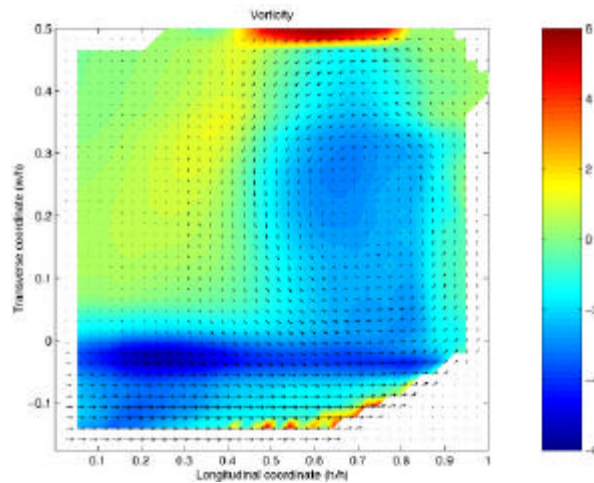


Figura 7: Campo de vorticidad a 20 mm.
(Escala entre -6, azul, y 6, rojo)

3.3 Líneas de Corriente

Las líneas de corriente muestran que hay una evolución del vórtice secundario con la profundidad, el cual desaparece a los 20 mm sobre el fondo. El vórtice primario, que cambia ligeramente su tamaño con la profundidad, permite cambios de estructura en la región de baja

velocidad. Es posible ver que una parte del vórtice principal está ubicado fuera de la cavidad. Las líneas de corriente para los distintos niveles se muestran en la Figura 8.

3.4 Intensidades Turbulentas

Las Figuras 9a, 9b y 9c muestran las intensidades turbulentas para la señal de velocidad transversal. Es claro que los altos niveles de turbulencia están ubicados en la interfaz canal-cavidad y en el vértice de aguas abajo. La magnitud más alta está ubicada a los 60 mm sobre el fondo, en la región de aguas abajo, donde los vectores de velocidad muestran que existe un ingreso de fluido proveniente del flujo principal en el canal. Por otro lado, la actividad de turbulencia más baja se observa para 100 mm. Las Figuras 10a, 10b y 10c muestran la intensidad turbulenta de la señal de velocidad longitudinal. Esta es similar en todos los casos, pero ligeramente más alta para 60 mm. Comparando las intensidades transversales y longitudinales es posible concluir que la fluctuación transversal toma un rol relevante en intercambio de masa, lo cual está de acuerdo con las conclusiones propuestas por Muto et al. (2000b).

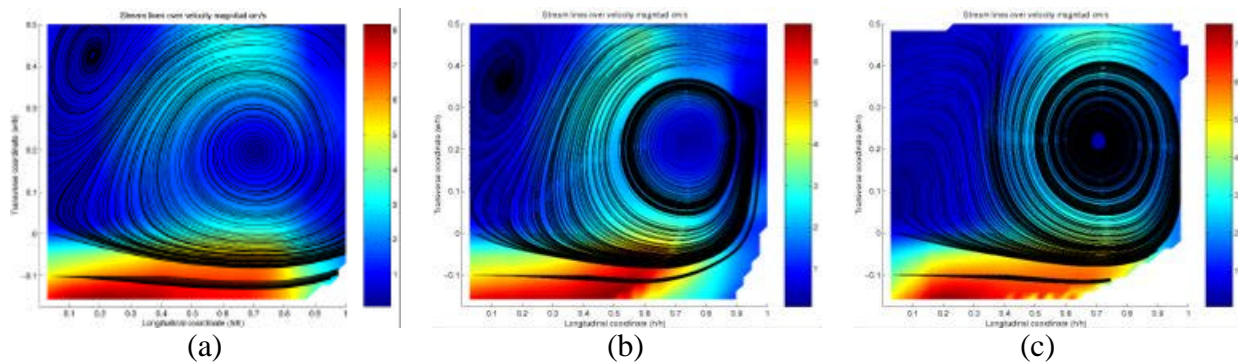


Figura 8: Líneas de corriente sobre magnitud de velocidad (Escala entre 0 cm/s, azul, y 10 cm/s, rojo): (a) 100 mm, (b) 60 mm, (c) 20 mm

4. VISUALIZACIÓN

Con el objetivo de comprender la estructura del flujo cualitativamente y cuantitativamente, se analizó conjuntamente la información proveniente de las partículas usadas para la velocimetría por imagen y de la fluorescencia inducida por láser. Las principales estructuras, la dinámica del flujo y su relación con el transporte de masa son presentados en esta sección.

4.1 Interfaz Cavidad–Canal, Inestabilidad Primaria de Kelvin-Helmholtz

Debido al alto gradiente de velocidad localizado en la interfaz cavidad-canal se forma una inestabilidad del tipo Kelvin-Helmholtz (ver Figura 11). Estas estructuras son responsables del intercambio de masa entre la cavidad y canal (Garrison & Rogers, 1994; Uijtewaal et. al., 2001), este tipo de inestabilidades dependen de la diferencia de velocidad entre la cavidad y canal, esto significa que diferencias en la estructura vertical de flujo en el canal puede afectar el intercambio de masa a distintas alturas sobre el fondo. Siguiendo a Nezu (1993), la distribución media de velocidad en el canal puede ser determinada por medio de una relación logarítmica, la cuál en la región cercana a las paredes presenta un menor valor que en la región de flujo libre. Las mediciones tomadas a 20 mm están en la región de influencia de las paredes y, como conclusión,

la velocidad media del flujo del canal a ese nivel es inferior a las velocidades medias a 60 y 100 mm.

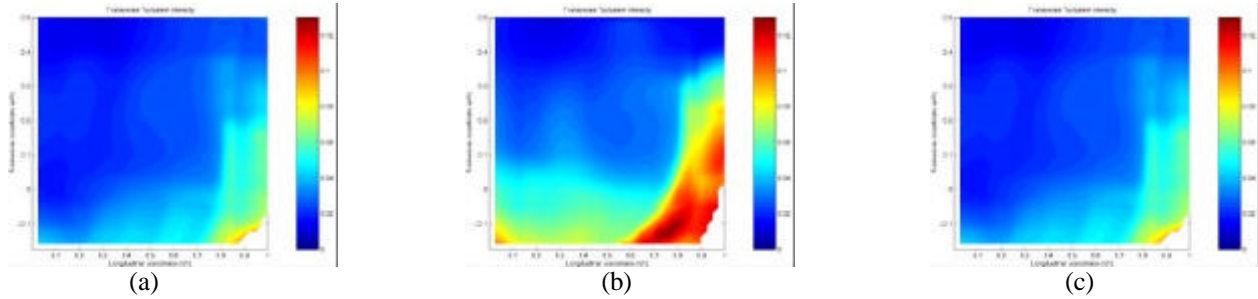


Figura 9: Intensidades turbulentas transversales (Escala entre 0, azul, y 0,12 rojo) : (a) 100 mm, (b) 60 mm, (c) 20 mm.

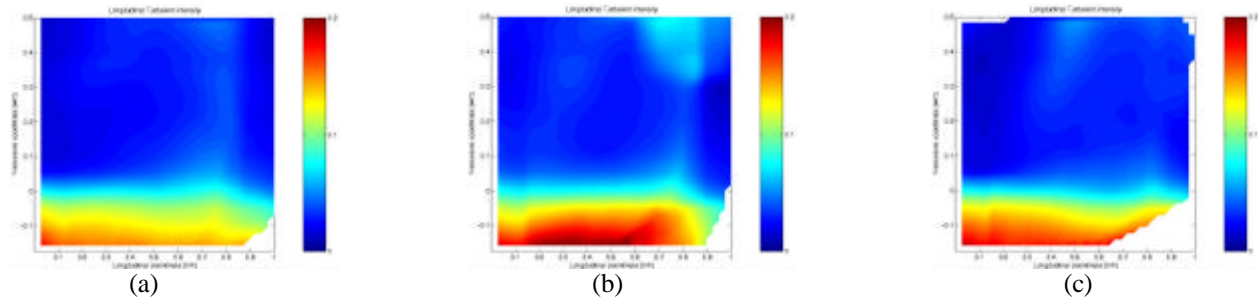


Figura 10: Intensidades turbulentas longitudinales (Escala entre 0, azul, y 0,2 rojo): (a) 100 mm, (b) 60 mm, (c) 20 mm.

En general, la inestabilidad de Kelvin-Helmholtz permite el intercambio de masa desde la cavidad hacia el canal por medio de patrones convectivos llamados *Kelvin Cats Eyes* (KCE) y desde el canal a la cavidad por medio del proceso denominado *engulfing*. Estas estructuras coherentes serán descritas más adelante. La velocidad de transporte de los KCE puede ser estimada del análisis de las imágenes de video. Para cada nivel, la velocidad de advección de estas estructuras es aproximadamente 3 veces menor que la velocidad media del canal. El periodo de generación a 100 mm es aproximadamente 1.1 s, a 60 mm 0.7 s y a 20 mm, también 0.7 s. La principal diferencia encontrada es el tamaño de las estructuras.

4.2 Vórtices primario y secundario. Líneas de Trayectoria

Las Figuras 12a, 12b, 12c muestran una secuencia de imágenes, obtenidas por medio de la superposición de cuadros tomados para las mediciones por PTV. Estas figuras muestran que los resultados obtenidos por PTV representan el movimiento de las partículas dispuestas en la cavidad. Es posible reconocer el vórtice primario y el secundario, así como la región de corte interna entre ellos. Del análisis, fue posible detectar un desplazamiento de ambos vórtices en el tiempo, lo cual constituye un importante efecto en la perturbación general de la interfaz ya que genera estructuras KCE de mayor tamaño y por tanto permiten un mayor intercambio de masa entre el canal y la cavidad. En la Figura 12c es posible ver algunas partículas dejando la cavidad en la zona media de la interfaz, esta región corresponde a la zona de salida de soluto desde la cavidad y fue observada también en los videos de LIF. Otra importante observación es la dirección que adoptan las partículas que abandonan la interfaz entre vórtices; una parte se dirige

hacia el secundario, otra parte hacia el vértice de aguas abajo y el resto permanece dentro o deja el vórtice principal.

4.3 Interfaz de Vórtices Primario y Secundario

En las imágenes obtenidas por LIF se observó una segunda inestabilidad de Kelvin Helmholtz. Esta estructura, y como consecuencia nuevos KCE que aparecen en la interfaz entre ambos vórtices, pueden ser apreciados en la Figura 14 (d). La importancia de esta estructura secundaria en el intercambio de masa entre vórtices es similar a la relación canal-cavidad, y por tanto, el vórtice secundario puede ser visto como una nueva zona de recirculación al interior de la cavidad.

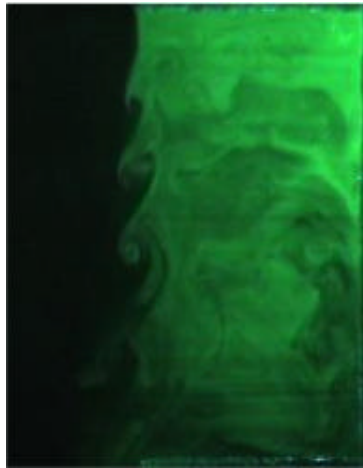


Figura 11: Inestabilidad de Kelvin-Helmholtz en la interfaz cavidad-canal.



(a)

(b)

(c)

Figura 12: Trayectorias para 100 mm: (a) $t=0$ s; (b) $t=0.33$ s; (c) $t=1.33$ s.

4.4 Engulfing

Este proceso es el principal responsable del ingreso de masa a la cavidad. Cuando los KCE son transportados, impactan el vértice de aguas abajo en la cavidad, encerrando fluido proveniente del canal, incorporándolo a la cavidad. La dinámica es presentada en la Figura 13. Este proceso toma relevancia cuando una perturbación actúa sobre la capa de corte, ya que en ese caso el tamaño de

los KCE aumenta y produce un pulso de fluido dentro de la cavidad que modifica la estructura del vórtice secundario. Del análisis de los video de LIF, se concluye que el proceso de *engulfing* es menor a 20 mm y similar a 60 y 100 mm del fondo.

4.5 Relación entre el pulso de flujo y vórtice secundario

Una dinámica intermitente fue observada en la cavidad (Figura 14). Como fue mencionado anteriormente, cuando el tamaño de los KCE aumenta, un pulso de fluido es conducido al interior de la cavidad y, dependiendo de la intensidad del vórtice secundario, éste va hacia aguas arriba empujando la inestabilidad secundaria de Kelvin Helmholtz y produciendo, al mismo tiempo, un aumento de rotación en el secundario y en el intercambio de masa entre ambos vórtices.

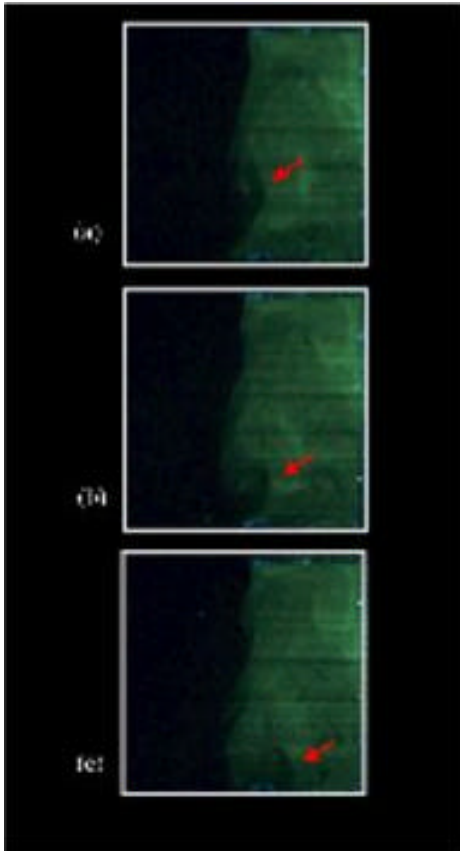


Figura 13: Mecanismo de engulfing.

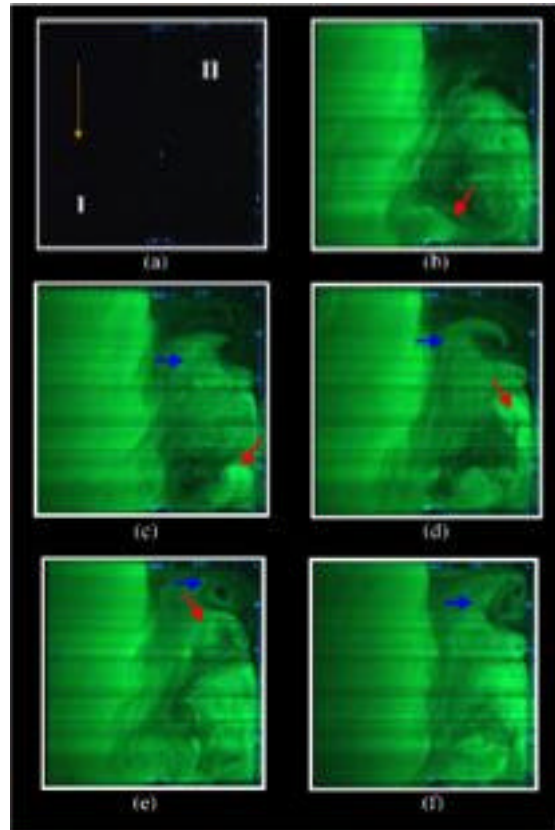


Figura 14: Relación entre engulfing y vórtice secundario (a) I:canal, II:cavidad; (b) $t=0$ s; (c) $t=0.63$ s; (d) $t=1.27$ s; (e) 2.13 s; (f) $t=3.6$ s.

5. TRANSFERENCIA DE MASA

En esta sección se presenta los resultados obtenidos por medio de fluorescencia inducida por láser. Usando imágenes de video y una calibración previa, fue posible obtener campos de concentración instantáneos y la concentración media al interior de la cavidad para los 3 niveles.

5.1 Dinámica de intercambio de masa

Como fue mencionado anteriormente, el rol del vórtice secundario dentro de la cavidad es análogo al de la cavidad en el canal. El intercambio de masa entre canal y vórtice principal es alto comparado con el intercambio entre los vórtices. De acuerdo a Weitbrecht & Jirka, (2001) el intercambio de masa entre los vórtices secundarios y primarios es lento comparado al que se realiza entre el vórtice primario y el flujo principal en el canal.

El intercambio de masa entre el canal y el vórtice principal se debe a la inestabilidad de Kelvin Helmholtz. Los mecanismos de intercambio de masa se deben, por su parte, al proceso de difusión en los KCE, y a la relación intermitente entre la interfaz y los desplazamientos del vórtice principal. Este último proceso ha sido observado anteriormente por Strang & Fernando (2004) y Uijtewaal et.al. (2001) quienes señalan que es el mecanismo más importante. De acuerdo con éstos últimos, el flujo está lejos de ser estacionario y las grandes estructuras turbulentas de la interfaz juegan un rol importante en el proceso de intercambio. El proceso de difusión es rápido, pero no permite un alto volumen de intercambio. Por otra parte, las perturbaciones de la interfaz aumentan el proceso de *engulfing* y paralelamente permiten que un importante volumen de fluido abandone la cavidad.

Una distribución instantánea de concentraciones en la cavidad es mostrada en la Figura 15 y explica la idea de zonas muertas al interior de ella. Las Figuras 16a, 16b y 16c muestran el rápido mecanismo de difusión en los KCE.

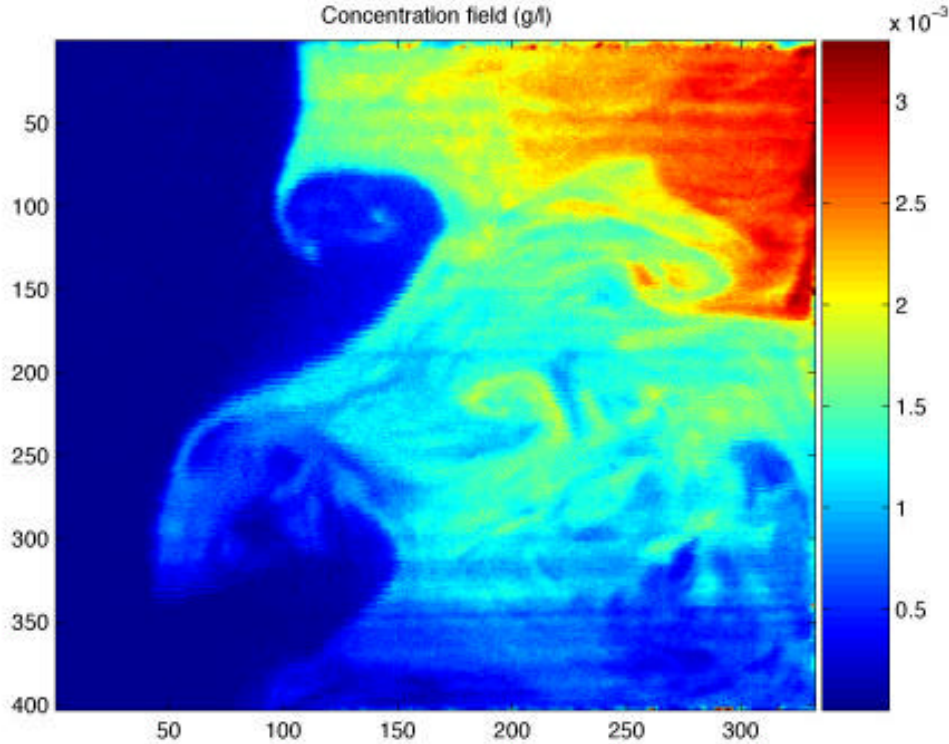


Figura 15: Campo de concentración instantáneo en 60 mm.

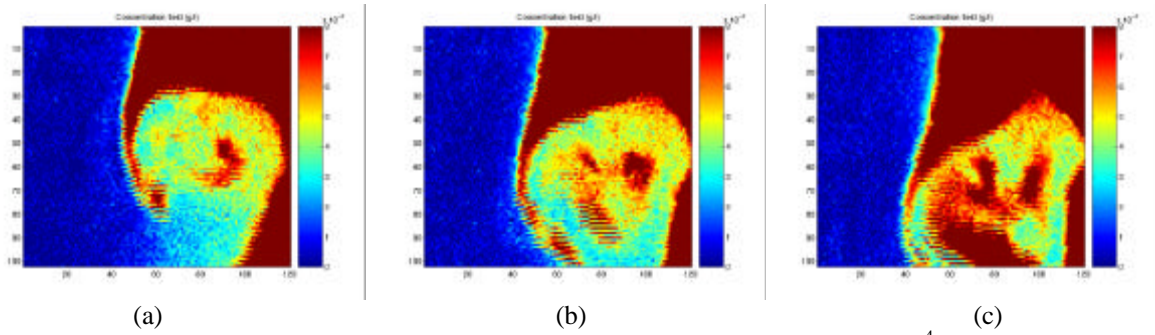


Figura 16: Detalle de mezcla en KCE (Escala entre 0 g/l, azul, y $>8 \cdot 10^{-4}$ g/l, rojo) (a) $t=0$ s. (b) $t=0.066$ s. (c) $t=0.133$ s.

5.2 Mediciones del Campo de Concentración

Usando los resultados de LIF se calculó la evolución temporal de la concentración media en la cavidad a distintas alturas sobre el fondo (Figura 17). Se observa que la menor tasa de intercambio toma lugar a 20 mm, lo que puede ser explicado por la menor magnitud de la velocidad del canal a ese nivel (por influencia del lecho), la cual es responsable de las estructuras presentes en la interfaz (KCE) o por las variaciones internas de la estructura en la cavidad.

La similitud de la curva de concentración media versus tiempo en la cavidad con curvas equivalentes medidas en ríos resulta sorprendente y reafirma la idea de que el intercambio de masa entre la cavidad y el canal está condicionado por la presencia de zonas muertas al interior de la primera.

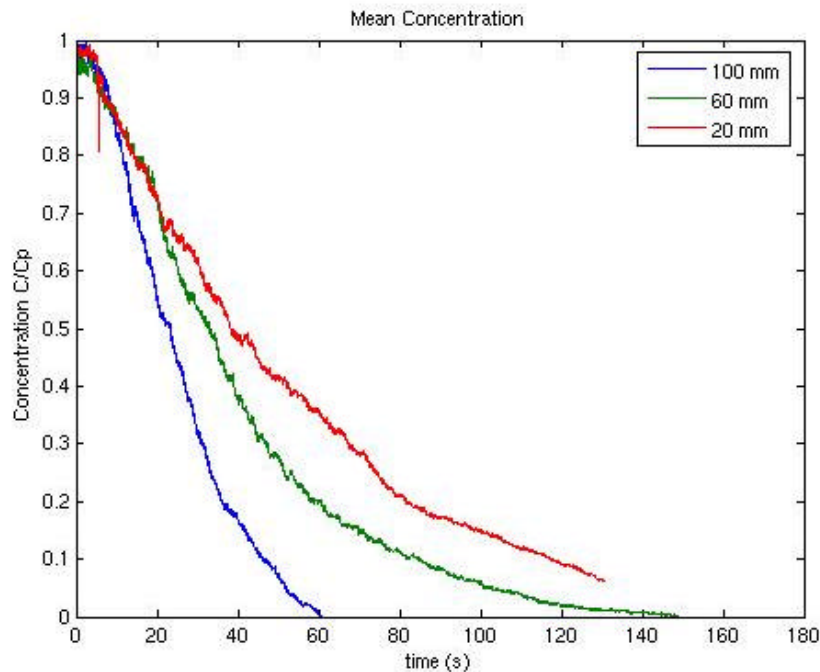


Figura 17: Concentración promedio en la cavidad para los 3 niveles, (Cp: Concentración peak)

6. CONCLUSIONES

En base a los resultados de velocimetría por imágenes y de fluorescencia inducida por láser, se puede observar que la estructura del flujo al interior de la cavidad en lo niveles superiores permanece relativamente constante, existiendo marcadas diferencias en la zona cercana al lecho, ya que el vórtice secundario observado desaparece. Existen 2 zonas principales dominadas por un vórtice primario y uno secundario. La principal dinámica turbulenta esta localizada en la interfaz canal–cavidad, donde se genera una inestabilidad de Kelvin-Helmholtz. Esta estructura es responsable del principal mecanismo de intercambio de masa desde el canal hacia la cavidad, que corresponde al proceso de *engulfing*. El intercambio desde la cavidad hacia el canal se desarrolla por medio de las estructuras presentes en la inestabilidad de Kelvin-Helmholtz, pero principalmente debido a las inestabilidades internas que modifican el tamaño de dichas estructuras. Además, se encontró una relación entre el proceso de *engulfing* y el vórtice secundario. Se observó que las tasas de transferencia de masa evolucionan con la profundidad, lo cual indica que el uso de mediciones superficiales debe ser evaluado para determinar su confiabilidad. La variación puede ser explicada por medio de la modificación de la estructura interna o por el perfil vertical de velocidad media en el canal, el cual hace variar el corte en la interfaz canal–cavidad, modificando las estructuras en la interfaz, y aumentando el proceso de intercambio para niveles más cercanos a la superficie libre.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer el financiamiento del proyecto Fondecyt N° 1040494 y al programa de becas de la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica, CONICYT.

REFERENCIAS

- Bencala, K & Walters, R. 1985. Simulation of solute transport in a mountain pool-and-riffle stream: A transient storage model. *Water resources research* 19, 305-317.
- Brevis, W., Vargas, J., Debels, P. & Link, O. 2001. Efecto de las zonas de almacenamiento transitorio en la modelación de la demanda bioquímica oxígeno: Aplicación al río Chillán, Chile. *Memorias del congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica*. Pp. 119-129.
- Cenedese, A. & Querzoli, G. 1997. Lagrangian statistics and transient matrix measurements by PTV in a convective boundary layer. *Meas. Sci. Technol.* 8, 1553-1561.
- Chapra, S. & Runkel, R. 1999. Modeling impact of storage zones on stream dissolved oxygen. *Journal of environmental engineering* 125, 415-419.
- Czernuszenko, W & Rowinski, P. 1997. Properties of the dead-zone model of longitudinal dispersion in rivers. *Journal of Hydraulics Research* 35 491-504.

David, L. Esnault, A. & Callaud, D. 2002. Comparison of interpolation techniques for 2D and 3D velocimetry. 11th. International Symposia on Application of Laser techniques to Fluid Dynamics, Lisboa, Portugal.

De Smedt, F. Brevis, W. & Debels, P. Analytical solution for solute transport in streams with transient storage in dead zones. Aceptado para publicación en el Journal of Hydrology.

Garrison, B. & Rogers, C. 1994. An experimental study of enhanced fluid transfer mechanism between a channel and a cavity. Physics of Fluids 6, 421-423.

Hassan, Y., Blanchat, T. & Seeley, Ch. 1992. PIV flow visualization using particle tracking techniques. Measurement science technology 3, 633-642.

Kossef, J. & Street, R. 1984 Visualization of a shear driven three-dimensional recirculating flow. Journal of fluids Engineering 106, 21-29.

McCoy, A., Constantinescu, G. & Weber, L. 2005. Coherent structures and mass exchange processes in channel flow with spanwise obstruction. A ser presentado en el ERCOFTAC. International Symposium on Engineering Turbulence Modeling and Measurements, Sardinia, Italy.

Musalem, R. 1999. Medición de campos de velocidades instantáneas en canales mediante procesamiento de imágenes.

Muto, Y., Imamoto, H. & Ishigaki, T. 2000a. Turbulence characteristics of a shear flow in an embayment attached to a straight open channel. Advances in Hydro-science and Engineering, Seoul Korea.

Muto, Y., Imamoto, H. & Ishigaki, T. 2000b. Velocity Measurements in a straight open channel with a rectangular embayment. Proceedings 12th APD-IAHR, Bangkok Thailand.

Nezu, I. & Nakagawa. 1993. Turbulence in open-channel flows. IAHR Monograph Series.

Nezu, I, Yano, M, & Mitsunari, Y. 2005. Hydrodynamic and concentration properties in permeable-side-cavity open-channel flow by digital visualization technique. Environmental hydraulics and sustainable water management II, 1617-1623.

Nordin, C. & Troutman, B. 1980. Longitudinal dispersion in rivers: The persistence of skewness in observed data. Water Resources Research 16, 123-128.

Shankar, P & Deshpande, M. Fluid mechanics in the driven cavity. Annual review of Fluid Mechanics. 32 93-136.

Shen, C. & Floryan, J. 1985. Low Reynolds number flow over cavities. Physics of Fluids 28, 3191-3202.

Shields, D., Cooper, C. & Knight, S. 1995. Experiments in stream restoration. *Journal of Hydraulics Engineering*. 121, 494-502.

Strang, E. & Fernando, H. 2004. Shear induced mixing and transport from a rectangular cavity. *Journal of Fluids Mechanics*. 520 23-49.

Uijtewaal, W., Lehman, D. & A.,M. 2001 Exchange process between a river and its groins fields: Model experiments. *Journal of Hydraulics Engineering*. 127, 928-936.

Valdés, I.1995. Habilitación de una instalación experimental y del sistema de adquisición y procesamiento de datos para el estudio de estructuras turbulentas en canales. Memoria de título, Dpto. de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

Weitbrecht, V. & Jirka, G. 2001. Flow patterns in dead zones of rivers and their effect on exchange processes. *Proceeding of 2001 International Symposium on Environmental Hydraulics*.

Weitbrecht, V.Kuhn, G. & Jirka, G. 2002. Large scale piv-measurements at the surface of shallow water flows. *Flow measurements and instrumentation*. 13, 237-245.