

**SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**  
**XXIV CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**

**DESCRIPCIÓN DEL FLUJO EN UNA  
CAVIDAD LATERAL SUMERGIDA**

**LUCIANO HERGENREDER.<sup>1</sup>**  
**WERNHER BREVIS.<sup>2</sup>**  
**ÁNGEL PALACIOS.<sup>1</sup>**

**RESUMEN**

En el presente trabajo se realiza una descripción de los patrones de flujo formados en las cercanías de una cavidad lateral cuadrada sumergida, para cuatro relaciones de sumergencia. Se analizaron series de velocidad obtenidas por medio de la técnica de velocimetría por imágenes 2D en un plano horizontal ubicado a la mitad de la altura de la cavidad, a partir de las cuales se obtuvieron valores medios y estadísticas turbulentas. Los resultados permiten observar una modificación en la forma y posición de la recirculación interior. Adicionalmente, para los casos de mayor profundidad se produce un aumento de la actividad turbulenta en el interior de la cavidad y una modificación en la forma de intercambio de cantidad de movimiento en la interfaz vertical.

---

<sup>1</sup>Estudiante de Doctorado en Cs. de la Ingeniería, Departamento de Ing. Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile. lhergenreder@uc.cl

<sup>2</sup>Profesor Asociado, Departamento de Ing. Hidráulica y Ambiental y Departamento de Ing. en Minería, Pontificia Universidad Católica de Chile

## 1. INTRODUCCIÓN

Los flujos someros fluviales están normalmente sujetos a inhomogeneidades morfológicas que pueden generar estructuras de flujo complejas. En caso de cambios laterales considerables de la sección transversal, se pueden formar grandes y lentos volúmenes de recirculación de fluido: las zonas muertas someras. Estas zonas tienen efectos importantes en el transporte de sustancias disueltas y en el transporte de sedimentos que ocurren por los cauces. Adicionalmente, son creadas artificialmente para estimular el crecimiento de las especies acuáticas (Reynolds et al., 1991; Shields, 1995; Nakano y Nakamura, 2006), crear recintos de atraque en cursos fluviales (dársenas) o para evitar la erosión de márgenes (espigones). Actualmente, en estas configuraciones no es posible predecir completamente la estructura de flujo y los efectos sobre el transporte de masas, debido a la falta de conocimiento de su dinámica, su dependencia de la geometría local y las características del flujo entrante. Este trabajo tiene como objetivo mejorar la comprensión de la dinámica de flujo tridimensional de las zonas muertas poco profundas.

Durante condiciones normales el flujo en zonas muertas puede ser clasificado como casi bidimensional (2D); sin embargo bajo condiciones de crecida fluvial, pueden aparecer importantes características tridimensionales (3D). Estas estructuras 3D pueden tener implicaciones importantes para el diseño de ingeniería, así como para la comprensión de la dinámica de procesos ecológicos. Actualmente existe una importante falta de información de la variación espacial de las propiedades turbulentas 3D y de las estructuras de flujo interno, especialmente cerca del fondo donde las características de la turbulencia adquieren influencia en los procesos ecológicos y de erosión. Debido a la gran cantidad de configuraciones geométricas de las zonas muertas, este trabajo se centrará en un subtipo simple pero fundamental: zonas muertas rectangulares individuales, (Brevis et al., 2006; Nezu et al., 2004; Muto, 2000), también denominadas cavidades laterales (Mignot et al., 2016; Mignot et al., 2017; Mignot et al., 2019; Sanjou y Nezu, 2017). Particularmente dentro de ellas, se analizará una disposición cuadrada (Figura 1).

Aunque las características geométricas de las zonas muertas rectangulares son simples, el flujo en estas zonas es muy complejo, caracterizado por la interacción de escalas turbulentas de distintos tamaños. La disposición individual de estas configuraciones propicia que las características del flujo de aguas arriba sean relativamente permanentes, un caso totalmente diferente al de las secuencias de zonas muertas, donde las condiciones entrantes son inestables (forma y ángulo de ataque) debido al flujo desarrollado en la zona muerta de aguas arriba. Tal como se muestra en la Figura 1, se pueden formar zonas muertas simples someras en dos condiciones de flujo: el caso emergido y el sumergido. El caso emergido ocurre cuando la superficie del agua se encuentra por debajo de la altura máxima de la zona muerta ( $H$ ), siendo el sumergido el caso contrario.

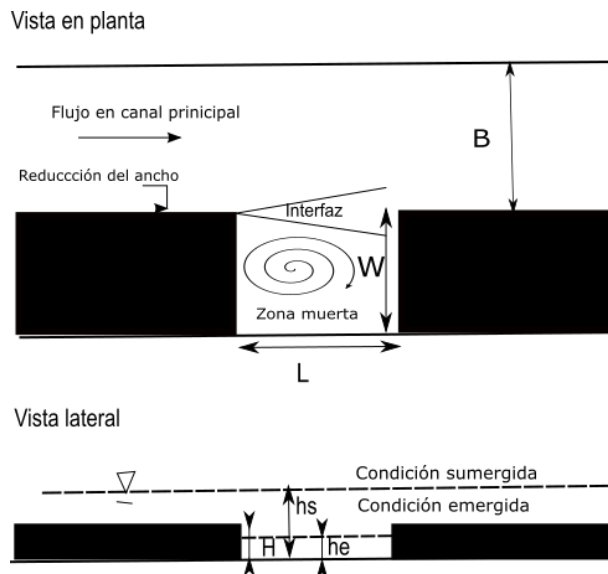
Existe en la bibliografía una amplia variedad de análisis abocados al estudio de las características hidrodinámicas de zonas muertas laterales rectangulares emergidas de diferentes configuraciones (Mignot et al., 2016; Mignot et al., 2017; Mignot et al., 2019; Sanjou y Nezu, 2017). El mecanismo que domina la dinámica del flujo está compuesto por la existencia de una capa de mezcla desarrollada desde la esquina exterior de aguas arriba de la cavidad, de modo que los vórtices se trasladan por la interfaz hasta impactar y dividirse, en la zona de aguas abajo. Adicionalmente, dependiendo de la geometría de la cavidad, se observan estructuras vorticosas de gran escala que

ocupan la mayor parte del volumen de la zona muerta. En conjunto a estas recirculaciones se presentan otras menores, ubicadas en las cercanías de las esquinas interiores. Mignot et al. (2019) analiza experimental y teóricamente el tipo y número de recirculaciones que se forman en cavidades laterales para veinte relaciones de aspecto diferentes. En el caso de geometrías cuadradas detecta, en coincidencia con su análisis bibliográfico, la existencia de una única recirculación centrada en la zona muerta.

En general, los análisis referidos a cantidades y estructuras turbulentas se centran en el flujo en los alrededores de la interfaz. Esta zona es de particular interés ya que la capa de mezcla domina el intercambio de cantidades entre la cavidad y el canal principal. En ella, el pasaje de vórtices periódicos de sentidos de rotación contrario produce la existencia de velocidades de ingreso de sentidos alternados (Mignot et al., 2016). Si bien las estadísticas turbulentas son importantes en esta zona, no se aprecian magnitudes similares hacia el interior de la cavidad.

Actualmente no existe información respecto a la estructura de zonas muertas sumergidas individuales, sin embargo algunos patrones de flujo relativamente cercanos a esta configuración han sido reportados en la literatura y por tanto su descripción puede ser relevante para la interpretación de resultados. En esta configuración de flujo, pero para el caso de campos de espigones fluviales, se ha observado que el impulso transferido por el flujo que pasa sobre la parte superior de la zona muerta modifica por completo los patrones de circulación y, como resultado, el flujo se vuelve completamente 3D (Uijttewaal et al., 2001). Debido a la complejidad del escurrimiento, la predicción de los efectos sobre el transporte de masas es mucho más complicada que para el caso emergido. Uijttewaal (2005) estudió experimentalmente el efecto de la geometría de un espigón, la forma y el nivel de sumergencia sobre la estructura de la zona muerta. Los resultados señalan que reducir el gradiente de velocidad transversal de la capa de corte interfacial no es suficiente para producir un flujo estable y suave con una baja intensidad de turbulencia. Además se mostró que la velocidad de la corriente principal no tiene ningún efecto cualitativo en el patrón de flujo, mientras que la disminución del nivel del agua sí. Resultados similares fueron obtenidos por Brevis et al. (2008) basado en mediciones de la estructura de flujo en campos de espigones en diferentes planos verticales para tres números de Reynolds diferentes ( $Re$ ). Los resultados mostraron fuertes movimientos 3D en la parte aguas arriba de la zona muerta, que no pueden describirse cuantitativamente usando velocimetría 2D estándar. Muto et al. (2006) basado en mediciones de campo para condiciones de inmersión somera y profunda, informó que el flujo era muy complejo y mostraba fuertes patrones 3D en ambos casos. En el caso sumergido poco profundo fue posible reconocer una recirculación vertical y en el caso sumergido profundo se observó una corriente cerca del fondo en dirección al canal principal. Este intercambio se debió a una estructura similar a un giro con eje horizontal en la dirección de la corriente, sin evidencia de la circulación horizontal del caso emergente. Debido a la técnica experimental utilizada para Muto et al. (2006) los resultados se limitan a la descripción de los patrones de circulación grandes sin información de estructuras inestables y movimiento de flujo secundario, que también se

observaron cualitativamente. McCoy (2006) presentó los resultados de las simulaciones de Large Eddy Simulation (LES) en el flujo entre dos espigones verticales sumergidos (caso individual). La profundidad de sumergencia relativa era lo suficientemente alta como para que el flujo medio en la superficie libre fuera casi paralelo a la dirección del flujo medio en el canal. Para la geometría que consideraron, se descubrió que las estructuras coherentes dentro de la capa de mezcla superior tenían una alta probabilidad de ser total o parcialmente arrastradas hacia la zona muerta en comparación con las que provenían desde la capa de mezcla lateral. Además, presentaron la única observación existente con respecto al intercambio de masas para el caso sumergido. McCoy (2006) señaló que el proceso de intercambio no puede ser representado por un valor único del coeficiente de intercambio. Informaron la existencia de 2 fases, una disminución exponencial inicial más rápida y una más lenta que ocurre después de que aproximadamente el 60 % de la masa inicial abandonó la zona muerta. En comparación con el caso emergido, el proceso de intercambio fue aproximadamente 3 veces más rápido.



**Figura 1:** Definición de parámetros geométricos para una cavidad lateral sumergida y emergida. Este caso genérico describe la dinámica general de una zona muerta individual. La figura también muestra esquemáticamente cómo se construyó la cavidad en una sección de un canal compuesto rectangular.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Los experimentos se llevaron a cabo en un canal rectangular compuesto con pendiente de 1/1000 m/m, de 17 m de largo y 1,3 m de ancho. En éste se generó una cavidad extrayendo un bloque de dimensiones  $W \times L \times H$  de la planicie, con  $W = L$ . La geometría final se presenta en la Figura 1. El caudal de ingreso al canal se derivó desde un tanque de nivel constante y se controló con un caudalímetro inductivo que cuenta con una válvula computarizada. Con el objetivo de evitar perturbaciones se alineó el flujo a la entrada con aquietadores de alrededor de 0,2 m de ancho.

La Figura 1 presenta las variables geométricas intervinientes. La altura de la planicie de inundación con respecto al fondo del canal ( $H$ ) fue de 5 cm. El cociente ancho ( $W$ ) sobre largo ( $L$ ) de la cavidad se fijó en 1 para todos los experimentos. La Tabla 1 presenta los valores de profundidad ( $h$ ), sumergencia ( $h/H$ ), velocidad media de entrada ( $U_{bulk}$ ), número de Froude y número de Reynolds correspondientes a cada ensayo. En lo posterior se empleará el sistema coordenado  $x, y$  en donde  $x$  corresponde a la dirección del flujo en el canal principal e  $y$  a la perpendicular a ésta correspondiente al plano horizontal.

**Tabla 1.** Condiciones de ensayo.

Caso	$h/H$ [-]	$U_{bulk}$ [cm/s]	$Re$ [-]	$Fr$ [-]
I	1,15	0,35	20.000	0,46
II	1,33	0,30	20.000	0,37
III	2,00	0,20	20.000	0,20
IV	2,64	0,15	20.000	0,13

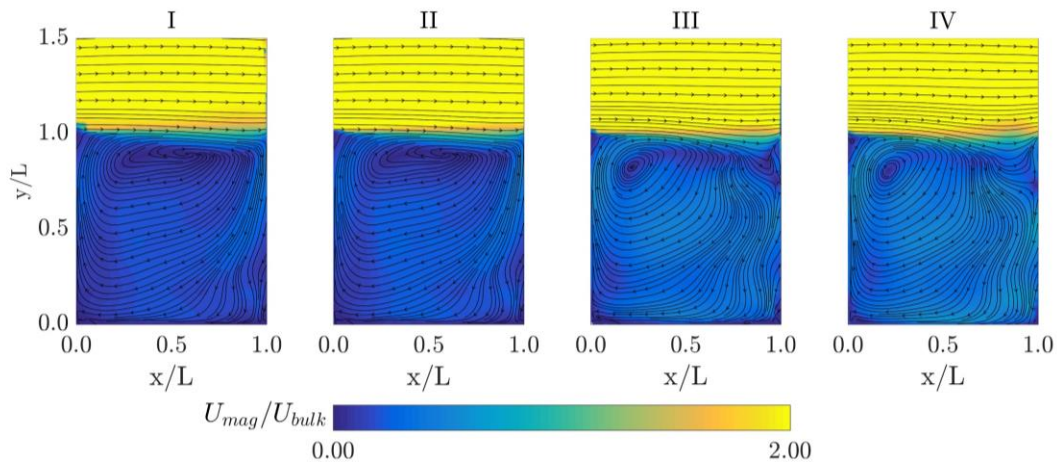
Las mediciones de velocidad se realizaron aplicando la técnica de velocimetría por imágenes bidimensional en un plano horizontal ubicado a una distancia  $H/2$  desde el fondo (mitad de la altura de la cavidad). Para ello se sembró el flujo con partículas de poliamida 12 de 100  $\mu m$  de diámetro medio y densidad de 1,016  $g/cm^3$ . Las partículas se iluminaron con un láser de doble cavidad Nd:Yag operando en modo de doble pulso. Las imágenes fueron obtenidas con una frecuencia de 32Hz por una cámara CCD ubicada sobre el canal; luego fueron analizadas a partir de un algoritmo que resuelve las ecuaciones de flujo óptico (optical flow equations) en base a las soluciones de Lucas-Kanade. A partir de lo anterior se obtuvieron campos de velocidades en el interior de la cavidad ( $y/L < 1$ ) y en una parte adyacente correspondiente al canal principal ( $y/L > 1$ ).

### 3. RESULTADOS

#### Valores medios

La Figura 2 presenta las distribuciones del promedio temporal de la magnitud de velocidad, en conjunto con las líneas de corriente, para los casos en estudio. Se observa una única recirculación que abarca la mayor parte del volumen de la cavidad, a excepción de la zona cercana al límite de aguas abajo para las sumergencias III y IV, en donde las líneas de corriente se observan perturbadas. El centro de la recirculación se ubica transversalmente en el rango  $0,8 < y/L < 1$ , mientras que su posición longitudinal varía con respecto al nivel de sumergencia considerado. En este sentido, se aprecia que el aumento de la sumergencia produce su confinamiento hacia una de las esquinas de aguas arriba de la cavidad, registrándose un desplazamiento desde  $x/L = 0,8$  hasta  $x/L = 0,2$  para los casos I y IV respectivamente.

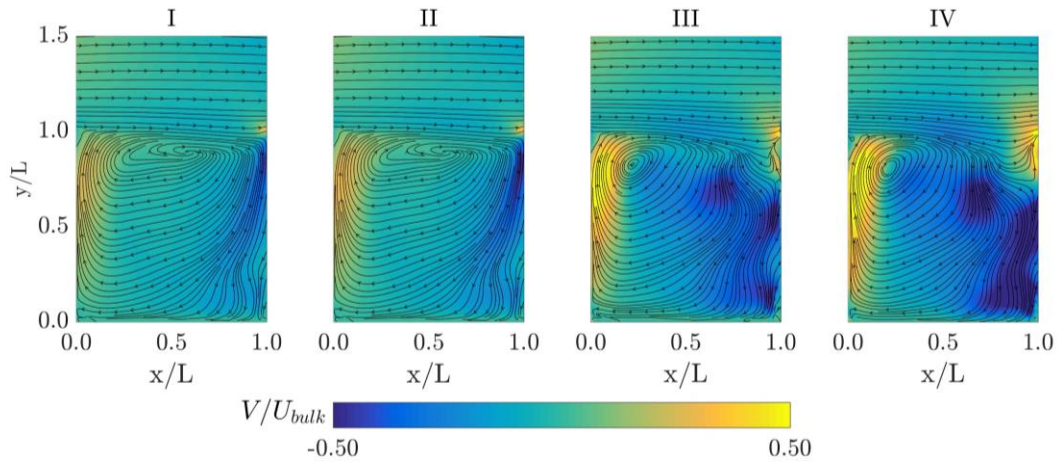
En los casos más someros (I y II), la magnitud de la velocidad presenta sus valores máximos dentro de la cavidad en la zona ubicada en la adyacencia inmediata a la pared de aguas abajo. Se observa que dicho sector oficia como una vinculación entre la interfaz y la zona muerta. Las regiones de la cavidad que presentan mayores magnitudes se vinculan a la interfaz a través de este mecanismo. Los casos III y IV presentan una situación diferente, en ambos la magnitud de la velocidad presenta una distribución relativamente más homogénea y de mayor valor medio. Adicionalmente, la disposición adoptada por las líneas de corriente no evidencia un ingreso a la cavidad cercano a la pared, sino una entrada parcial e inmediato egreso, alrededor del rango  $0,8 < x/L < 1$ .



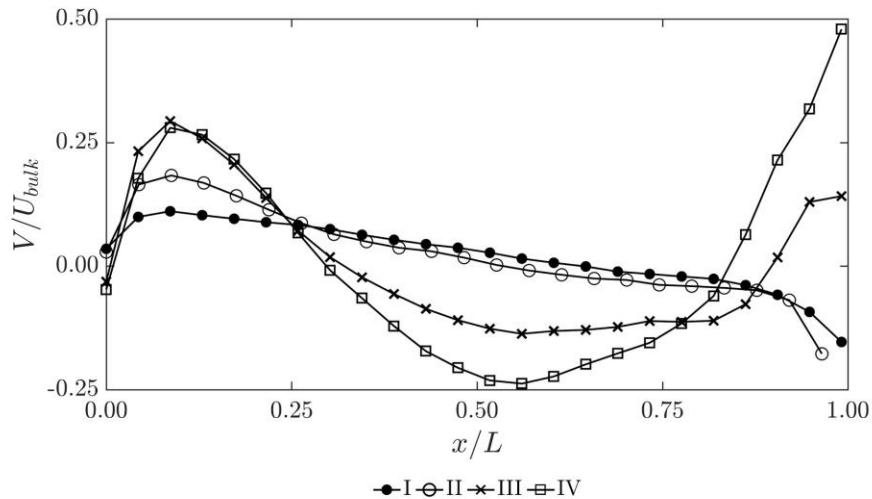
**Figura 2.** Magnitud de la velocidad y líneas de corriente.

En la Figura 3 se presentan las distribuciones de la velocidad media transversal para los casos estudiados. Análogamente al caso emergido, se aprecia que los valores máximos se ubican en las cercanías de las paredes de aguas abajo y aguas arriba. El aumento de la sumergencia produce un incremento en el flujo transversal de aguas arriba, dirigido desde la cavidad hacia el canal principal. En tanto, el correspondiente a aguas abajo evoluciona desde una configuración en la que los máximos negativos se producen en el ingreso a la cavidad en la esquina exterior de aguas abajo hacia otra en la que se encuentran dispuestos en forma de parches en el interior de la zona muerta.

La Figura 4 presenta una comparación de las velocidades interfaciales para los distintos niveles de sumergencia. Los resultados permiten visualizar el aumento del intercambio promediado en el tiempo, entre la cavidad y el canal, en la zona de aguas arriba, cuando la sumergencia aumenta. También para los dos casos de mayor sumergencia se observa que el intercambio de momentum hacia la cavidad ocurre principalmente en la zona central de la interfaz. Esto se debe principalmente al confinamiento hacia aguas arriba de la zona de recirculación principal de la cavidad. También en la zona interfacial para altas sumergencias, se observa un aumento de las velocidades de intercambio en la zona de aguas abajo. Los dos casos de baja sumergencia muestran que la estructura de la interfaz se asemeja a lo observado para el caso emergido, donde el intercambio de momentum hacia la cavidad ocurre principalmente en la zona de aguas abajo.



**Figura 3.** Velocidad media transversal y líneas de corriente.

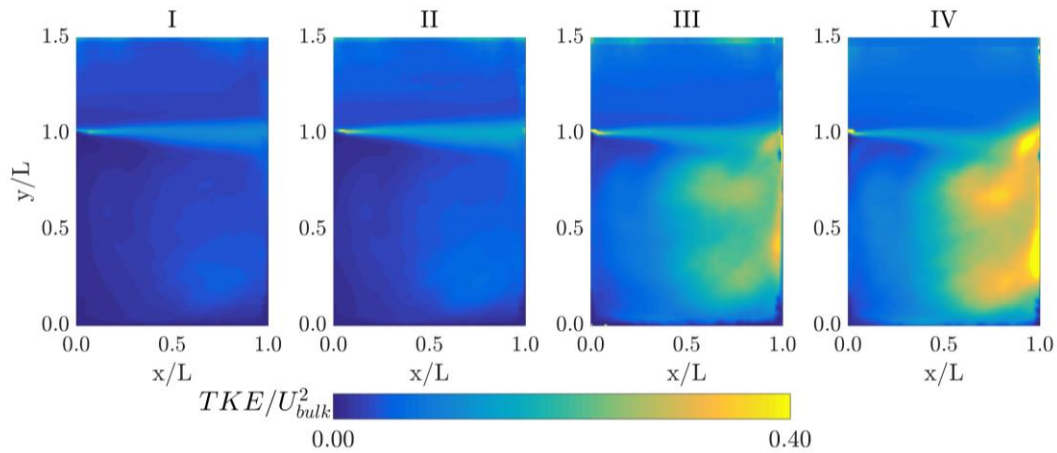


**Figura 4.** Perfil de velocidad media transversal correspondiente a  $y/L=0,95$ .

## Estadísticas turbulentas

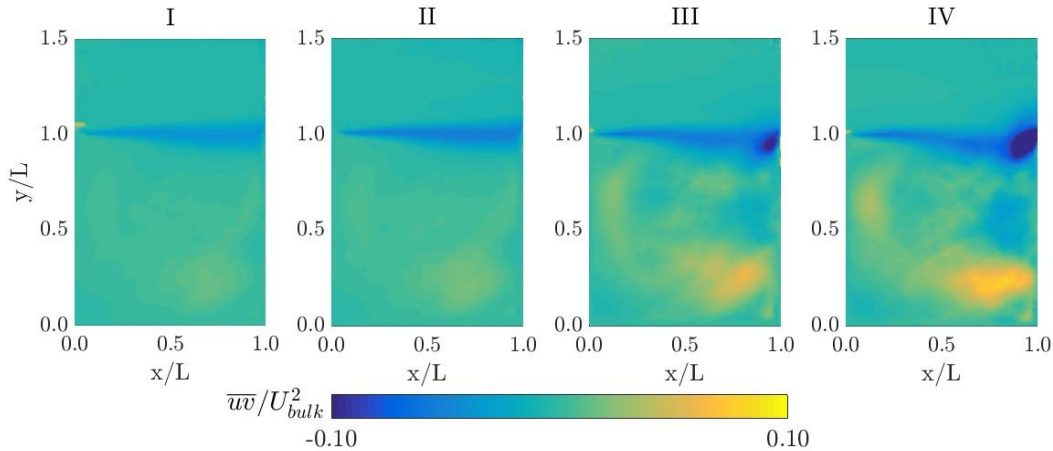
Las Figuras 5 y 6 presentan las distribuciones de energía cinética turbulenta (TKE por sus siglas en inglés) y la componente  $\overline{uv}$  del tensor de tensiones de Reynolds. En ambos casos se observa que para las condiciones de ensayo I y II, la actividad turbulenta se centra en la capa de corte desarrollada en la interfaz. El progresivo aumento de la sumergencia provoca que la misma disminuya su ancho y magnitud. Adicionalmente, se observa un cambio de dirección en los casos III y IV a partir de  $x/L=0,4$ . Alrededor de la coordenada  $x/L=0,9$  se observa un aumento localizado en ambos estadísticos turbulentos que aumentan de magnitud con el incremento de la sumergencia (III y IV). Para el caso IV, los valores de tensiones de Reynolds y TKE son aproximadamente 3 veces superiores a los correspondientes a la capa de corte.

Se aprecia que el aumento de la sumergencia provoca un incremento progresivo de la energía cinética turbulenta dentro de la cavidad. Inicialmente, para los casos I y II, los mayores valores se encuentran en las cercanías de la esquina interior de aguas abajo. Posteriormente, en los casos III y IV, se observan dos sitios de incremento centrados alrededor de  $y/L=0,30$  e  $y/L=0,6$ . Las tensiones de Reynolds correspondientes a estas zonas adoptan valores de signos inversos, siendo positivas las ubicadas más cercanas a la pared. En adición a lo mencionado, se aprecia un incremento de las tensiones de Reynolds en las cercanías de la pared de aguas arriba.



**Figura 5.** Energía cinética turbulenta (*TKE*).



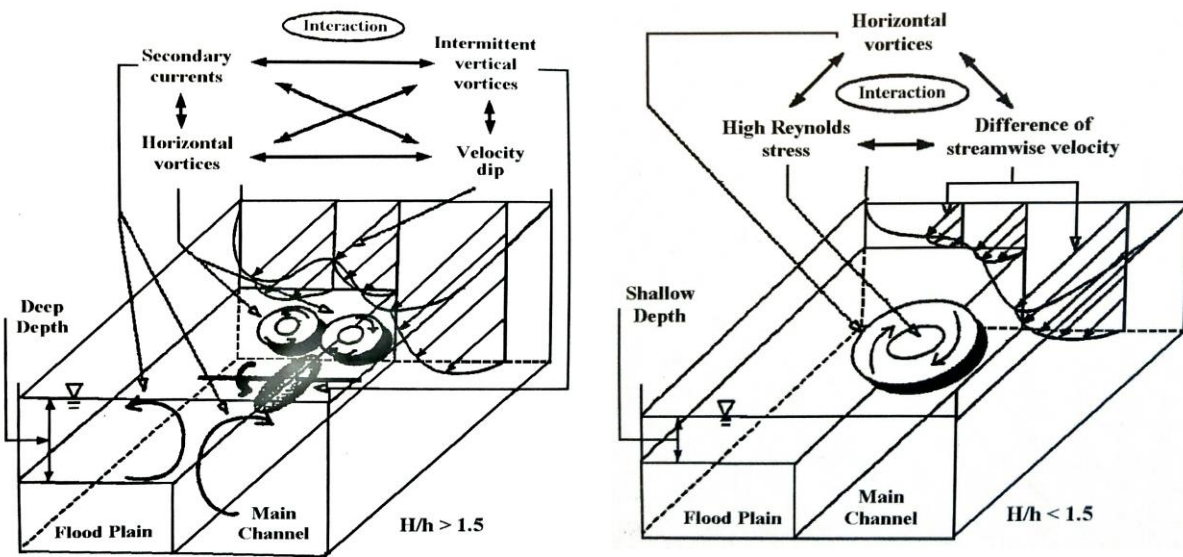


**Figura 6.** Componente  $\overline{uw}$  del tensor de tensiones de Reynolds.

#### 4. DISCUSIÓN

Los campos de velocidades medias presentadas sugieren que el mecanismo de ingreso principal a la cavidad observado en cavidades emergidas sufre importantes modificaciones. Existe una clara diferenciación entre los patrones que muestran los estadísticos turbulentos en la zona interior de la cavidad para los experimentos correspondientes a las sumergencias I-II y III-IV. En el primer caso la actividad turbulenta es reducida, mientras que en el segundo se presentan concentraciones significativas en las cercanías a la pared vertical de aguas abajo. En los perfiles transversales obtenidos (Figura 6) se observa un valor mínimo ubicado aproximadamente en  $y/L = 0,5$ . El flujo que ingresa a la cavidad está determinado por la geometría denominada canal compuesto. Ésta se compone de una planicie lateral, cuyo fondo está elevado con respecto al del canal principal, y una zona de unión (en este caso vertical) que vincula ambas regiones. Nezu et al. (1999) propone un modelo conceptual para describir la estructura tridimensional del flujo formada en estas condiciones (Figura 7). El autor presenta dos casos bien diferenciados, determinados por la relación de sumergencia  $H/h$ , con  $H/h = 1,5$  como valor divisorio. Para flujos profundos, de  $h/H > 1,5$ , se forman corrientes secundarias entre el canal principal y la planicie, producidas por la anisotropía de la turbulencia existente en la capa de corte que separa ambas regiones. Estos patrones generan un flujo ascendente que transporta volúmenes con baja energía y cantidad de movimiento desde el fondo hacia la superficie. Como consecuencia de este proceso, la distribución de cantidades medias y turbulentas presenta un mínimo en la zona de la unión, lo que produce una forma de valle en la velocidad media sobre la interfaz y la existencia de un par de vórtices débiles sobre ella. Adicionalmente, debido a la menor influencia relativa de la rugosidad en la planicie de inundación, se desarrollan en ella velocidades máximas del orden de las halladas en el canal principal.

En el caso somero ( $h/H < 1,5$ ), a diferencia de lo mencionado, las corrientes secundarias disminuyen su importancia y las distribuciones horizontales de velocidad en la unión no muestran una forma de tipo valle y se genera una calle de vórtices sobre la interfaz. En conjunto, debido a la influencia en la rugosidad, el flujo se concentra por el canal principal. Los casos I y II analizados en el presente trabajo exhiben relaciones de sumergencia que corresponden a flujos someros caracterizados en los párrafos anteriores, mientras que los casos III y IV se engloban dentro de los profundos. Lo mencionado implica que, dependiendo de la relación de sumergencia considerada, la cavidad está sometida a condiciones de borde de muy diferentes características, en términos del campo de velocidades medias y cantidades turbulentas. Estas pueden explicar las diferencias entre los patrones descritos en los casos I-II y III-IV.



**Figura 7.** Modelo de la estructura 3D de un canal compuesto en régimen profundo (izquierda) y somero (derecha) (Nezu et al. 1999).

## 5. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se analizan las estadísticas medias y turbulentas de los patrones de flujo formados en las cercanías de una cavidad lateral cuadrada, para cuatro relaciones de sumergencia. Se observan diferencias con respecto a los patrones descritos en la bibliografía correspondientes a configuraciones similares emergidas. En primer lugar, se aprecian cambios en la forma y ubicación de la recirculación principal. Todos los casos analizados muestran un confinamiento de la misma hacia la interfaz, mientras que su centro se desplaza progresivamente hacia aguas arriba para aumentos de la relación de sumergencia. Adicionalmente se observa una perturbación ubicada en las cercanías de la zona de impacto para los casos III y IV, donde el flujo ingresa y egresa a la cavidad. Esta particularidad se desarrolla en lugar del ingreso tipo chorro ubicado de manera

paralela a la pared de aguas abajo, observado en los casos someros (I y II) y reportados en la bibliografía para cavidades emergidas. Los perfiles de velocidad transversal media en la zona interfacial muestran que para mayores profundidades (III y IV) el intercambio de cantidad de movimiento se produce por el centro de la cavidad, mientras que se observa un egreso en las cercanías de la esquina de aguas abajo. Este comportamiento difiere de lo reportado para situaciones emergidas y los casos someros analizados (I y II), donde el intercambio se produce principalmente en la zona de aguas abajo.

Las estadísticas turbulentas correspondientes a menores sumergencias (casos I y II) muestran patrones similares a los observados en cavidades emergidas: la presencia de una capa de corte dominante y una actividad turbulenta considerablemente menor dentro de la zona muerta. Los casos con profundidades mayores (III y IV) presentan elevadas concentraciones en las cantidades turbulentas, cuya extensión e intensidad se incrementa desde aguas abajo hacia aguas arriba para progresivos aumentos de sumergencia. Lo mencionado sugiere que la influencia del flujo vertical se centra en la zona de aguas abajo, comportamiento diferente al reportado para espigones sumergidos. En conjunto con lo mencionado, las tensiones de Reynolds en la capa de corte disminuyen, y se presenta una concentración de estas cantidades en la zona de impacto.

## **AGRADECIMIENTOS**

El autor principal agradece a la Comisión Nacional de Ciencia y Tecnología por la financiación otorgada a través de la Beca de Doctorado Nacional N° 21191759.

## **REFERENCIAS**

Brevis, W., Niño, Y., & Vargas, J. (2006, September). Experimental characterization and visualization of mass exchange process in dead zones in rivers. In *Proceedings of 3rd International Conference on Fluvial Hydraulics (RiverFlow 2006)* (pp. 235-242).

Brevis, W., Nino, J., Weitbrecht, V., & Jirka, G. H. (2008, September). On the flow dynamics and coherent structures in submerged groyne fields. In *Proceedings of the river flow 2008 conference, Cesme, Turkey* (pp. 893-902).

McCoy, A. W. (2006). Numerical investigations using LES: exploring flow physics and mass exchange processes near groynes. *PhD. Thesis, The University of Iowa*.

Mignot, E., Cai, W., Launay, G., Riviere, N., & Escauriaza, C. (2016). Coherent turbulent structures at the mixing-interface of a square open-channel lateral cavity. *Physics of Fluids*, 28(4), 045104.

- Mignot, E., Cai, W., Polanco, J. I., Escauriaza, C., & Riviere, N. (2017). Measurement of mass exchange processes and coefficients in a simplified open-channel lateral cavity connected to a main stream. *Environmental Fluid Mechanics*, 17(3), 429-448.
- Mignot, E., Cai, W. & Riviere, N. (2019). Analysis of the transitions between flow patterns in open-channel lateral cavities with increasing aspect ratio. *Environ Fluid Mech*, 19(1), 231–253.
- Muto, Y. (2000). Turbulence characteristics of a shear flow in an embayment attached to a straight open channel. *Advances in Hydro-Science and-Eng.*, 232.
- Muto, Y., Kitamura, K., Baba, Y., & Nakagawa, H. (2006). Velocity measurements in a river with a series of groynes by a ship-mounted ADCP. *Journal of hydroscience and hydraulic engineering*, 24(1), 145-155.
- Nakano, D., & Nakamura, F. (2006). Responses of macroinvertebrate communities to river restoration in a channelized segment of the Shibetsu River, Northern Japan. *River Research and Applications*, 22(6), 681-689.
- Nezu, I, Onitsuka, K. & Iketani, K. (1999). Coherent horizontal vortices in compound open channel flows. In Singh, V. P., Seo, I. W. and Sonu, J. H. (eds), *Hydraulic Modelling*, Water Resources Publications, Colorado, pp. 17-32.
- Nezu, I., Yano, M., & Mitsunari, Y. (2004). Hydrodynamic and concentration properties in permeable side-cavity open-channel flow by digital visualization technique. In *4th Int. Symp. on Environmental Hydraulics*.
- Reynolds, C. S., Carling, P. A., & Beven, K. J. (1991). Flow in river channels: new insights into hydraulic retention. *Arch. Hydrobiol*, 121(2), 171-179.
- Sanjou, M., & Nezu, I. (2017). Fundamental study on mixing layer and horizontal circulation in open-channel flows with rectangular embayment zone. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 29(1), 75-88.
- Shields Jr, F. D. (1995). Fate of Lower Mississippi River habitats associated with river training dikes. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 5(2), 97-108.
- Uijttewaal, W. S. J., Lehmann, D. V., & Mazijk, A. V. (2001). Exchange processes between a river and its groyne fields: Model experiments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 127(11), 928-936.
- Uijttewaal, W. S. (2005). Effects of groyne layout on the flow in groyne fields: Laboratory experiments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(9), 782-791.