

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXVII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**EVOLUCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS HIDRODINÁMICAS EN EL
DESARROLLO DE UNA CAVIDAD LATERAL**

JORGE PEÑA P.¹
HERNÁN ALCAYAGA S.²
VÍCTOR CONTRERAS L.³
CHRISTIAN GONZÁLEZ M.⁴

RESUMEN

En la última década, se han producido importantes avances en la comprensión de los mecanismos que originan y mantienen la erosión en cavidades laterales de cauces naturales, y con ello, la morfodinámica de las riberas. Tanto estudios computacionales, como de laboratorio y de terreno, han revelado que las estructuras turbulentas son las principales responsables del proceso erosivo lateral y del transporte de sedimentos asociado. Estas estructuras abarcan un amplio rango de escalas espaciales, aunque se ha evidenciado que aquellos de microescala desempeñan un rol particularmente relevante. Sin embargo, las limitaciones en instrumentación de medición dificultan la visualización directa de las interacciones entre estas estructuras turbulentas con el suelo. En este contexto, y mediante el uso de técnicas de Dinámica de Fluidos Computacional, el presente estudio presenta resultados preliminares que apuntan a capturar la evolución hidrodinámica en el desarrollo de una cavidad lateral.

¹ Estudiante de Magíster, Escuela de Obras Civiles, Universidad Diego Portales – email: jorge.pena@mail.udp

² Profesor asociado, Escuela de Obras Civiles, Universidad Diego Portales – email: hernan.alcayaga@udp.cl

³ Profesor asistente, Escuela de Obras Civiles, Universidad Diego Portales – email: victor.contreras@udp.cl

⁴ Profesor asistente, Escuela de Obras Civiles, Universidad Diego Portales – email: christian.gonzalez@udp.cl

1. INTRODUCCIÓN

La erosión y retroceso de riberas es un fenómeno natural que presenta implicaciones en diversos ámbitos. Por ejemplo, su participación en procesos ecológicos (Dong y Uchida, 2024; Das y Debnath, 2025), la evolución de la morfología fluvial (Roy et al., 2019), aspectos socioeconómicos, tales como la pérdida de suelo cultivable o de áreas habitables (Zhao et al., 2022) o afectación a la infraestructura (Das et al., 2023). Debido a estos múltiples impactos, resulta fundamental profundizar en los mecanismos que originan y desarrollan este proceso.

Los fenómenos que intervienen en el retroceso de riberas son múltiples y complejos, y pueden clasificarse en dos categorías principales (Zhao et al., 2022; Das y Debnath, 2025): la erosión inducida por el escurrimiento superficial y la erosión influenciada por la acción gravitacional. De ambas, la primera ha sido menos investigada (Das y Debnath, 2025), principalmente debido a las dificultades asociadas a la caracterización de los fenómenos turbulentos dominantes (Roy et al., 2019; Das y Debnath, 2025).

No obstante, en la última década se han producido avances significativos a través de estudios experimentales – varios de ellos de laboratorio – enfocados en comprender cómo los movimientos característicos de los flujos turbulentos inciden en el proceso de erosión ribereña (Barman et al., 2019; Das et al., 2019; Das et al., 2023). Los resultados han demostrado que las estructuras turbulentas a nivel de la microescala desempeñan un rol relevante en el inicio y desarrollo de la erosión, formando cavidades laterales y favoreciendo el transporte de sedimentos, como se ejemplifica en la figura 1 (Das et al., 2019; Roy et al., 2019; Das and Debnath, 2025).

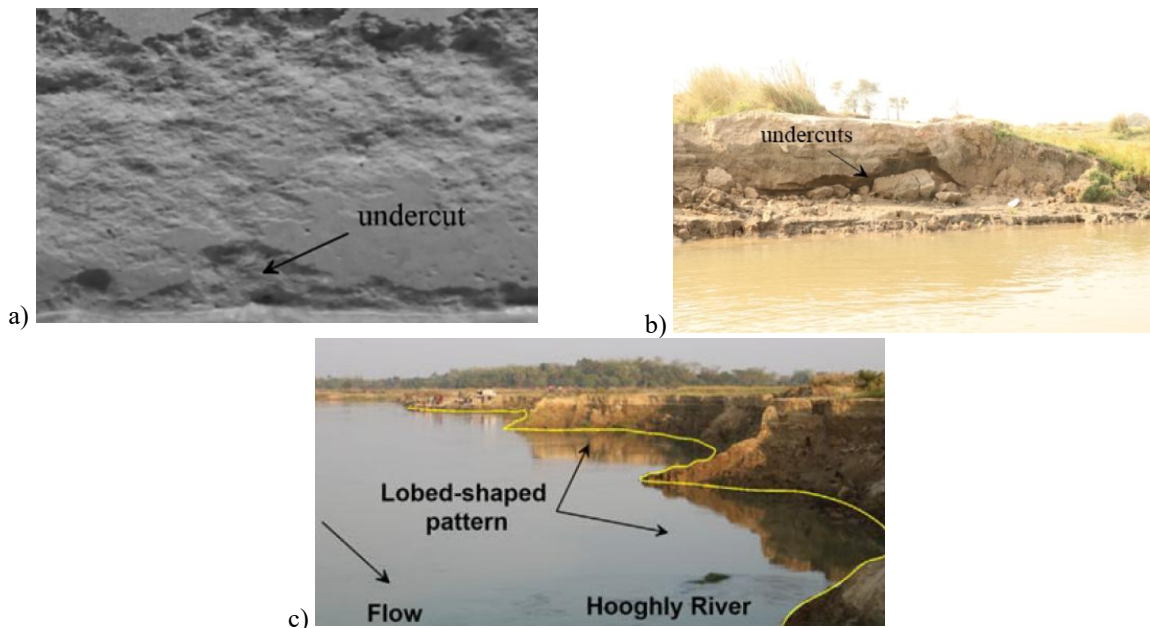


Figura 1: Evolución de la erosión de riberas. a) erosión incipiente en una ladera producto del esfuerzo de corte por eventos turbulentos (Das et al. 2022). b) colapso por gravedad de una ladera, la que sucede a la erosión continua de la ribera por el flujo (Das y Debnath 2025). c) formación de cavidades laterales luego de la remoción del suelo por gravedad (Das et al. 2020).

Das y Debnath (2025), en su revisión bibliográfica de los estudios relacionados con los efectos de la turbulencia en la erosión destaca varios fenómenos; por ejemplo, el rol de la turbulencia en el transporte de sedimentos, propiciada por el alto gradiente de velocidad presente en las zonas cercanas a las paredes. También, destaca la importancia de estructuras coherentes turbulentas que aparecen en dichas paredes, en particular, las denominadas barrido y eyección (*sweeps and ejections*), los cuales tienen una contribución importante en el esfuerzo de corte ejercido en la superficie del suelo. Además, resalta cómo la alta rugosidad de los cauces naturales favorece la producción de turbulencia acrecentando los efectos mencionados.

Si bien ya se han identificado parcialmente algunas estructuras turbulentas del flujo y su relación con eventos de erosión en el desarrollo de una cavidad lateral, lamentablemente y debido a las limitaciones de las técnicas de medición – tanto en laboratorio como en terreno – resulta complejo identificar de forma detallada las interacciones entre estas estructuras turbulentas y el suelo. En este contexto, se plantea el uso de simulaciones computacionales (CFD, por sus siglas en inglés para *Computational Fluid Dynamics*) como herramienta para capturar estos fenómenos con mayor detalle. Un esfuerzo que va en caracterizar detalladamente la hidrodinámica de las cavidades laterales es la investigación de Barros y Escauriaza (2024), donde usaron trazadores pasivos que pudieron identificar cómo las estructuras turbulentas de pequeña escala influyen en el transporte de elementos y su intercambio con el flujo principal (transporte dentro y fuera de la cavidad lateral).

Para avanzar en la caracterización de la evolución de la hidrodinámica en cavidades laterales, este estudio – en desarrollo, y por tanto, preliminar – propone emplear la metodología de Simulación de Grandes Remolinos (LES, por sus siglas en inglés para *Large Eddy Simulation*) para estudiar la hidrodinámica en dicho sistema. La técnica de LES permite resolver directamente los remolinos más grandes (Pope, 2001), mientras que las estructuras de menor escala se estiman mediante un modelo de turbulencia. Este estudio sentará las bases para una etapa posterior – no incluida aquí – en la que se acoplará a la simulación un algoritmo basado en el Método de Elemento Discreto (DEM, por sus siglas en inglés para *Discrete Method Modeling*) que permitirá representar las partículas individuales del suelo y analizar su interacción con las estructuras turbulentas.

La metodología CFD ha sido utilizada en recientes estudios de la hidrodinámica en cavidades laterales (Dong y Uchida, 2024; Barros y Escauriaza, 2024), sin embargo, dichos trabajos se han enfocado en la hidrodinámica del flujo dentro de la cavidad una vez ya formada, sin considerar la interacción y evolución del suelo en el proceso de formación de la cavidad. Así, a partir de lo anterior, el objetivo de este trabajo es comprender los fenómenos presentes en todo el desarrollo de una cavidad lateral en un escurrimiento turbulento plenamente desarrollado. Para lograr dicho objetivo, aquí sólo se estudia preliminarmente la hidrodinámica de la cavidad, como también los potenciales efectos de las estructuras turbulentas y consideraciones iniciales para representar apropiadamente los fenómenos de erosión laterales mediante la metodología CFD.

2. METODOLOGÍA

En esta sección se describen las características computacionales y del flujo a estudiar.

2.1. CARACTERÍSTICAS NUMÉRICAS

La metodología está basada en el enfoque CFD, una herramienta que permite estudiar el comportamiento de los fluidos mediante simulaciones numéricas con distintos niveles de precisión. Este enfoque consiste en resolver las ecuaciones gobernantes de los fluidos, denominadas ecuaciones de Navier-Stokes, que representan los principios de conservación de la masa y la conservación del momentum. Dado que estas ecuaciones en problemas complejos no poseen solución analítica, se utilizan métodos numéricos mediante la discretización del dominio en el espacio y tiempo, lo que permite obtener una solución aproximada.

Existen una variedad de algoritmos que realizan este proceso destacándose los métodos SIMPLE (por sus siglas en inglés para *semi-implicit method for pressure-linked equations*) y PISO (por sus siglas en inglés para *pressure-implicit split-operator*), los cuales resuelven las derivadas parciales – discretizadas por técnicas como los métodos de volúmenes finitos o elementos finitos – a través de iteraciones sucesivas (Xamán y Gijón-Rivera, 2016). En el presente trabajo se utiliza el algoritmo PISO, el cual es recomendado para flujos transitorios, como es el caso de los flujos turbulentos (Xamán y Gijón-Rivera, 2016). Así, las ecuaciones gobernantes a resolver son las siguientes:

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla)u \right) = -\nabla p + \rho g + \mu \nabla^2 u \quad (2)$$

Donde:

- u : es el vector velocidad (m/s),
- ρ : es la densidad del fluido (kg/m³),
- t : es el tiempo (segundos),
- g : es la aceleración gravitacional (m/s²),
- p : es la presión (Pa),
- μ : es la viscosidad dinámica (Pa·s).

El software utilizado para resolver estas ecuaciones es OpenFOAM, una herramienta de código abierto ampliamente utilizada en la comunidad científica e industrial (Casella et al., 2014; Zirwes et al., 2023; Dong y Uchida, 2024; Ricci, 2025).

Dentro de la metodología CFD se encuentran – dentro de sus principales exponentes – tres enfoques, los cuales se diferencian según el nivel de precisión con el que se representa la turbulencia y la carga computacional que requieren. En orden descendente de precisión estos métodos son: la Simulación Numérica Directa (DNS, por sus siglas en inglés para *Direct Numerical Simulation*), la Simulación de Grandes Remolinos (LES, por sus siglas en inglés) y las Ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por el operador de Reynolds (RANS, por sus siglas en inglés para

Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations) (Pope, 2001). La elección del método a utilizar dependerá tanto del fenómeno que se desea estudiar como de los recursos computacionales a disposición.

El método que se utiliza en el presente trabajo corresponde a un enfoque de LES. Este enfoque se caracteriza por resolver las ecuaciones gobernantes para los vórtices más grandes, los cuales concentran al menos el 80% de la energía cinética turbulenta (Pope, 2001), y modelar los efectos de las escalas más pequeñas a través de un modelo de turbulencia. Esto se logra aplicando un filtro definido por el tamaño de la malla computacional, el cual remueve las fluctuaciones de alta frecuencia asociadas a los remolinos más pequeños, dividiendo así las escalas grandes (que son resueltas) de las escalas pequeñas (que son modeladas).

Para modelar el comportamiento de las estructuras turbulentas más pequeñas con LES, se agrega una variable denominada término de cierre a la ecuación de cantidad de movimiento, que representa el efecto de las estructuras turbulentas. De este modo, la ecuación 2 queda de la siguiente forma:

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + (\bar{u} \cdot \nabla) \bar{u} \right) = -\nabla \bar{p} + \rho g + \mu \nabla^2 \bar{u} - \nabla \cdot \tau \quad (3)$$

Donde:

- \bar{u} : es el vector velocidad filtrado (m/s),
- \bar{p} : es la presión filtrada (Pa),
- τ : es la tensión residual anisotrópica (Pa).

El modelo de turbulencia utilizado en el estudio corresponde al de energía cinética turbulenta dinámica, incluido en el software OpenFOAM como *DynamicKEqn*. Este modelo resuelve una ecuación de variación para la energía cinética turbulenta y tiene la forma de un modelo de transporte (para más detalles, se sugiere al lector la revisión de Kim y Menon, 1995).

El dominio de la simulación corresponde a un tramo de cauce natural idealizado con sección transversal rectangular. Este consta de un ancho (b) de 0,3 metros, un largo (l) de 0,85 metros y un alto (h) de 0,2 metros. Dentro del dominio, solo el muro izquierdo (vista hacia aguas abajo) y el lecho se consideran como superficies sólidas. Luego, a partir del largo 0,4 metros se construye la cavidad lateral con la forma curva, evaluando dos tipos de geometría: una cavidad semicircular y otra con forma Gaussiana (i.e. distribución Normal). El propósito de comparar ambas geometrías es identificar aquella que interfiera lo menos posible en el desarrollo del flujo, de modo que este sea definido principalmente por la evolución del suelo (a agregar en una segunda etapa no incluida aquí). Esto permitirá, en dicha segunda etapa, incorporar partículas erosionables y evaluar cómo su dinámica controla la hidrodinámica del escurrimiento.

En cuanto a las condiciones de borde que deben captar como es el comportamiento del flujo a través de cada cara del dominio, se consideran de la siguiente manera: se impone una condición de borde del tipo no deslizante (velocidad igual a 0) en las superficies sólidas del dominio. La cara izquierda, normal al eje y, presenta la entrada de un flujo turbulento. La cara inferior, normal al eje x, y la cara derecha, normal al eje y, se modelan como fronteras de escurrimiento libre. Finalmente,

la superficie superior se modela como un plano de simetría, asumiendo que la superficie libre no presenta alteraciones significativas en su forma, supuesto plausible debido al bajo número de Froude que se impone al flujo (véase sección 2.2).

Por otro lado, la malla computacional se refina en las zonas cercanas a los muros con el fin de captar las regiones de mayor gradiente, como también, las estructuras turbulentas que allí se generan. Así, apegado a las paredes, la primera capa de nodos cumple con $z^+ < 1$, siendo z^+ la distancia z desde el borde adimensionalizado con la velocidad de fricción y la viscosidad cinemática.

En las siguientes figuras se muestra el dominio computacional:

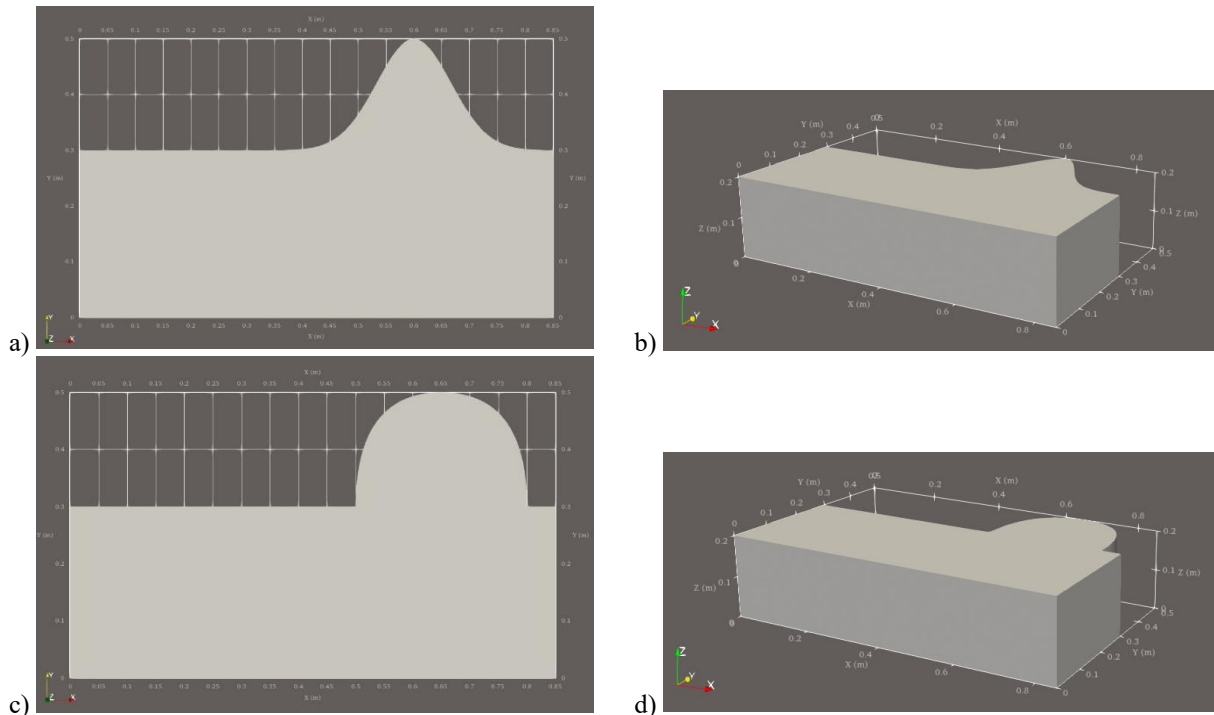


Figura 2: (a) vista en planta del dominio computacional con cavidad tipo distribución Normal; (b) vista isométrica del dominio computacional con cavidad tipo distribución Normal; (c) vista en planta del dominio computacional con cavidad tipo semicircular; (d) vista isométrica del dominio computacional con cavidad tipos semicircular.

2.2 CARACTERÍSTICAS DEL FLUJO

Para definir el tipo de escurrimiento que tiene el fluido, se deben considerar las limitaciones computacionales. En cauces naturales, el flujo presenta alta turbulencia, lo que implica un número de Reynolds (Re) elevado. El alto grado de turbulencia genera fluctuaciones turbulentas en las escalas pequeñas, lo que aumenta la necesidad de mallas finas (es decir, la escala de Kolmogorov es aún menor). Por esta razón, en este proyecto se prefiere un escurrimiento con velocidad reducida para hacer factible una simulación menos costosa en términos computacionales, pero que mantenga la condición de generar estructuras coherentes turbulentas. Para el trabajo, se toma como valor de referencia un $Re = 4000$, (para otras características del flujo según el Re , ver Pope, 2001). Así, el flujo simulado presenta las siguientes características:

- Velocidad (u_x) = 0,021 m/s,
- Longitud característica (L) = 0,2 m,
- Viscosidad dinámica = $1,002 \cdot 10^{-6}$ Pa·s,
- Número de Froude = 0,015,
- Número de Reynolds ≈ 4200 .

3. RESULTADOS PRELIMINARES Y DISCUSIONES

Como se ha mencionado, el actual trabajo está enfocado en estudiar la hidrodinámica tal que represente un escurrimiento turbulento real del flujo en el interior de la cavidad. En el siguiente apartado, se mostrará cómo las consideraciones impuestas en la metodología logran este comportamiento, entregando características relevantes de su dinámica.

Se extrajo una muestra del perfil de velocidades instantáneas del componente u_x del vector velocidad desde el dominio, correspondiente a una sección (Figura 3.a) y un punto (Figura 3.b) específicos. En las figuras se evidencia el comportamiento fluctuante del componente u_x , demostrando una consistencia con esta propiedad del flujo turbulento descrito por Pope (2001).

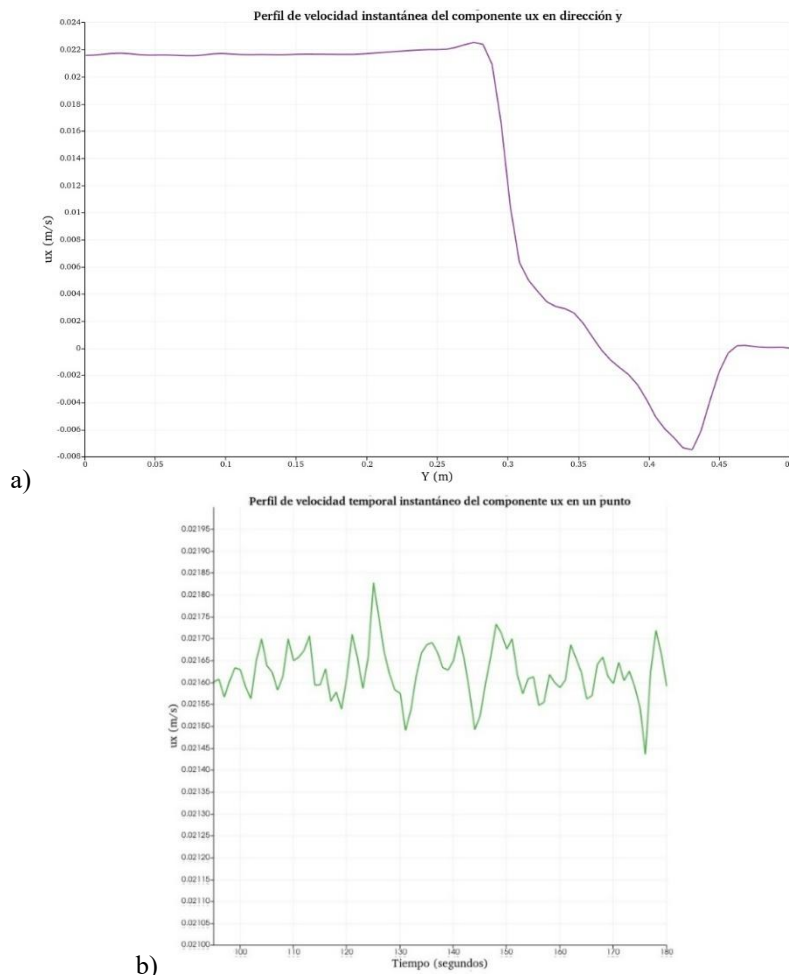


Figura 3: (a) perfil de velocidad instantánea del componente u_x del vector velocidad en el instante $t = 100$ s, evaluado en la posición $x = 0,6$ m, en el intervalo $0 \leq y \leq 0,5$ m y en la altura $z = 0,2$ m; (b) perfil de velocidad

instantánea del componente u_x del vector velocidad, evaluado en un punto ubicado en la posición $x = 0,6$ m, $y = 0,15$ m y $z = 0,2$ m.

Además, se observó la formación de un único vórtice que abarca casi la totalidad del área de la cavidad (Figura 4.a) y un patrón de recirculación (Figura 4.b). Esto, en contraposición a configuraciones que permiten la aparición de dos o más vórtices principales (e.g. Mignot et al. 2017), siendo el comportamiento de nuestra configuración más acorde a lo reportado en las investigaciones de Engelen et al., 2021; Dong y Uchida, 2024; Das y Debnath, 2025. Asimismo, se puede apreciar la generación de una interfaz con un alto gradiente de velocidad entre la cavidad y el flujo principal, es decir, una capa de corte bien definida (Figura 5.b), la cual gobierna el intercambio de masa y momentum entre las regiones internas y externas de la cavidad.

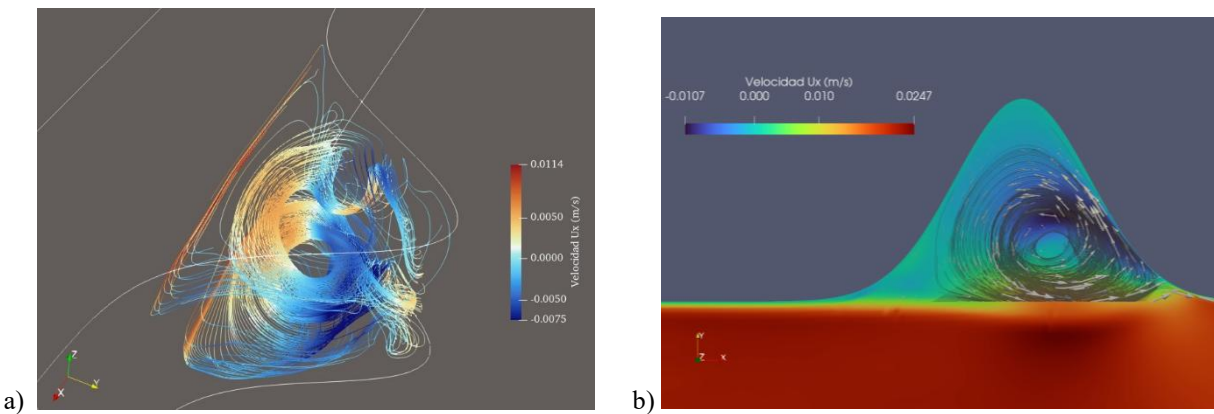


Figura 4: (a) líneas de corriente que del flujo dentro de la cavidad donde se puede apreciar trayectorias que evidencian la presencia de un vórtice de gran escala en la cavidad; (b) formación de un patrón de recirculación del flujo en la cavidad en $z/h = 0,5$ en el instante $t = 65$ segundos.

Nuestras simulaciones capturan una significativa dinámica tridimensional al interior de la cavidad, donde se observan vórtices de distintos tamaños en la Figura 5.a. Estas estructuras son el mecanismo fundamental de intercambio, tanto de momentum como de masa, entre la cavidad y el cauce principal. Esto tiene implicancias para el transporte de sedimentos producto de la erosión desde la ribera, como también en procesos que van más allá de nuestro estudio, como lo es la retención de contaminantes o nutrientes en sistemas naturales. La dinámica tridimensional también ha sido observada en trabajos similares (e.g. Dong y Uchida, 2024, quienes discuten cómo estas estructuras aportan a suavizar los gradientes de velocidad o capas de corte, afectando directamente la distribución de velocidades al interior de la cavidad). De nuestro interés es el transporte de sedimentos, sugiriendo que las escalas de tiempo del transporte de sedimentos (en particular, las del flujo sólido de salida de la cavidad) deben estar íntimamente ligadas con aquellas propias de los vórtices. Pero a su vez, las escalas temporales de los vórtices están determinadas por la geometría local, la que depende de las tasas de erosión. Es decir, se genera un sistema que se define a sí mismo.

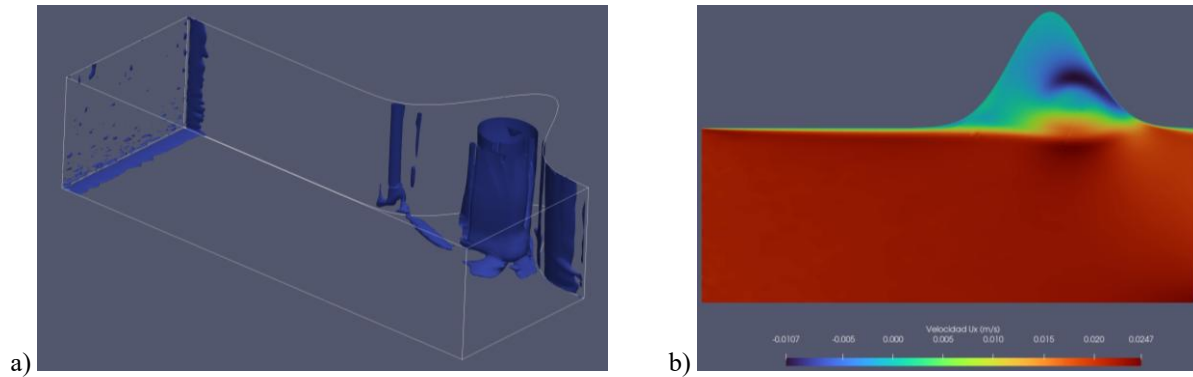


Figura 5: (a) Remolinos formados en la cavidad en el instante $t = 65$ segundos identificado a través del criterio q (Hunt et al 1988); (b) Campo de velocidad en el instante $t = 65$ segundos, en donde se evidencia un pronunciado gradiente de velocidad entre la cavidad y el flujo principal.

A partir de estos resultados, se distingue que las consideraciones establecidas en la metodología permiten reproducir de manera coherente el comportamiento del escurrimiento de agua en un cauce natural con una cavidad lateral. Aunque se haya utilizado una velocidad y un número de Reynolds bajos en comparación con los que se manifiestan en entornos naturales – los cuales presentan valores considerablemente mayores – los fenómenos hidrodinámicos característicos de un flujo turbulento siguen manifestándose. Esto permite concluir que la metodología CFD constituye una herramienta válida y eficaz para el estudio de los fenómenos.

Por último, hay que destacar que los fenómenos hidrodinámicos descritos están presentes tanto para la cavidad con geometría circular como para la geometría con forma de distribución Normal, observándose una menor interferencia de la forma sobre el flujo en la cavidad de geometría Gaussiana. Por lo cual, se opta por esta última para llevar a cabo la siguiente etapa de la investigación, la que como ya se ha mencionado, consiste en rellenas la cavidad con partículas sólidas susceptibles de ser erosionadas.

4. TRABAJO FUTURO

Como se verificó que se cumplen las características hidrodinámicas con las condiciones establecidas en la simulación, el siguiente trabajo a realizar es incluir las partículas en el dominio que cumplirán la función de simular el suelo, las cuales serán modeladas mediante un algoritmo de método discreto (DEM, por sus siglas en inglés para *Discrete Element Method*), pudiendo de esta manera ser capaz de analizar su interacción con el flujo de forma detallada. De esta forma se busca analizar cómo y cuáles son las estructuras turbulentas que causan el inicio de la erosión de una cavidad lateral. Asimismo, se espera evaluar el rol en el desarrollo de dicha erosión determinando cómo las estructuras tridimensionales presentes en la cavidad son impulsores de su desarrollo. Finalmente, se investigará cómo evoluciona el transporte de sedimentos en conjunto con el desarrollo de la cavidad lateral.

5. REFERENCIAS

- Barman, K., Roy, S., Das, V. K., & Debnath, K. (2019). Effect of clay fraction on turbulence characteristics of flow near an eroded bank. *Journal of Hydrology*, 571, 87–102. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.01.061>.
- Barros, M., & Escauriaza, C. (2024). Lagrangian and Eulerian perspectives of turbulent transport mechanisms in a lateral cavity. *Journal of Fluid Mechanics*, 984, A1. <https://doi.org/10.1017/jfm.2024.99>.
- Casella, L., Langreder, W., Fischer, A., Ehlen, M., & Skoutelakos, D. (2014). Dynamic flow analysis using an OpenFOAM based CFD tool: Validation of Turbulence Intensity in a testing site. *ITM Web of Conferences*, 2, 04002. <https://doi.org/10.1051/itmconf/20140204002>.
- Das, V. K., & Debnath, K. (2025). Understanding riverbank erosion through the Lens of Turbulence: A review. *Journal of Hydrology*, 649, 132484. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.132484>.
- Das, V. K., Debnath, K., & Sivakumar, B. (2023). On the evolution of turbulent characteristics of an eroding cohesive riverbank. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 37(4), 1371–1393. <https://doi.org/10.1007/s00477-022-02339-3>.
- Das V., K. Debnath y B. Sivakumar (2022). Does turbulence show fractal structure within a dynamic undercut of an alluvial riverbank? *Chaos, Solitons and Fractals*, 157, 111998
- Das, V. K., Barman, K., Roy, S., Chaudhuri, S., & Debnath, K. (2020). Near bank turbulence of a river bend with self similar morphological structures. *Catena*, 191, 104582.
- Das, V. K., Roy, S., Barman, K., Debnath, K., Chaudhuri, S., & Mazumder, B. S. (2019). Investigations on undercutting processes of cohesive river bank. *Engineering Geology*, 252, 110–124. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.03.004>.
- Dong, W., & Uchida, T. (2024). Role of three-dimensional vortex motions on horizontal eddies in an open-channel cavity. *Environmental Fluid Mechanics*, 24(4), 539–566. <https://doi.org/10.1007/s10652-024-09970-4>.
- Engelen, L., Perrot-Minot, C., Mignot, E., Rivière, N., & De Mulder, T. (2021). Lagrangian study of the particle transport past a lateral, open-channel cavity. *Physics of Fluids*, 33(1), 013303. <https://doi.org/10.1063/5.0030922>
- Kim, W.-W., & Menon, S. (1995, enero 9). A new dynamic one-equation subgrid-scale model for large eddy simulations. 33rd Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. 33rd Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno,NV,U.S.A. <https://doi.org/10.2514/6.1995-356>.
- Hunt, J. C. R. (1988). *Eddies Stream, and Convergence Zones in Turbulent Flows*.
- Mignot, E., Cai, W., Polanco, J.I. *et al.* Measurement of mass exchange processes and coefficients in a simplified open-channel lateral cavity connected to a main stream. *Environ Fluid Mech* 17, 429–448 (2017).
- Pope, S. B. (2001). Turbulent Flows. *Measurement Science and Technology*, 12(11), 2020–2021. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/12/11/705>.
- Ricci, A. (2025). Review of OpenFOAM applications in the computational wind engineering: From wind environment to wind structural engineering. *Meccanica*, 60(6), 1695–1735. <https://doi.org/10.1007/s11012-024-01826-x>.
- Roy, S., Das, V. K., & Debnath, K. (2019). Characteristics of intermittent turbulent structures for river bank undercut depth increment. *CATENA*, 172, 356–368. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.09.008>.
- Xamán, J. (2016). *Dinámica de fluidos computacional para ingenieros*. Palibrio.

Zhao, K., Coco, G., Gong, Z., Darby, S. E., Lanzoni, S., Xu, F., Zhang, K., & Townend, I. (2022). A Review on Bank Retreat: Mechanisms, Observations, and Modeling. *Reviews of Geophysics*, 60(2), e2021RG000761. <https://doi.org/10.1029/2021RG000761>.

Zirwes, T., Sontheimer, M., Zhang, F., Abdelsamie, A., Pérez, F. E. H., Stein, O. T., Im, H. G., Kronenburg, A., & Bockhorn, H. (2023). Assessment of Numerical Accuracy and Parallel Performance of OpenFOAM and its Reacting Flow Extension EBI dnsFoam. *Flow, Turbulence and Combustion*, 111(2), 567–602. <https://doi.org/10.1007/s10494-023-00449-8>.