

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

**TRANSPORTE DE PARTÍCULAS E INTERACCIONES DE FLUJO TURBULENTO  
ENTRE OBSTÁCULOS SUMERGIDOS**

**MATIAS CONTRERAS<sup>1</sup>**  
**MAGDALENA BARROS<sup>2</sup>**  
**CRISTIÁN ESCAURIAZA<sup>3</sup>**

**RESUMEN**

Este estudio se enfoca en la simulación de flujos turbulentos en presencia de obstáculos sumergidos, empleando la técnica de Simulación de Grandes Remolinos (LES, por sus siglas en inglés). Basándose en el modelo experimental propuesto por Yu y Tinoco (2023), se llevó a cabo una simulación detallada de un caso representativo. Los hallazgos delimitan la emergencia de zonas de recirculación y capas de corte en la vecindad de los obstáculos. A través de las simulaciones LES, se obtuvo una perspectiva detallada de las estructuras turbulentas y su interacción con el transporte de partículas, así como el esfuerzo de corte, elementos cruciales para la dinámica del transporte de masa o sedimentos. Además, se evidencia cómo el esfuerzo de corte se relaciona con la movilización y resuspensión de partículas, alterando la dinámica del transporte en el sistema. Esta investigación establece un pilar fundamental para futuras exploraciones, remarcando la necesidad de indagar en parámetros adicionales y la adopción de técnicas avanzadas para una comprensión más enriquecida de la dinámica del flujo en contextos similares. La relevancia de estos hallazgos es particularmente significativa para la hidráulica fluvial y el transporte de sedimentos, proporcionando perspectivas que pueden ser cruciales para la optimización de sistemas hidráulicos y fluviales en escenarios prácticos.

---

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

<sup>2</sup> Estudiante de Doctorado en Cs. De la Ingeniería, Departamento de Ing. Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile – email: mbarros1@uc.cl

<sup>3</sup> Profesor Asociado, Departamento de Ing. Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile – email: cescauri@ing.puc.cl

## 1. INTRODUCCIÓN

La investigación sobre los patrones de flujo en contextos con obstáculos sumergidos ha capturado la atención de la comunidad científica, dada su relevancia en la hidráulica ambiental. Este interés se extiende a áreas diversas como la ecología de ríos, gestión de sedimentos, urbanización y desarrollo de infraestructura hidráulica. Las características esenciales de los obstáculos, como su forma, orientación y distancia entre ellos, influyen significativamente en estos patrones de flujo, y son cruciales para anticipar fenómenos como la erosión, transporte de sedimentos y dispersión de contaminantes (Martinuzzi y Havel, 2000; Mondal et al., 2019; Le Ribault et al., 2021; Follett y Nepf, 2018).

Comprender la turbulencia cerca de los obstáculos es fundamental para determinar la caída de presión a través de cuerpos romos y la frecuencia de desprendimiento de vórtices, aspectos clave en el diseño de soportes para cuerpos sumergidos (Duta et al., 2008). La erosión del lecho y las profundidades de socavación representan aspectos cruciales, especialmente en zonas propensas a erosiones severas (Roca et al., 2007; Sui et al., 2018).

Historicamente, se han explorado cómo diferentes obstáculos, desde diques y vegetación hasta construcciones urbanas, afectan el flujo del agua (Chung et al., 2021). A pesar de los avances, persisten desafíos en comprender cómo evolucionan las estructuras de flujo al enfrentar múltiples obstáculos con distintas geometrías y configuraciones, y cómo impactan en la depositación de partículas, especialmente en flujos con variadas condiciones de turbulencia.

Este estudio se enfoca en la simulación de flujos turbulentos y subcríticos alrededor de dos bloques rectangulares sumergidos separados por una distancia específica. Se busca entender cómo la geometría y disposición de los obstáculos afectan la dinámica del flujo y la deposición de partículas entre estos bloques. Para ello, se emplean simulaciones numéricas LES avanzadas, utilizando el modelo dinámico LDKM (Kim y Menon, 1999) para representar las interacciones a escalas más pequeñas que el tamaño de la malla computacional. Esta metodología ha probado ser eficiente en estudios previos de flujos turbulentos, especialmente en contextos con obstáculos sumergidos y cavidades (Goodarzi et al., 2020; Barros y Escauriaza, 2023).

El enfoque de la investigación se alinea con la simulación del flujo turbulento y subcrítico entre los bloques sumergidos, reflejando condiciones habituales en sistemas fluviales naturales (You y Tinoco, 2023). Al contrastar los hallazgos con datos experimentales, aspiramos a validar nuestro enfoque de simulación, proporcionando una herramienta más precisa para la predicción de patrones de flujo y deposición de partículas. Además, se busca entender cómo los esfuerzos turbulentos y los mecanismos de transporte interactúan en estos flujos complejos, apuntando a enriquecer la comprensión de estos fenómenos y ofrecer información valiosa para la gestión de recursos hídricos y la planificación urbana en la comunidad de ingeniería hidráulica.

## 2. MODELO NUMÉRICO PARA LES

Las ecuaciones que rigen las simulaciones de Grandes Remolinos (LES por sus siglas en inglés) son las ecuaciones de Navier-Stokes tridimensionales, filtradas espacialmente, no estacionarias e incompresibles. Estas se expresan en forma no dimensional y en coordenadas cartesianas de la siguiente manera:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

En estas ecuaciones,  $\bar{u}_i$  son las componentes filtradas de la velocidad ( $i = 1, 2, 3$ ),  $\bar{P}$  es la presión filtrada,  $Re$  es el número de Reynolds, y  $\tau_{ij}$  son las componentes del tensor de esfuerzos de subgrilla. (SGS). Todas las cantidades han sido adimensionalizadas usando la profundidad del flujo  $h$  y la velocidad media en el canal principal  $U_b$  como escalas características de longitud y velocidad, respectivamente. Por lo tanto, el número de Reynolds se define como  $Re = U_b h / \nu$ , donde  $\nu$  es la viscosidad cinemática del fluido.

El tensor SGS se define como  $\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j = -2\nu_t \bar{S}_{ij}$  con  $\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)$  siendo el tensor de tasa de deformación de escala resuelta. La viscosidad turbulenta se calcula como  $\nu_t = C_v \Delta \sqrt{k^{sgs}}$  basado en un modelo de turbulencia LES de una ecuación, el modelo de energía cinética dinámica local (LDKM) desarrollado por Kim y Menon (1999), donde  $k^{sgs} = \frac{1}{2} (\overline{u_k u_k} - \bar{u}_k \bar{u}_k)$ .

El modelo considera el tamaño del filtro  $\bar{\Delta}$  de la malla, resolviendo una ecuación de transporte para la energía cinética turbulenta de SGS  $k^{sgs}$ :

$$\frac{\partial k^{sgs}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_j k^{sgs}) = -\tau_{ij}^{sgs} \bar{S}_{ij} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{1}{Re} + \nu_t \right) \frac{\partial k^{sgs}}{\partial x_j} - C_\varepsilon \frac{(k^{sgs})^{3/2}}{\bar{\Delta}} \quad (3)$$

En la ecuación anterior, los tres términos en el lado derecho corresponden a la producción, difusión y disipación de  $k^{sgs}$ . Los coeficientes dinámicos  $C_\varepsilon$  y  $C_v$  se emplean para determinar la tasa de disipación de SGS  $\varepsilon_{ij}$  y la viscosidad turbulenta  $\nu_t$  respectivamente, y se calculan a partir del campo de flujo resuelto considerando un tamaño de filtro de prueba  $\hat{\Delta} = 2\bar{\Delta}$ . En este contexto, el coeficiente  $C_\varepsilon$  está asociado con la tasa de disipación de la energía de la turbulencia a

escala submalla, mientras que el coeficiente  $C_v$  está relacionado con la viscosidad turbulenta submalla. El coeficiente  $C_v$  se obtiene aplicando el método de mínimos cuadrados sugerido por Lilly (1992) y  $C_\varepsilon$  se basa en la disipación de SGS  $\varepsilon^{sgs}$ :

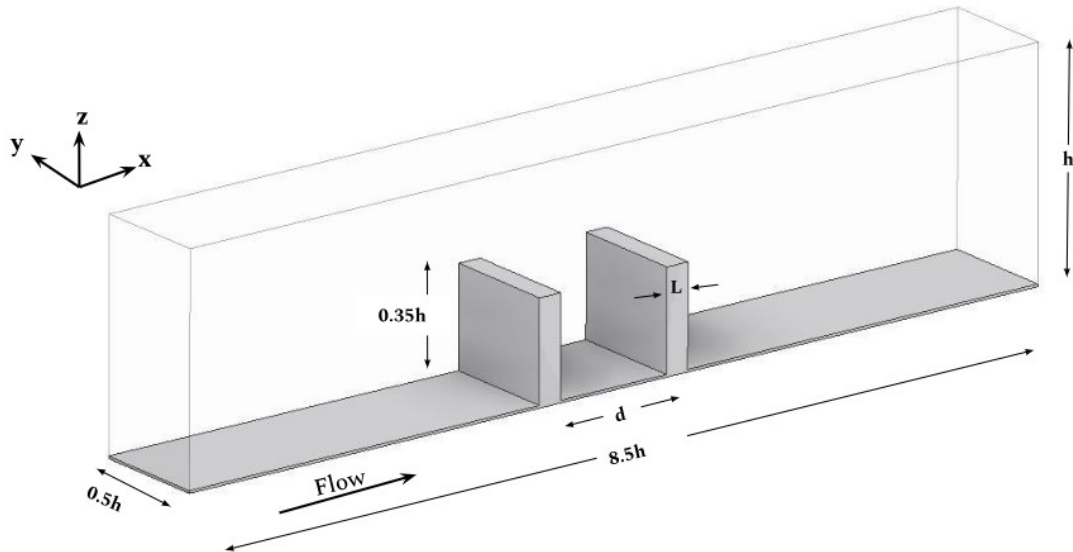
$$C_v = \frac{1}{2} \frac{L_{ij} \sigma_{ij}}{\sigma_{lm} \sigma_{lm}} \quad (4)$$

$$C_\varepsilon = \left( \frac{1}{Re} + \nu_t \right) \frac{\hat{\Delta}}{\sqrt{k}^{test}} \left( \frac{\partial \hat{u}_i}{\partial x_j} \frac{\partial \hat{u}_i}{\partial x_j} - \frac{\partial \hat{u}_i}{\partial x_j} \frac{\partial \hat{u}_i}{\partial x_j} \right) \quad (5)$$

Donde  $L_{ij} = \hat{u}_i \hat{u}_j - \hat{u}_i \hat{u}_j$  es el tensor de esfuerzos de Leonard,  $\sigma_{ij} = \hat{\Delta} \hat{S}_{ij} \sqrt{k}^{test}$ , y  $k^{test} = \frac{1}{2} \left( \hat{u}_i \hat{u}_j - \hat{u}_i \hat{u}_j \right)$

### 3. CONFIGURACIÓN COMPUTACIONAL

Para este estudio, se llevó a cabo una simulación de un flujo en un canal tridimensional. Se consideró un número de Reynolds de  $Re = 42900$ , para replicar las condiciones del diseño experimental llevado a cabo por You y Tinoco (2023).



**Figura 1:** Representación tridimensional del dominio de simulación, diseñado para un número de Reynolds de  $Re = 42900$ . La figura muestra las dimensiones precisas del canal y de los obstáculos, destacando la distancia relativa y la orientación de estos en relación al flujo.

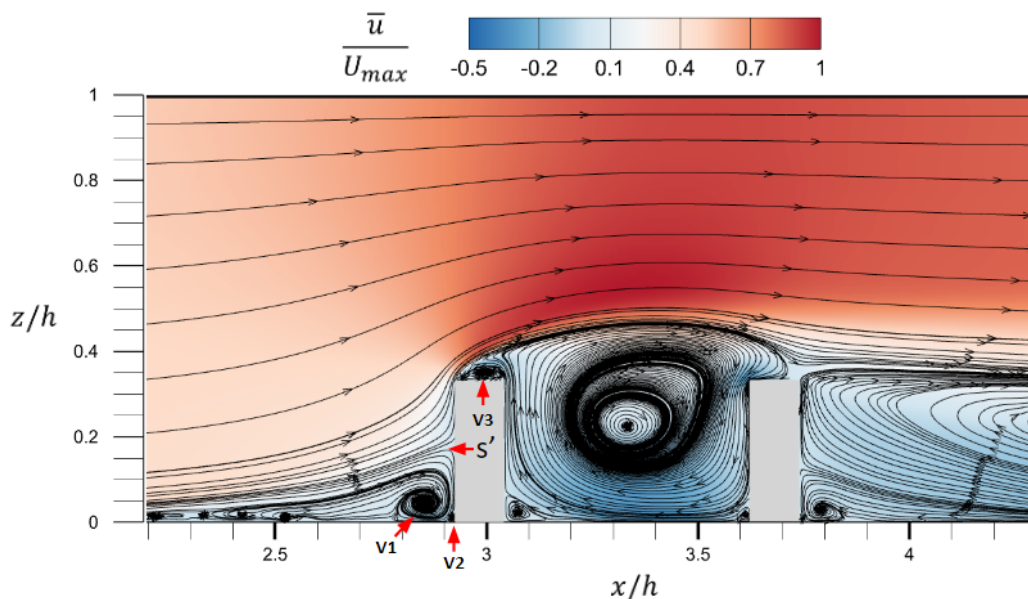
El dominio computacional abarca el canal experimental completo, extendiéndose  $8.5h \times 0.5h \times h$  en las direcciones de flujo ( $x$ ), transversal ( $y$ ) y vertical ( $z$ ), respectivamente, tal como se ilustra en la Figura 1. La altura del agua,  $h$  (de 0.3 m) y la velocidad *bulk* ( $U_b = 0.143$  m/s) fueron utilizadas para adimensionalizar las ecuaciones.

Se colocaron dos obstáculos en el canal, cada uno con una longitud  $L = 0.035$  m, un ancho  $B = 0.15$  m y una altura  $H = 0.105$  m. Estos obstáculos se ubicaron equidistantes del centro del canal. El parámetro de estudio es la distancia  $d$  entre los dos obstáculos, que en los experimentos varía desde  $d = 1L$  hasta  $d = 10L$  (es decir, de 0.035 m a 0.35 m).

En este estudio, se consideró el caso más representativos, correspondiente a la distancia  $d/L = 5$ . Las condiciones de flujo fueron subcríticas y en régimen turbulento, aspectos de gran relevancia en la hidráulica fluvial y el estudio de la dinámica de ríos.

#### 4. FLUJO ENTRE OBSTÁCULOS

El análisis de las características del flujo se realizó a través de patrones en los contornos del flujo promedio (ver Figura 2). Al encontrarse con el primer obstáculo, se observa una disminución abrupta en la velocidad del flujo. En la región del flujo que enfrenta el obstáculo, se forman múltiples vórtices como consecuencia de la separación del flujo del fondo, un fenómeno previamente documentado por Simpson (2001). Se identifica un vórtice principal o vórtice de herradura (V1 en Figura 2), seguido por un vórtice de mucho menor tamaño (V2 en Figura 2), el cual es causado por la separación de la capa límite en la zona donde el flujo enfrenta al objeto. Esta dinámica ha sido reportada por diversos trabajos, como los trabajos de Martuzini y Tropea (1993) y Tummers et al. (2005).

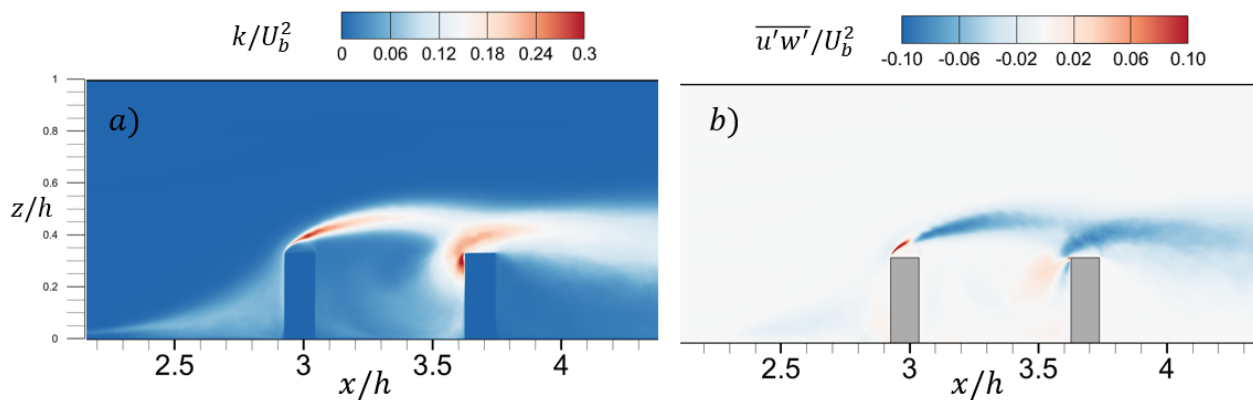


**Figura 2:** Representación gráfica de la velocidad media normalizada respecto a la velocidad máxima ( $U_{max}$ ) en el plano transversal  $y/h=0.5$ , evidenciando las zonas de recirculación y los patrones de flujo asociados con la presencia de obstáculos.

La zona etiquetada como S' en la Figura 2 destaca como la zona de separación en la región del flujo que enfrenta al primer obstáculo. Diversos análisis han sido realizados respecto a las características del flujo en esta zona, incluyendo análisis topológicos para caracterizar puntos sillas y nodales (Cao et al., 2022). Sobre el primer bloque es posible observar un vórtice (Sumner, 2013), en la zona de recirculación sobre el primer bloque (V3 en Figura 2).

En el escenario analizado con una relación de distancia entre obstáculos  $d/L = 5$ , la estructura del flujo exhibe características distintivas cruciales para entender la hidrodinámica en el canal (You y Tinoco, 2023). Se identifica una zona de recirculación principal entre los dos obstáculos, donde un vórtice dominante con vorticidad negativa en la dirección transversal se forma, impulsado predominantemente por el flujo superior que interactúa con la geometría de los obstáculos.

Además, en la región entre los obstáculos, se observan vórtices secundarios más pequeños en las esquinas, generados por la interacción entre el flujo rotatorio y las paredes de los bloques. Se nota una diferencia significativa en las velocidades entre el centro del vórtice en la región entre los bloques, y la velocidad generada en la región de la capa de corte, siendo esta última de casi un orden de magnitud mayor.

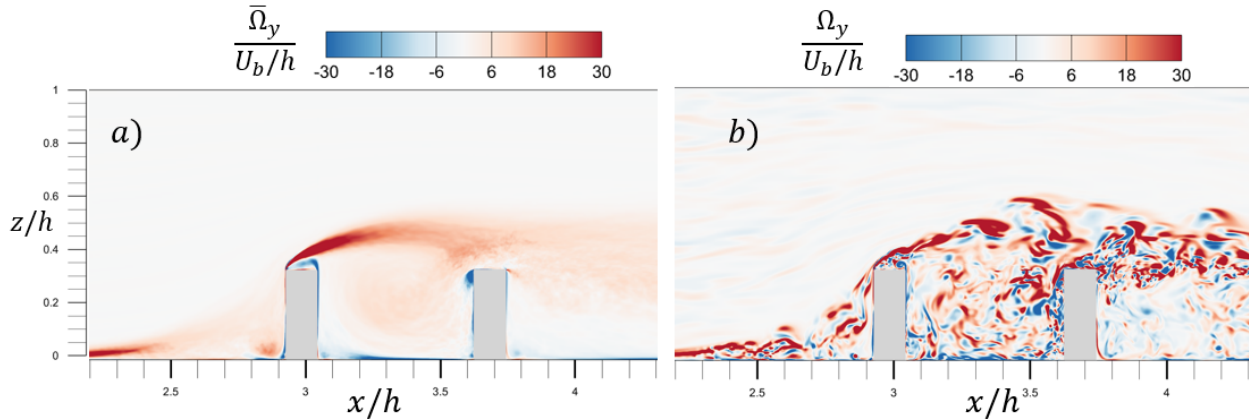


**Figura 3:** Visualización de contornos en el plano  $y/h=0.5$ , donde la figura a) muestra la distribución de la energía cinética turbulenta normalizada, y la figura b) presenta el esfuerzo cortante turbulento normalizado, derivado de las fluctuaciones de velocidad  $u'$  y  $w'$ .

La interacción del flujo con el primer obstáculo provoca una separación, generando una capa de corte donde se evidencia un pico pronunciado tanto en la energía cinética turbulenta ( $k$ ) como en la vorticidad a la altura exacta del obstáculo, indicando una zona de alta turbulencia y rotación en el flujo. Las Figuras 3 y 4 ilustran los contornos de la energía cinética turbulenta ( $k$ ) y la vorticidad, respectivamente, mostrando una disminución en la energía cinética turbulenta después del primer pico. Esta disminución se atribuye al intercambio vertical intensificado entre los flujos internos y externos en la entrada de los espacios entre los obstáculos, lo que induce estructuras de flujo recirculantes, conduciendo a un incremento posterior en el nivel de turbulencia conforme el flujo se desplaza aguas abajo. Este comportamiento se alinea con los hallazgos de Le Ribault et al. (2021), quienes detallan la dinámica de la zona de recirculación en configuraciones similares,

enfaticando la influencia del espacio entre obstáculos en la turbulencia y las estructuras de flujo recirculantes.

La naturaleza tridimensional del flujo, la presencia de múltiples obstáculos y la turbulencia inherente en el régimen de flujo añaden complejidad a la dinámica en la zona de recirculación. La interacción entre los vórtices generados y la estructura del flujo entrante, así como la respuesta del flujo a las variaciones en la geometría y la configuración de los obstáculos, demandan un análisis meticuloso y una interpretación cuidadosa para elucidar el comportamiento integral del flujo en el dominio analizado.



**Figura 4:** Representación de contornos en el plano  $y/h=0.5$ , destacando la vorticidad en dirección transversal. En la figura a) se visualiza la distribución promediada de la vorticidad transversal normalizada, mientras que en la figura b) se exhiben instantáneas de la misma vorticidad transversal.

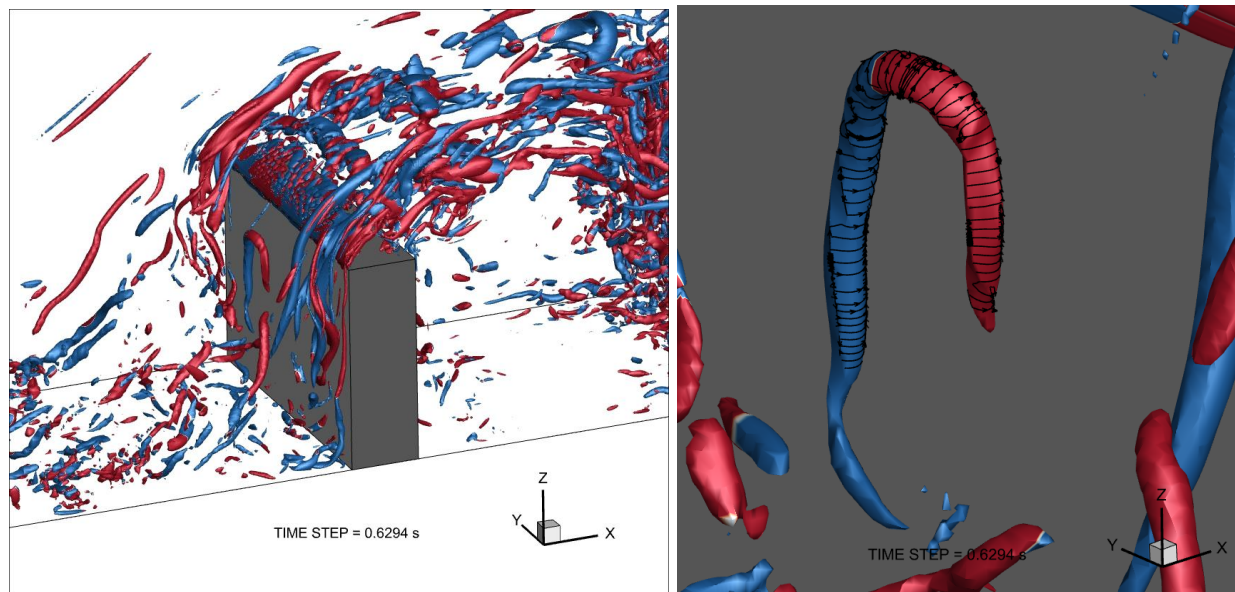
El incremento en la turbulencia y la vorticidad aguas abajo sugiere la evolución de las estructuras de flujo dentro del espacio entre obstáculos, con una turbulencia notable especialmente hacia la esquina derecha del espacio. Posterior al segundo obstáculo, el flujo se torna más inestable, manifestando vórtices de diversas escalas. Estas estructuras vorticales coherentes son cruciales para el transporte de partículas, anticipando una distribución de partículas influenciada por la longitud del espacio entre los obstáculos.

Para una comprensión más profunda de la dinámica coherente del flujo entre los obstáculos sumergidos y la interfaz con el canal principal, se presentan las isosuperficies tridimensionales (3D) instantáneas de  $q$  (según el criterio propuesto por Hunt et al., 1988) coloreados por la helicidad en la Figura 5. La helicidad es una medida de la alineación entre el vector de vorticidad y el vector de velocidad en un punto dado del flujo, proporcionando información sobre la torsión y la orientación de las estructuras vorticales en la dinámica del flujo. El criterio  $q$  es una medida de la rotación local del flujo, definida como la diferencia entre la magnitud de la tasa de deformación y la tasa de rotación del flujo. Este criterio ayuda a identificar las regiones de flujo rotacional y es ampliamente utilizado para visualizar estructuras vorticales en flujos turbulentos.

El desprendimiento de vórtices se origina en el borde delantero de la interfaz, generando una secuencia de vórtices alineados verticalmente que viajan e impactan en la esquina de salida. La Figura 5 también revela una interacción compleja entre las estructuras coherentes en la dirección

del flujo y los vórtices a gran escala dentro y fuera del espacio entre los bloques, donde los vórtices columnares de la capa de corte que emergen en la interfaz se alargan y se conectan mediante estructuras vorticales en la dirección del flujo, impactando en el borde de salida del espacio entre los bloques.

En particular, se observan fenómenos como los vórtices de punta, o tip vortex, (Wang et al., 2004; Koken y Constantinescu, 2009), que emergen cuando el flujo se separa de la esquina del primer obstáculo. Además, se nota la generación de vórtices en forma de horquilla, o *hairpin vortex*, en la pared aguas arriba del primer bloque. Aunque es posible discernir este último tipo de vórtices en la capa de corte al examinar detenidamente la Figura 5, el mecanismo subyacente y la confirmación de su existencia requieren un análisis más exhaustivo. Estas estructuras, ejemplifican las configuraciones vorticales coherentes que añaden complejidad a la dinámica del flujo, y están comúnmente asociadas con la separación del flujo y la interacción con superficies sólidas.



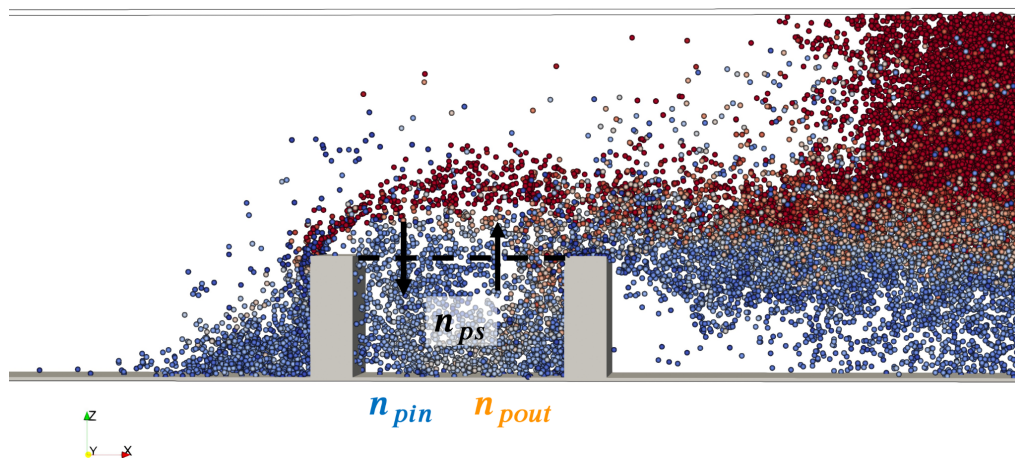
**Figura 5:** Visualizaciones tridimensionales que representan las isosuperficies de  $q$  ( $q = 2000$ ) coloreados por la helicidad. Estas superficies se basan en el criterio propuesto por Hunt et al. (1988) y sirven para examinar la dinámica coherente del flujo alrededor de obstáculos sumergidos. En la imagen de la izquierda, se observan estructuras complejas de vorticidad que interactúan con el obstáculo, mientras que en la imagen de la derecha se detalla una formación coherente de vórtice ascendente llamada *hairpin vortex*.

La amalgama de estructuras vorticales y su interacción con los obstáculos subyace a la complejidad del flujo, lo que resalta la importancia de un análisis detallado y una interpretación cuidadosa para entender el comportamiento del flujo en tales configuraciones. Además, la revisión de literatura adicional y la comparación con estudios previos en configuraciones similares puede proporcionar un marco robusto para interpretar los resultados presentes, y proponer estrategias para manipular las características del flujo en aplicaciones prácticas, como la optimización de sistemas hidráulicos y fluviales.

## 5. DINÁMICA LAGRANGIANA DEL TRANSPORTE DE PARTÍCULAS

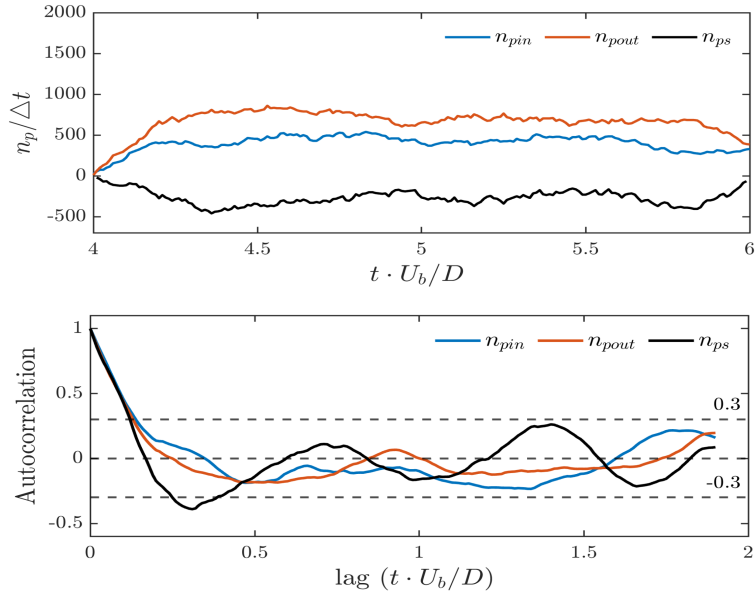
El estudio subsiguiente se enfoca en la dinámica Lagrangiana del transporte de partículas en el flujo turbulento sobre los obstáculos. Para llevar a cabo esta investigación, se introdujeron 100,000 partículas trazadoras (sin masa ni inercia) en el flujo y se rastreó su trayectoria a lo largo del tiempo. Se utilizó una interpolación de Hermite de 4° orden para determinar la velocidad del fluido en la posición instantánea de cada partícula. El objetivo primordial es comprender los mecanismos y escalas temporales dominantes que caracterizan el transporte de masa en este sistema turbulento desde una perspectiva Lagrangiana.

La Figura 6 ilustra el transporte de partículas a través de los obstáculos en un instante específico, con las partículas coloreadas según su velocidad. La dinámica Lagrangiana del transporte de masa en el sistema se ve notablemente influenciada por tres mecanismos principales: (1) el desprendimiento de vórtices que ocurre entre los obstáculos, advectando partículas en la capa de corte; (2) el vórtice generado aguas arriba del primer obstáculo, que retiene partículas y alimenta la capa de corte; y (3) el impacto de las partículas contra el segundo obstáculo, que conlleva un suministro continuo de masa en el espacio entre bloques.



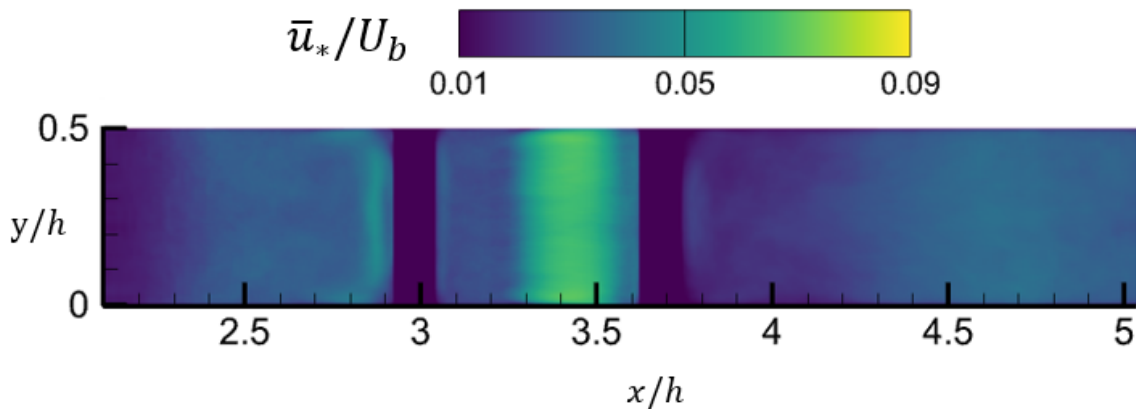
**Figura 6:** Transporte de partículas a través de los obstáculos. Partículas coloreadas por su velocidad, donde azul y rojo corresponden a bajas y altas velocidades respectivamente).

Para dilucidar las escalas temporales características del transporte de masa, calculamos las series temporales del flujo de partículas hacia la cavidad entre obstáculos ( $n_{pin}$ ), fuera de ella ( $n_{out}$ ), y la variación de masa al interior ( $n_{ps}$ ) como se muestra con flechas en la figura 6. En la Figura 7 se muestran las series de tiempo mencionadas y la autocorrelación de ellas, donde la periodicidad encontrada se relaciona con la escala temporal características de las estructuras coherentes responsables del intercambio de masa.



**Figura 7:** Flujos de masa en la cavidad entre obstáculos (arriba) y autocorrelación de las series (abajo). La periodicidad obtenida tiene relación con la escala característica de las estructuras coherentes responsables del intercambio de masa.

Es interesante observar que el esfuerzo de corte del lecho, representado por la velocidad de fricción en la Figura 8, exhibe una mayor magnitud en la región situada posterior al primer bloque y antes del segundo bloque. Esta manifestación de elevado esfuerzo de corte en la mencionada región podría tener múltiples implicancias sobre la dinámica del flujo y el transporte de partículas. En literaturas previas, se ha discutido que los altos valores de esfuerzo de corte pueden conducir a una mayor erosión del lecho en flujos geofísicos y ambientales (e.g., Nezu y Nakagawa, 1993; Buffin-Bélanger y Roy, 1998). En un contexto similar, la región de elevado esfuerzo de corte podría inducir una mayor movilización y resuspensión de partículas, alterando la dinámica de transporte de masa en el sistema.



**Figura 8:** Gráfico de contorno de velocidad de fricción  $\bar{u}_*$  promediada.

Además, el incremento en el esfuerzo de corte podría estar asociado con la intensificación de la turbulencia en la región entre bloques, lo que, a su vez, puede influir en la advección y dispersión de partículas. En estudios anteriores (e.g., Celik y Rodi, 1988; Guo y Julien, 2005), se ha sugerido que las regiones de elevado esfuerzo de corte pueden albergar estructuras vorticales robustas y zonas de recirculación que modulan el transporte Lagrangiano de partículas. La existencia de estas estructuras podría facilitar el tránsito de partículas entre los obstáculos y hacia el exterior de la cavidad, contribuyendo a un intercambio más activo de masa entre las regiones.

La relación entre el esfuerzo de corte y la dinámica de transporte de partículas subraya la necesidad de un entendimiento profundo de cómo las características del flujo Euleriano, como el esfuerzo de corte, influyen en la dinámica Lagrangiana del sistema. Un análisis detallado de cómo varía el esfuerzo de corte con respecto a los parámetros geométricos y de flujo, así como su interacción con las estructuras vorticales y el transporte de partículas, podría proporcionar insights valiosos para entender y prever el comportamiento del flujo y el transporte de partículas en configuraciones con obstáculos sumergidos.

Este análisis sugiere que el estudio de la variabilidad y la distribución del esfuerzo de corte en el lecho puede ser instrumental para entender y modelar la dinámica de transporte de partículas en flujos turbulentos sobre geometrías complejas. Por lo tanto, futuras investigaciones podrían enfocarse en desentrañar la relación entre el esfuerzo de corte, la generación y evolución de estructuras vorticales, y el transporte Lagrangiano de partículas en flujos sobre geometrías complejas.

## **6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES**

El estudio del transporte de partículas en corrientes fluviales, especialmente en la presencia de obstáculos sumergidos, revela una complejidad inherente con relevancia crítica tanto para los ecosistemas acuáticos como para diversas aplicaciones en el ámbito de la ingeniería. Utilizando Simulaciones de Grandes Remolinos (LES, por sus siglas en inglés), este trabajo ha explorado profundamente la dinámica del flujo entre estos obstáculos. Los hallazgos resaltan la emergencia de zonas de recirculación y capas de corte, que son esenciales para comprender la dinámica del flujo y el transporte de partículas.

Las simulaciones numéricas de alta resolución se han manifestado como una herramienta invaluable para descifrar flujos turbulentos inestables, especialmente en contextos donde los obstáculos sumergidos poseen una influencia significativa. La meticulosa representación de las estructuras turbulentas proporcionada por las LES, ha permitido una visión detallada que, sin duda, enriquecerá futuras exploraciones en esta línea de investigación.

Mirando hacia el futuro, la investigación del transporte de partículas en ríos con obstáculos sumergidos se despliega como un vasto campo de investigación. Una exploración detallada considerando diferentes valores de  $d/L$ , así como del número de Reynolds y características específicas de los obstáculos, podría entregar un entendimiento más profundo respecto a la naturaleza del flujo y el impacto en el transporte de partículas. Además, la relación entre el esfuerzo de corte y la dinámica del transporte de partículas sugiere una veta intrigante para futuras investigaciones.

El desarrollo de modelos mejorados que puedan predecir con precisión la interacción entre el flujo y las partículas en escenarios complejos se erige como una área de investigación prometedora. La amalgama de conocimientos teóricos y empíricos en estos modelos podría potenciar nuestra capacidad para predecir y comprender la dinámica del flujo en ríos con obstáculos sumergidos. La aplicación práctica de estos hallazgos, desde la restauración ecológica hasta proyectos de hidroingeniería, podría beneficiarse significativamente de estos modelos avanzados.

La comprensión detallada de las características del flujo en la zona de recirculación y las dinámicas de flujo asociadas es imperativa para interpretar y prever el comportamiento del flujo en configuraciones con obstáculos sumergidos, lo cual posee implicancias directas en el diseño y la optimización de sistemas hidráulicos y fluviales. Este análisis sugiere que la exploración de la variabilidad y la distribución del esfuerzo de corte en el lecho puede ser instrumental para entender y modelar la dinámica de transporte de partículas en flujos turbulentos sobre geometrías complejas.

Conclusivamente, las investigaciones futuras podrían enfocarse en desentrañar la relación entre el esfuerzo de corte, la generación y evolución de estructuras vorticales, y el transporte Lagrangiano de partículas en flujos sobre geometrías complejas. El abordaje de estas interrelaciones abrirá nuevos horizontes para la optimización de sistemas hidráulicos y fluviales, contribuyendo así a la extensión del conocimiento y la práctica en el dominio de la hidráulica fluvial y el transporte de sedimentos, y fortaleciendo el corpus teórico y aplicado en este ámbito crucial de la ingeniería hidráulica y fluvial.

## **AGRADECIMIENTOS**

Esta investigación fue parcialmente apoyada por la infraestructura de supercómputo del NLHPC (ECM-02)

## **REFERENCIAS**

Barros, M., y Escauriaza, C. (2023). Lagrangian and Eulerian Perspectives of Turbulent Transport Mechanisms in a Lateral Cavity. *Journal of Fluid Mechanics*. Under review.

Buffin-Bélanger, T., & Roy, A. G. (1998). Effects of a pebble cluster on the turbulent structure of a depth-limited flow in a gravel-bed river. *Geomorphology*, 25(3-4), 249-267.

Cao, Y., Tamura, T., Zhou, D., Bao, Y., & Han, Z. (2022). Topological description of near-wall flows around a surface-mounted square cylinder at high Reynolds numbers. *Journal of Fluid Mechanics*, 933, A39.

Celik, I. B., & Rodi, W. (1988). Modeling suspended sediment transport in nonisothermal open channel flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 114(10), 1157-1191.

Chung, H., Mandel, T., Zarama, F., y Koseff, J. R. (2021). Local and nonlocal impacts of gaps on submerged canopy flow. *Water Resources Research*, 57, e2019WR026915.

Dutta, S., Panigrahi, P. K., & Muralidhar, K. (2008). Experimental investigation of flow past a square cylinder at an angle of incidence. *Journal of engineering mechanics*, 134(9), 788-803.

Follett, E., y Nepf, H. (2018). Particle retention in a submerged meadow and its variation near the leading edge. *Estuaries and coasts*, 41, 724-733.

Goodarzi, D., Sookhak Lari, K., Khavasi, E., y Abolfathi, S. (2020). Large eddy simulation of turbidity currents in a narrow channel with different obstacle configurations. *Scientific Reports*, 10(1), 12814.

Guo, J., & Julien, P. Y. (2005). Shear stress in smooth rectangular open-channel flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(1), 30-37.

Hunt, J. C. R., Wray, A. A. y Moin, P. (1988). Eddies, streams, and convergence zones in turbulent flows. En *Proceedings of the Summer Program*. Center for Turbulence Research, NASA Ames/Stanford Univ., páginas 193-208.

Kazem, M., Afzalimehr, H., y Sui, J. (2021). Formation of coherent flow structures beyond vegetation patches in channel. *Water*, 13(20), 2812.

Kim, Won-Wook y Menon, Suresh (1999). An unsteady incompressible Navier–Stokes solver for large eddy simulation of turbulent flows. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 31(6), 983–1017.

Koken, M., & Constantinescu, G. (2009). An investigation of the dynamics of coherent structures in a turbulent channel flow with a vertical sidewall obstruction. *Physics of Fluids*, 21(8).

Le Ribault, C., Vinkovic, I., y Simoëns, S. (2021). Large eddy simulation of particle transport and deposition over multiple 2D square obstacles in a turbulent boundary layer. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(16), e2020JD034461.

Lilly, D. K. (1992). A proposed modification of the Germano subgrid-scale closure method. *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, 4(3), 633-635.

Martinuzzi, R. J., y Havel, B. (2000). Turbulent flow around two interfering surface-mounted cubic obstacles in tandem arrangement. *J. Fluids Eng.*, 122(1), 24-31.

Martinuzzi, R., & Tropea, C. (1993). The flow around surface-mounted, prismatic obstacles placed in a fully developed channel flow (data bank contribution).

Mondal, B., Pati, S., y Patowari, P. K. (2019). Analysis of mixing performances in microchannel with obstacles of different aspect ratios. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 233(5), 1045-1051.

Nezu, I., & Nakagawa, H. (1993). *Turbulence in open-channel flows*. IAHR Monograph, A.A. Balkema.

Ortega-Casanova, J. (2016). Enhancing mixing at a very low Reynolds number by a heaving square cylinder. *Journal of Fluids and Structures*, 65, 1-20.

Roca, M., Martín-Vide, J. P., & Blanckaert, K. (2007). Reduction of bend scour by an outer bank footing: Footing design and bed topography. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(2), 139-147.

Sui, J., Karney, B., & Shamloo, H. (2018). Scour Depth at Bridges: Method Including Soil Properties. I: Maximum ... *Journal of Hydraulic Engineering*, 144(10), 04018069.

Simpson, R. L. (2001). Junction flows. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 33(1), 415-443.

Sumner, D. (2013). Flow above the free end of a surface-mounted finite-height circular cylinder: A review. *Journal of Fluids and Structures*, 43, 41-63.

Tummers, M. J., Flikweert, M. A., Hanjalić, K., Rodink, R., & Moshfegh, B. (2005). Impinging jet cooling of wall mounted cubes. In *Engineering Turbulence Modelling and Experiments 6* (pp. 773-782). Elsevier Science BV.

Wang, H. F., Zhou, Y., Chan, C. K., Wong, W. O., & Lam, K. S. (2004, December). Flow structure around a finite-length square prism. In *15 th Australasian Fluid Mechanics Conference* (pp. 13-17).

You, H., y Tinoco, R. O. (2023). Turbulent Coherent Flow Structures to Predict the Behavior of Particles With Low to Intermediate Stokes Number Between Submerged Obstacles in Streams. *Water Resources Research*, 59(2), e2022WR032439.