

DOI: 10.24850/j-tyca-2025-05-02

Artículos

Comparación experimental de la socavación alrededor de pila cuadrada de puente con y sin paneles sumergidos

Experimental comparison of scour around square bridge pier with and without submerged vanes

Joselyn Barros¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7628-6899>

Marcelo Echeverría², ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0152-1161>

Khaled Hamad-Mohamed³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9365-9602>

Jorge Escobar-Ortiz⁴, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3862-1657>

Darío Calderón-Vásquez⁵, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2171-5809>

¹Centro de Investigaciones y Estudios de Ingeniería de los Recursos Hídricos & Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, stephanya.barros@gmail.com

²Centro de Investigaciones y Estudios de Ingeniería de los Recursos Hídricos & Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, marcelo_echeverria_93@outlook.com



³Centro de Investigaciones y Estudios de Ingeniería de los Recursos Hídricos & Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, khaled.hamad@epn.edu.ec

⁴Centro de Investigaciones y Estudios de Ingeniería de los Recursos Hídricos & Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, jorge.escobaro@epn.edu.ec

⁵Centro de Investigaciones y Estudios de Ingeniería de los Recursos Hídricos & Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, dario.calderon@epn.edu.ec

Autor para correspondencia: Jorge Escobar-Ortiz,
jorge.escobaro@epn.edu.ec

Resumen

En el presente artículo se presentan los resultados de la investigación experimental sobre la socavación alrededor de una pila de puente de sección cuadrada en presencia de paneles sumergidos y su comparación con la investigación realizada en ausencia de estos, teniendo ambas iguales condiciones de contorno. Para el estudio se usó arena con una granulometría conocida y uniforme colocada en el tramo de control del canal, una pila de hormigón de sección cuadrada y paneles sumergidos hechos en acrílico. La investigación se desarrolló en el canal hidrodinámico ubicado en las instalaciones del Centro de Investigaciones y Estudios en Recursos Hídricos de la Escuela Politécnica Nacional (CIERHI-EPN) e incluye lo siguientes: la medición experimental de la acumulación de sedimento en el foso de socavación local que se genera alrededor de la

pila en presencia de los paneles; el transporte de sedimentos; los cambios generados en la topografía del fondo debido a los vórtices inducidos por los paneles; el procedimiento de medición de velocidades instantáneas de un flujo turbulento aguas abajo de la pila usando un velocímetro acústico Doppler (ADV por sus siglas en inglés) marca SonTek modelo "FlowTracker 2", y el tratamiento de datos realizado. La comparación con los resultados obtenidos en una investigación previa (sin el uso de paneles sumergidos) permite demostrar que el uso de paneles sumergidos disminuye el efecto de la socavación al pie de las pilas y genera cambios en las características de la turbulencia.

Palabras clave: socavación, paneles sumergidos, turbulencia, transporte de sedimentos, pilas de puentes.

Abstract

This article presents the results of the experimental research on scour around a bridge pier in the presence of submerged vanes and their comparison with the research carried out in the absence of vanes, both having the same boundary conditions. For the study, we used sand with a known and uniform granulometry, placed in a control section of the channel, a square-section concrete pier and submerged vanes made of hard acrylic. The research was developed in the hydrodynamic channel located in the facilities of the Center for Research and Studies in Water Resources of the National Polytechnic School (CIERHI-EPN) and includes: The experimental measurement of the filling of the local scour pier generated around the pier in presence of the vanes; sediment transport; changes generated in the bed topography due to the vortices induced by

the vanes; the instantaneous velocity measurement procedure of a turbulent flow downstream of the pier using an Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) brand Sontek model FlowTracker 2, and the data processing carried out. Comparison with the results obtained in a previous investigation (without the use of submerged vanes) shows that, using submerged vans reduces the effect of local scour of the piers and generates changes in turbulence characteristics.

Keywords: Scour, submerged vanes, turbulence, sediment transport, bridge piles.

Recibido: 27/03/2023

Aceptado: 08/07/2024

Publicado *ahead of print*: 22/07/2024

Versión final: 01/09/2025

Introducción

La socavación, en general, es el fenómeno que ocurre cuando el agua de una fuente hídrica va, poco a poco, desgastando su fondo, lo que provoca un descenso de este (Richardson & Davis, 2001). Dicho fenómeno produce el retroceso de las cascadas y de los acantilados que, al ser privados de apoyo en su base, se desploman progresivamente. También juega un papel esencial en la formación y migración de los meandros. Existen dos tipos de socavación (Martín, 2003):

- a) **Socavación general o socavación normal:** se define como el descenso del fondo de un río durante una crecida debido al aumento

de la capacidad de arrastre de la corriente al aumentar su velocidad. Por lo general se mantiene durante un periodo de tiempo corto (una o varias crecidas) o largo (uno o varios años) (Galiano-Ayala & Toapaxi-Alvarez, 2010).

b) **Socavación local:** es producida sobre todo por cambios en la geometría del cauce o por la presencia de obstáculos como estrechamientos, curvas o estructuras en la corriente de un río. Esto provoca un aumento de la capacidad de arrastre del flujo capaz de remover el material del lecho (Galiano-Ayala & Toapaxi-Alvarez, 2010). La socavación local afecta una zona limitada del fondo (alrededor del obstáculo) y se caracteriza por una fuerte turbulencia con remolinos y vórtices desarrollados por la obstrucción al paso del agua.

El vórtice que genera el foso de socavación al pie de la pila aguas arriba se denomina vórtice de herradura. Este vórtice tiene la potencia necesaria para mover las partículas del fondo y dar la forma característica de un cono invertido al foso de socavación (Bateman, Fernández, & Parker, 2006). En el análisis de la socavación local se pueden considerar dos escenarios: socavación en agua clara y socavación en lecho móvil.

a) **Socavación de aguas claras:** ocurre cuando la corriente no puede mover las partículas del material del fondo y solo los vórtices generan el movimiento de las partículas; por lo tanto, no hay reabastecimiento de sedimentos en el foso socavado (Gallardo-Guamán, 2019). El foso socavado alcanza una profundidad máxima o llega al equilibrio cuando el esfuerzo cortante en el lecho es menor que el requerido para el inicio del movimiento de las partículas (Galiano-Ayala & Toapaxi-Alvarez, 2010).

b) **Socavación en lecho móvil:** es producida tanto por el flujo como por los vórtices alrededor del obstáculo. Existe transporte de sedimentos del lecho desde aguas arriba y, por lo tanto, parte de este sedimento queda atrapado en el foso de socavación (Chiliquinga-Chiriboga & Pinto-Franco, 2019). En este caso, la socavación alcanza el equilibrio cuando la cantidad de material que sale del foso es compensada por la cantidad de material que entra (Galiano-Ayala & Toapaxi-Alvarez, 2010).

De acuerdo con un estudio realizado en Colombia (De-León-Barrios *et al.*, 2018), las fallas por socavación representan el 32 % de las causas de colapso de puentes, mientras que las crecientes y avalanchas, que también pueden generar socavación, constituyen el 43 %.

Las estrategias tradicionales utilizadas para proteger estructuras incluyen la construcción de diques, espigones, presas, varios tipos de revestimientos y dragados. Desafortunadamente, estos métodos son costosos y, a veces, incluso perjudican al medio ambiente. Por lo tanto, la técnica de paneles sumergidos se convierte en una alternativa viable, pues protege el medio ambiente y facilita el desarrollo sostenible alrededor del río (Odgaard, 2009). La socavación en pilas de puentes es un problema crítico que afecta la estabilidad de las infraestructuras hidráulicas. Métodos como el uso de estructuras inclinadas de riprap han demostrado ser efectivos para reducir la socavación al modificar las condiciones del flujo y desviar la socavación aguas abajo (Harasti, Gilja, Potočki, & Lacko, 2021).

La técnica de paneles sumergidos ha sido investigada desde 1980 por Jacob Odgaard en el Instituto de Investigación Hidráulica de Iowa (IIHR, por sus siglas en inglés) en la Universidad de Iowa (IU-EUA). El

principal objetivo de estos paneles es cambiar la dirección y los patrones del flujo, teniendo una aplicación práctica en obras como protección de bancos, mejoramiento de bancos de arena, y control de sedimentos en desviaciones y tomas de agua (Hamad-Mohamed, 2015).

La socavación alrededor de los pilares de puente es un fenómeno complejo influenciado por múltiples factores, incluidos los parámetros del flujo y la geometría del pilar. La literatura indica que la formación de un vórtice de herradura y los vórtices de estela son mecanismos primarios que contribuyen a la socavación. Estos vórtices son afectados por la orientación del flujo, que puede ser modificado por los paneles sumergidos (Reza-Namaee, Sui, & Wu, 2020). Un panel sumergido con un ángulo de ataque al flujo, por lo general entre 15 y 25°, induce una circulación horizontal en el flujo hacia aguas abajo. La circulación surge porque los gradientes de presión vertical en las superficies del panel hacen que el agua fluya a lo largo del lado de alta presión (aguas arriba), con lo que adquiere una componente de velocidad hacia arriba; mientras que en el lado de baja presión (aguas abajo) hay una componente de velocidad hacia abajo de los vórtices resultantes (lámina de vórtice) (Ouyang & Lai, 2013).

El ángulo de ataque de los paneles puede alterar de forma significativa la orientación del flujo alrededor del pilar, e influir directamente en la formación de vórtices y, en consecuencia, en la socavación y acumulación de sedimentos. Estudios han demostrado que el flujo alrededor de pilares complejos tiende a ser más turbulento y que la formación de vórtices, como el vórtice de herradura, juega un papel crucial en el transporte de sedimentos aguas abajo (Baranwal & Das, 2024; Yang, Li, Zou, & Chen, 2024); en el borde posterior del panel se

enrollan desde un vórtice grande que surge de una posición cerca de la parte superior del panel, tal como se observa en la Figura 1A. Este vórtice se transporta con el flujo aguas abajo, donde da lugar a un movimiento secundario o helicoidal del flujo, y a los cambios asociados con el esfuerzo cortante y la topografía del lecho. El vórtice que induce el panel se describe como un vórtice de energía inicial constante con una fuerza que decae debido a la difusión viscosa a medida que el vórtice se transporta aguas abajo (Odgaard & Spoljaric, 1986).

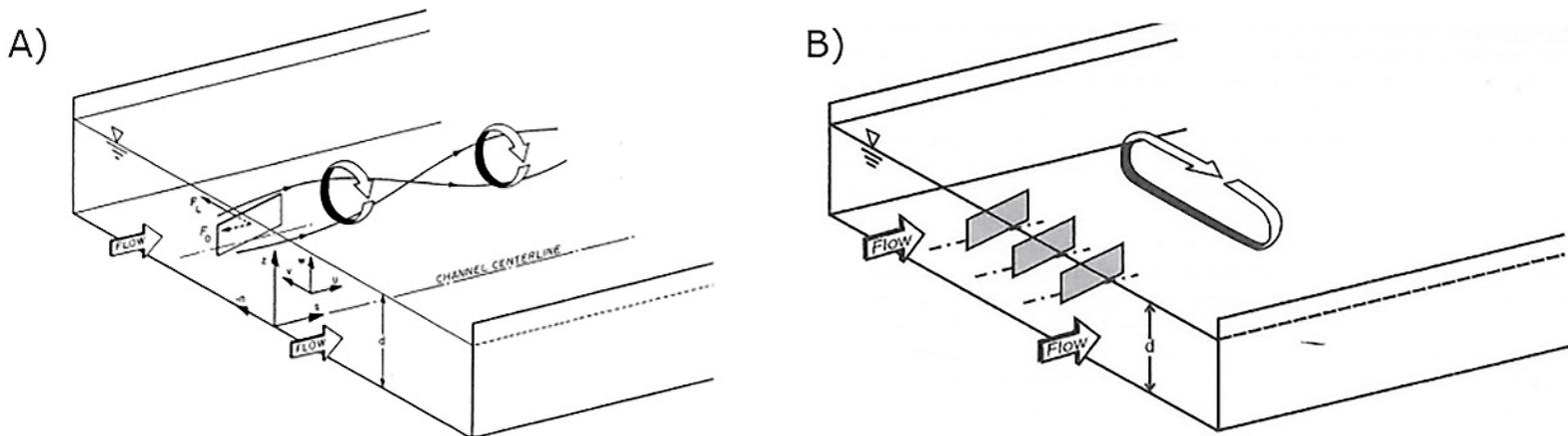


Figura 1. Esquema de circulación inducida por paneles sumergidos: A) un panel; B) un grupo de paneles (Odgaard & Wang, 1990).

El área del fondo del lecho afectada por un panel es limitada porque el vórtice generado es de un potencial constante y tendrá un tamaño máximo el instante en que el flujo abandona las paredes del panel. Después, la difusión viscosa irá mermando la energía del vórtice hasta desaparecer. Los paneles no tienen mayor impacto en la dirección

perpendicular al flujo más allá de tres veces la altura del panel (Odgaard & Wang, 1990).

De modo experimental, Odgaard y Wang (1990) observaron el flujo alrededor de un sistema de dos paneles (colocados uno junto al otro con la misma orientación). Concluyeron que si la distancia entre ellos es muy grande, el efecto del primer panel en el flujo alrededor del otro es nulo; cada panel genera su propio vórtice, y la circulación asociada es aproximadamente similar al efecto de un solo panel y los vórtices no se combinan. Si el espacio es pequeño, los paneles producen un vórtice combinado aguas abajo. En estas condiciones, la interacción entre los paneles se vuelve alta y los vórtices generados por los paneles interfieren entre sí. Esta interferencia causa una reducción en la circulación total debido a la capa de corte en el área entre los vórtices; en consecuencia, la circulación total inducida por dos paneles estrechamente espaciados es menos del doble que debido a un panel aislado. Con base en esto, es preciso colocar los paneles a una distancia tal que el vórtice individual generado por cada panel logre desarrollarse totalmente y, una vez alcanzado este punto, empiece a interactuar con los demás vórtices, sumándose y generando un único vórtice correspondiente a todo el sistema de paneles, como se observa en la Figura 1B.

Los estudios sobre la socavación alrededor de pilas de puentes y otras estructuras sumergidas ayudan a comprender mejor los mecanismos de interacción entre el flujo, los sedimentos y las estructuras. Este conocimiento es fundamental para mejorar los modelos numéricos y predictivos que se utilizan en la ingeniería civil (Du, Wang, Wang, Liang, & Pan, 2022). Estos estudios tienen una relevancia directa en el diseño y la construcción de infraestructuras como puentes, plataformas marinas y

estructuras costeras. Comprender cómo el flujo y la socavación afectan estas estructuras permite diseñar medidas de protección más efectivas, con lo que se mejora la seguridad y durabilidad de las mismas. Desarrollar estrategias de mitigación de riesgos es esencial para la planificación y gestión de proyectos de ingeniería en entornos acuáticos, donde las condiciones de flujo y sedimentación pueden variar de manera significativa (Du *et al.*, 2022).

Investigaciones recientes han explorado el uso de aletas sumergidas para reducir la socavación alrededor de las pilas de puentes. Ghorbani y Kells (2008) demostraron que las aletas reposicionadas estratégicamente pueden alterar los patrones de flujo y disminuir de forma significativa la socavación local. Además, estudios sobre las características de la turbulencia, como el realizado por Lee y Hong (2019), han mostrado que los flujos turbulentos son los principales responsables del transporte de sedimentos y la formación de socavación.

Esta investigación pretende establecer una comparación de los efectos que se producen en el transporte de sedimentos entre el uso y la ausencia de paneles sumergidos en condición de aguas claras. Utilizando los resultados obtenidos por Chiliquinga-Chiriboga y Pinto-Franco (2019) en "Análisis experimental en modelo físico de fenómenos de turbulencia causantes de erosión alrededor de pilas de puentes utilizando Acoustic Doppler Velocimeter ADV", se compararon parámetros tales como la velocidad instantánea, tensiones de Reynolds, energía y disipación turbulenta, e intensidades turbulentas. Estos parámetros permiten observar con mayor claridad las características y propiedades del flujo. Todo esto, con la finalidad de proporcionar una alternativa sencilla, económica y de bajo impacto ambiental al problema de socavación local

al que se enfrentan todas las estructuras ubicadas en cuerpos de agua. La investigación sobre la mitigación de socavación utilizando modificaciones estructurales, como paneles sumergidos, es respaldada por múltiples estudios que demuestran su efectividad. Por ejemplo, Du y Liang (2019) muestran cómo diferentes configuraciones estructurales pueden influir en la socavación, justificando la relevancia de estudios comparativos bajo condiciones controladas.

Materiales y métodos

La experimentación tuvo lugar en el canal hidrodinámico del Centro de Investigaciones y Estudios en Recursos Hídricos (CIERHI) de la Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador. Sus características geométricas son las siguientes: 25 m de longitud, 1 m de ancho, 0.8 m de profundidad y una pendiente variable (de 0 a 4 %), como se puede observar en la Figura 2A.

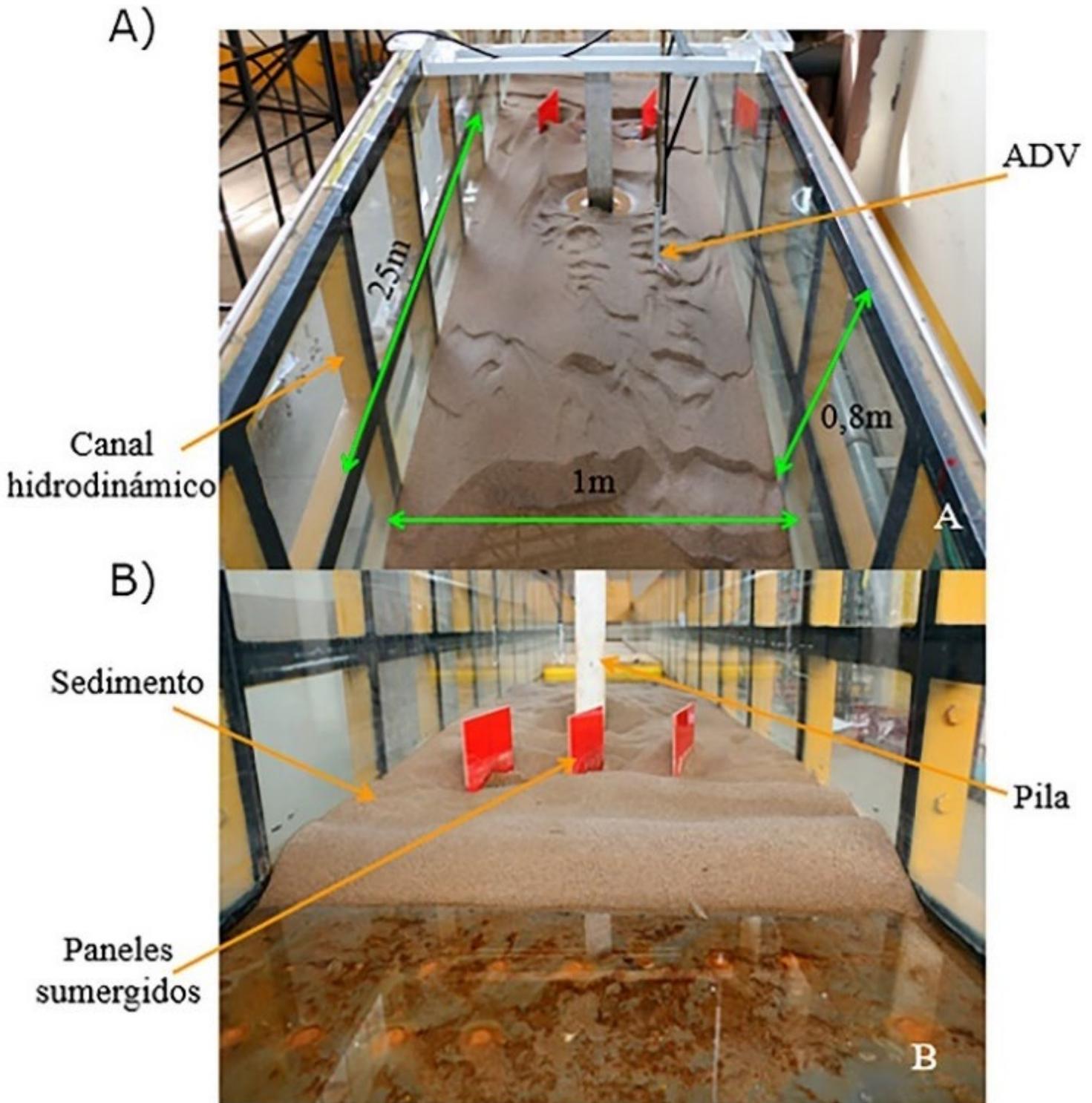


Figura 2. Canal hidrodinámico: A) dimensiones; B) elementos.

El ensayo del inicio del movimiento realizado por Chiliboga-Chiriboga y Pinto-Franco (2019) se reprodujo en el presente estudio y consistió en colocar la capa de sedimento en el canal, con un espesor de 10 cm y una longitud de 3.12 m. La pila se ubicó a 1.5 m aguas arriba del borde inferior de la capa de sedimento y en el centro del canal; el sedimento de granulometría conocida tiene un diámetro medio (D50) de 0.74 mm, parámetro necesario para utilizar el ábaco de Shields; se utilizó una pendiente longitudinal de 0.6 %, un caudal de 52.47 l/s y un calado de agua de 25 cm. La tensión crítica obtenida fue 0.42 N/m², mientras que la tensión del fondo fue 0.19 N/m², lo que resulta en una condición de aguas claras.

La elección de la geometría de las pilas fue un factor crítico para la presente investigación sobre la socavación alrededor de las estructuras de puente. Para este estudio, se escogió la pila cuadrada, ya que, en muchos países, incluyendo Ecuador, la construcción de puentes con pilas cuadradas sigue siendo una práctica común debido a consideraciones económicas y de diseño, a pesar de que las esquinas afiladas de las pilas cuadradas generan mayores turbulencias y vórtices (Moghanloo, Vaghefi, & Ghodsian, 2022). Analizar esta geometría permite evaluar las condiciones más desfavorables y proporcionar soluciones efectivas en los peores escenarios.

En la experimentación se utilizaron paneles sumergidos para alterar el flujo y reducir la socavación, tal como se ha demostrado en investigaciones previas (Ghorbani & Kells, 2008). El diseño de los paneles sumergidos se realizó usando las ecuaciones (1) a (6) recomendadas por Odgaard (2009):

$$15^\circ < \alpha < 25^\circ \quad (1)$$

$$0.12 < \frac{H}{y} < 0.48 \quad (2)$$

$$H \approx 0.33L \quad (3)$$

$$d_b \leq 1.5y \quad (4)$$

$$d_s < 7H \quad (5)$$

$$d_n \leq 3H \quad (6)$$

Donde:

α = ángulo de ataque del panel al flujo ($^\circ$)

H = altura del panel medida sobre el sedimento (cm)

y = calado del flujo (cm)

L = longitud del panel (cm)

d_b = distancia entre panel y pared del canal (cm)

d_s = distancia entre el panel y el eje de la pila (cm)

d_n = distancia entre paneles (cm)

En función de las distancias se determinó el número de paneles que deben colocarse. Según la literatura (Odgaard, 2009; Tajari, Dehghani, Halaghi, & Azamathulla, 2020), un ángulo de ataque efectivo se encuentra generalmente entre 10 y 20 grados. En nuestro estudio se adoptó un ángulo de ataque de 20°; la distancia entre paneles y la distancia hacia las paredes del canal es de 25 cm, por lo tanto, se instalaron tres paneles. Los paneles tienen una altura total de 0.2 m y una longitud de 0.25 m, como se observa en la Figura 3A.

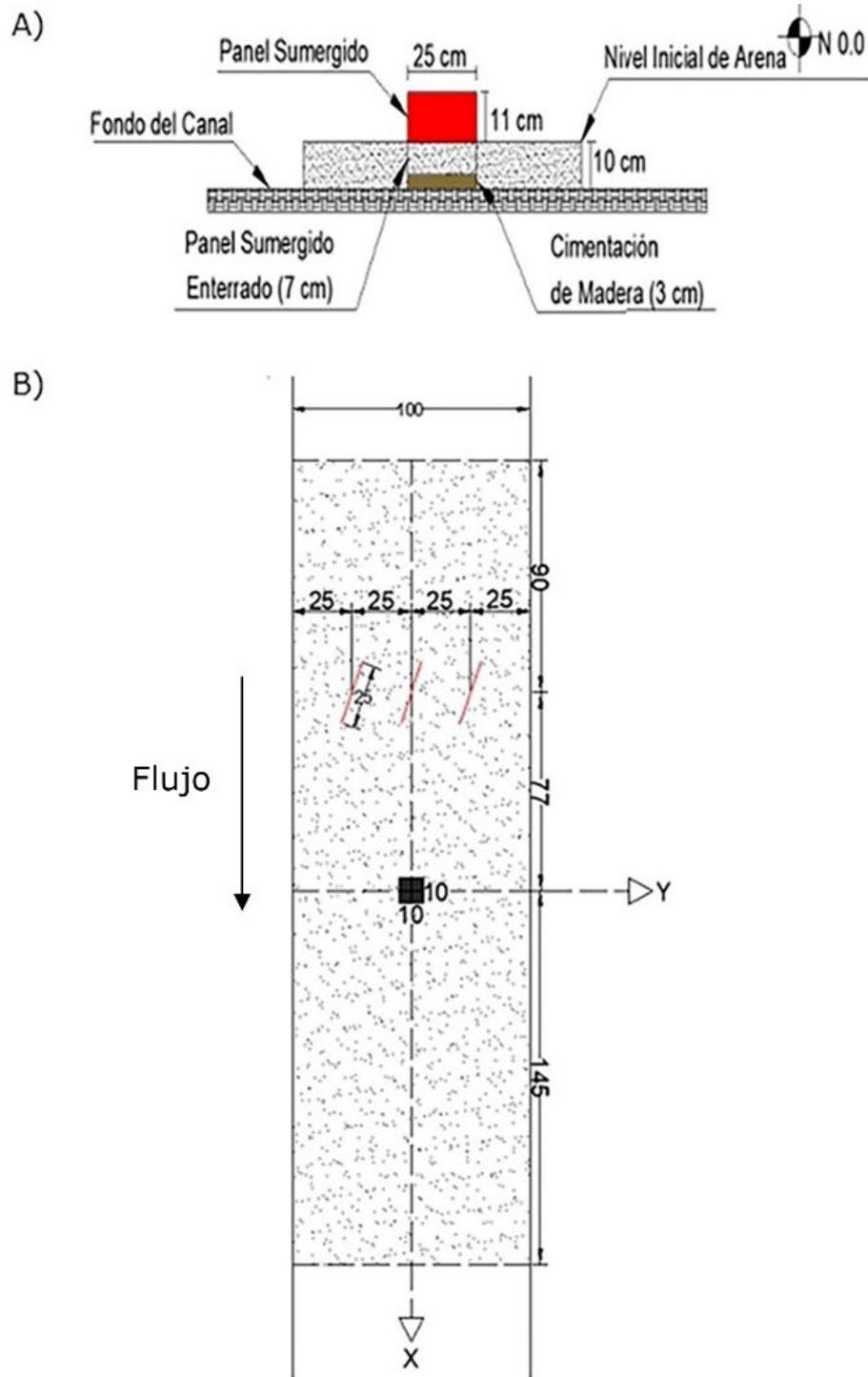


Figura 3. Esquema de la experimentación: A) vista en corte; B) vista en planta.

El caudal circuló por el canal durante aproximadamente 16 horas en dos periodos de ocho horas para generar el primer foso de socavación en ausencia de paneles y se midió la profundidad máxima del foso obtenido para proceder a la colocación de los paneles. Luego se procedió a realizar el ensayo de inicio de movimiento en condiciones similares a las realizadas por Chiliquinga-Chiriboga y Pinto-Franco (2019), lo que dio lugar a la formación de un nuevo foso de socavación alrededor de cada panel sumergido.

Se utilizaron velocímetros Doppler acústicos (ADV) para medir las velocidades tridimensionales y las intensidades turbulentas, los cuales se encontraron aguas debajo del pilar debido a la necesidad de obtener datos precisos y fiables, minimizando las interferencias que el pilar puede causar al equipo ADV; además, aguas arriba del pilar, el flujo puede estar más perturbado y menos desarrollado, con lo que existe la introducción de más ruido y errores en los datos debido a la interferencia y las características de la turbulencia en esa región; así, al colocar el ADV aguas abajo del pilar se garantiza lo descrito por García, Cantero, Niño y García (2005), y Voulgaris y Trowbridge (1998). La frecuencia de muestreo seleccionada fue de 25 Hz para capturar de modo adecuado las fluctuaciones rápidas en el flujo y la turbulencia, como se recomienda en estudios previos (García *et al.*, 2005; Voulgaris & Trowbridge, 1998). Se tomaron datos durante cuatro minutos en cada punto de la malla, formada por 10 puntos distanciados 10 cm entre sí en el eje X (desde $x = 35$ cm hasta $x = 125$ cm), 13 puntos distanciados 5 cm entre sí en el eje Y (desde $y = -30$ cm hasta $y = 30$ cm) y tres puntos distanciados 2 cm entre sí en el eje Z (desde $z = 3$ cm hasta $z = 7$ cm), dando un total

de 390 puntos coincidentes con los del estudio de Chiliquinga-Chiriboga y Pinto-Franco (2019), para mayor precisión en la comparación. Los ejes de medición usados para la malla se muestran en la Figura 4. Además, en la Tabla 1 se indica cómo se recopilaron las mediciones de velocidad, formando una malla con el espaciamiento establecido.

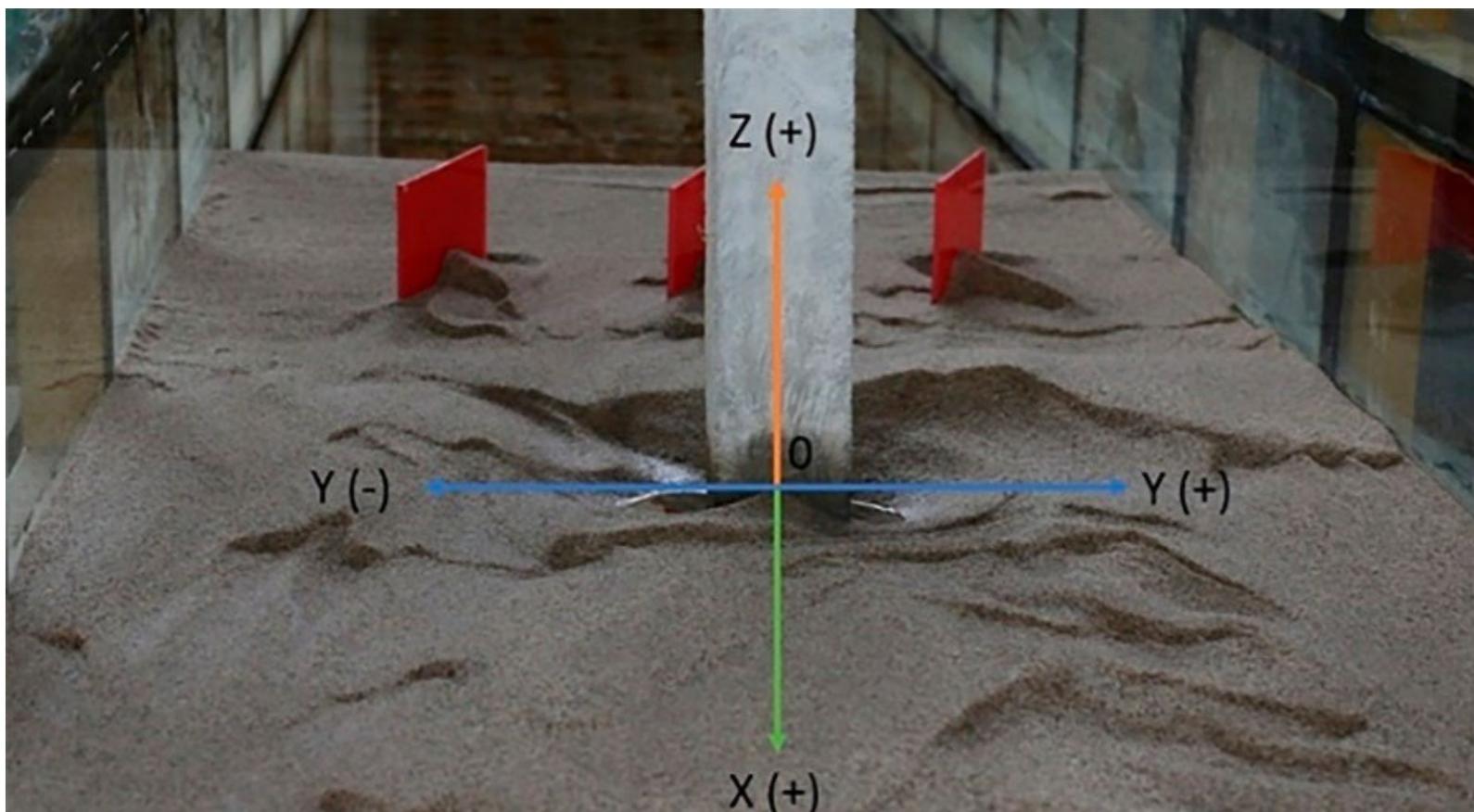


Figura 4. Ejes de medición.

Tabla 1. Plan de pruebas para el registro de velocidades con el ADV.

Pila	Eje	Inicio (cm)	Fin (cm)	Intervalo (cm)	Número de mediciones	Puntos totales	Tiempo (días)
Cuadrada	X	35	125	10	10	390	15
	Y	-30	30	5	13		
	Z	3	7	2	3		

Con ayuda de un limnómetro se realizó un levantamiento topográfico del lecho de sedimentos en el canal con el objetivo de constituir la batimetría correspondiente usando el *software* Autodesk Civil 3D, con lo que se obtuvieron resultados gráficos a detalle en torno al uso de paneles sumergidos. Finalmente, se hizo un registro de la velocidad instantánea del flujo aguas abajo de la pila usando el ADV, minimizando las interferencias que el pilar puede causar al equipo ADV (Trowbridge & Elgar, 2001). Las mediciones aguas arriba, donde el flujo puede estar más perturbado y menos desarrollado, introducen más ruido y errores en los datos debido a la interferencia y las características de la turbulencia en esa región (García *et al.*, 2005).

La Figura 5 resume el proceso de la experimentación realizada: primero se colocaron los paneles en el lecho (Figura 5A); luego de 16 horas de flujo de agua se midió la socavación localizada en los elementos (Figura 5B); se realizó la batimetría del lecho usando el limnómetro (Figura 5C), y por último se tomaron las velocidades instantáneas con el ADV (Figura 5D).



Figura 5. Procedimientos en la investigación: A) colocación de los paneles en el lecho; B) medición de la socavación localizada; C) batimetría del lecho; D) medición de las velocidades instantáneas.

Resultados y discusión

Análisis y comparación de la socavación con y sin paneles sumergidos

Finalizado el ensayo de inicio de movimiento en presencia de los paneles y alcanzada la condición de equilibrio, se realizó un levantamiento topográfico del lecho con el fin de determinar experimentalmente las variaciones ocurridas en las zonas de sedimentación y socavación. En la Figura 6 se observa que tanto la pila como los paneles sumergidos presentan un foso de socavación aguas arriba y el sedimento se depositó del mismo lado en los tres paneles.

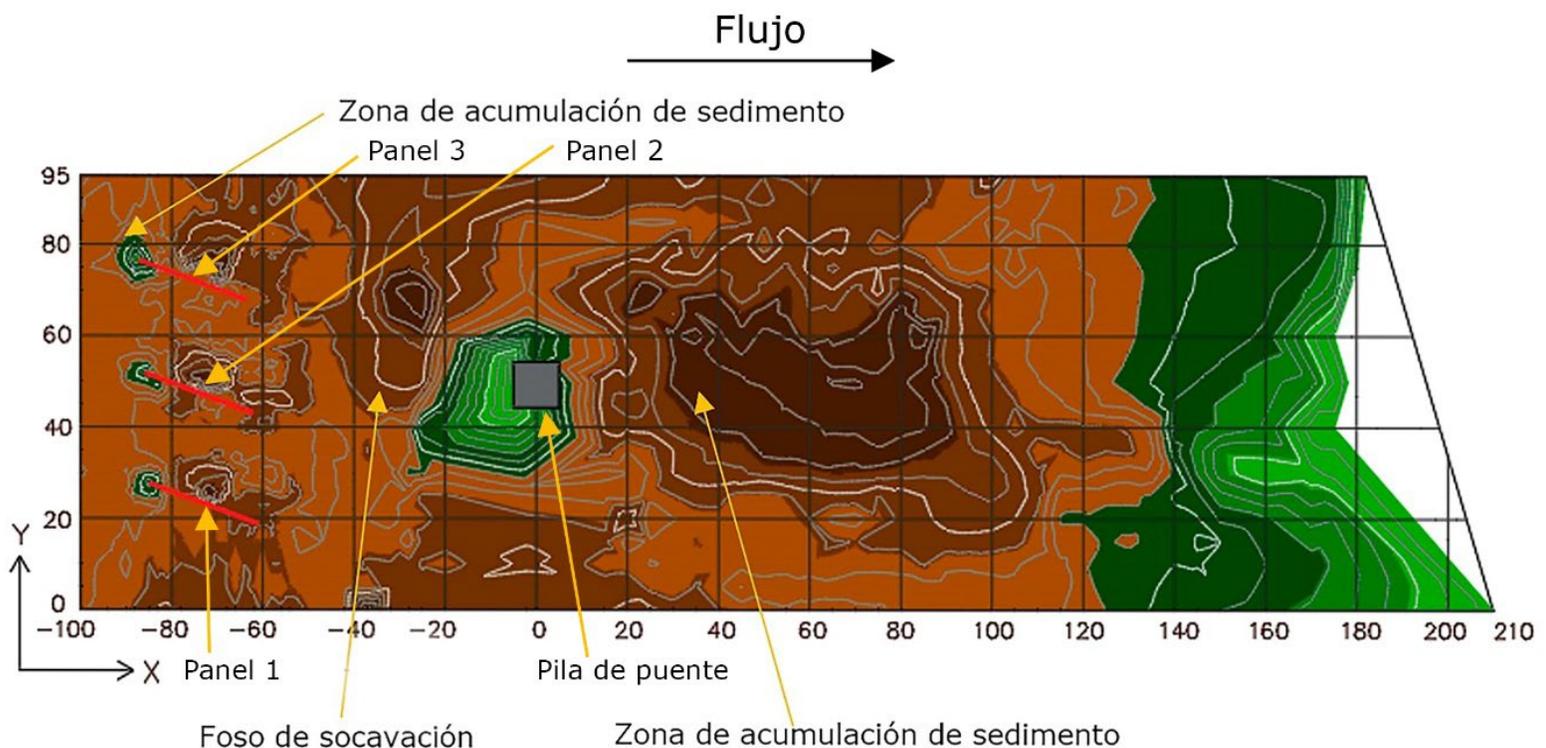


Figura 6. Batimetría del fondo con pila cuadrada y paneles sumergidos.

En el caso de la pila, el depósito ocurrió en la parte posterior, aguas abajo, formando un área de mayor altura (color marrón oscuro) de 0.4 m² y una longitud aproximada de 1.0 m. Es notable la gran influencia que una pila de dimensiones relativamente pequeñas (0.01 m²) ejerce sobre la dinámica del arrastre de sedimentos, al modificar la topografía del lecho, y crear zonas bien definidas de socavación y depósito.

La Tabla 2 muestra un resumen de las características de los intervalos observados en la Figura 5. Considerando que el origen del eje z es medido desde el nivel inicial de la cama de arena antes del ensayo de inicio de movimiento, el foso frente a la pila tiene una profundidad de 2.5 cm y el sedimento acumulado en la parte posterior llega a los 8.7 cm de altura.

Tabla 2. Leyenda de la batimetría en pila cuadrada.

Leyenda de elevaciones				
Intervalo	Elevación mínima (cm)	Elevación máxima (cm)	Área (cm ²)	Color
1	15.70	17.70	2.69	
2	17.70	19.70	417.04	
3	19.70	21.70	1 495.42	
4	21.70	23.70	6 821.85	
5	23.70	25.70	11 687.43	
6	25.70	27.70	2 485.58	

Análisis y comparación de parámetros de turbulencia

Con los datos de velocidad instantánea obtenidos con el ADV se determinaron las velocidades turbulentas, las tensiones de Reynolds, la energía cinética, la disipación y la intensidad turbulentas. Estos parámetros se utilizaron para evaluar la evolución de la turbulencia inducida por los paneles y compararlos con los obtenidos por Chiliboga-Chiriboga y Pinto-Franco (2019). Los resultados comparados corresponden al plano $Z = 7$ cm.

La Figura 7 (A, C, E) muestra la evolución de la velocidad instantánea en el eje X en presencia de paneles, mientras que las secciones B, D, F muestran esta evolución para el caso sin paneles sumergidos. La diferencia principal entre los dos casos es que la velocidad en dirección X en presencia de paneles sumergidos se ve más afectada por la generación de vórtices tipo estela, lo que induce una variación en la velocidad. Sin embargo, sin paneles, las líneas de velocidad son casi paralelas.

I: Velocidades instantáneas

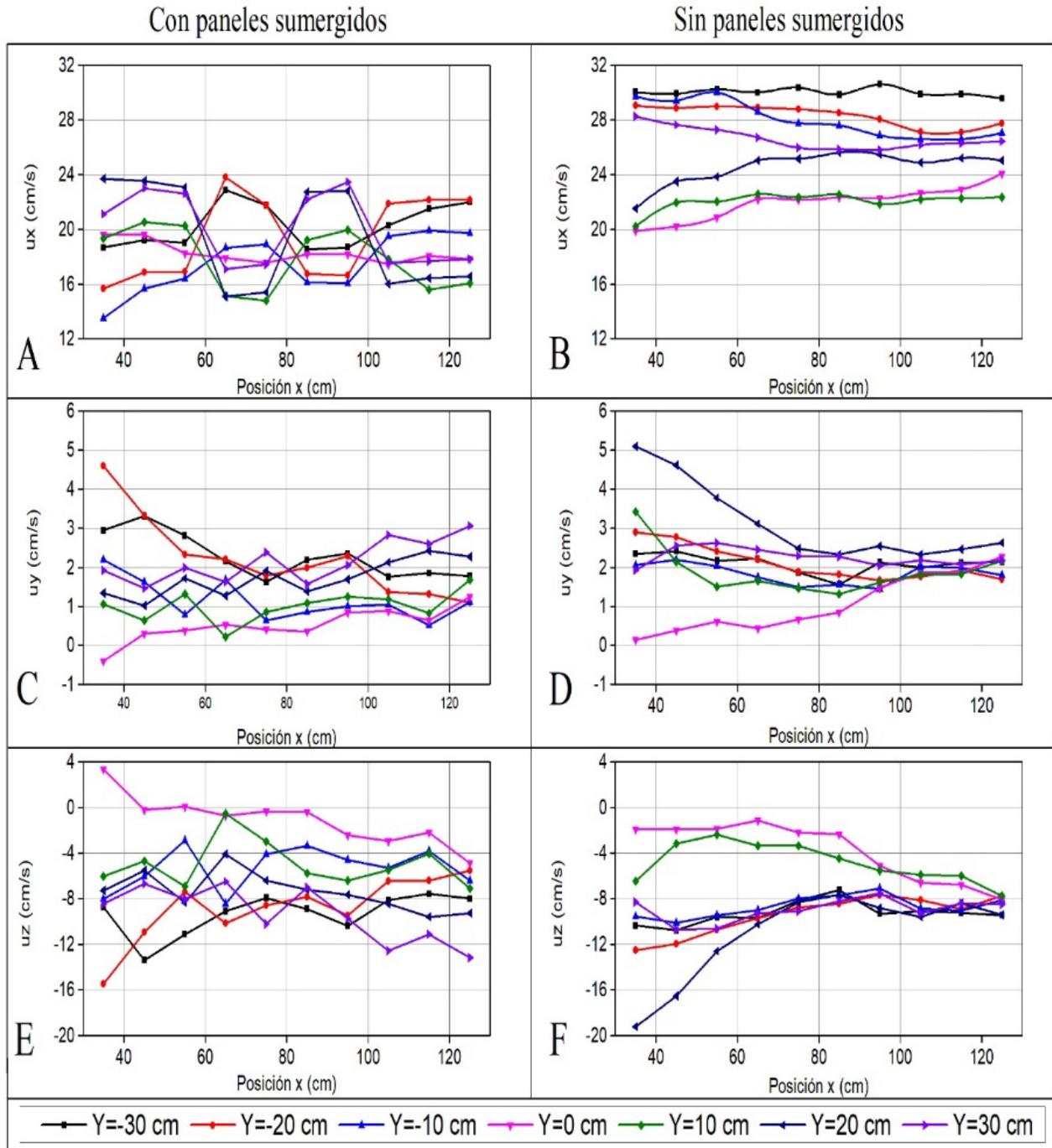


Figura 7. Características del flujo ($Z = 7$ cm). I Velocidades instantáneas.

Una de las características principales de las curvas en la Figura 7 (A) es que al comparar cada par de curvas con un mismo valor de Y en el plano $Z = 7$ cm, pero de signos contrarios, los picos de una de las curvas coinciden con el valle de su opuesto. A medida que los ejes se acercan al centro del canal, las curvas tienden a tomar un valor constante. Para la curva $Y = 0$, la velocidad es casi constante y no posee picos o valles.

Otra consecuencia del uso de paneles es la disminución de la velocidad media, aproximadamente en 5 cm/s. La velocidad se mantiene entre 13 y 24 cm/s en presencia de los paneles, y entre 20 y 30 cm/s en ausencia de estos. Una característica adicional observable en la velocidad del flujo en presencia de los paneles es que los puntos de cruce de estas curvas son aproximadamente periódicos, cada 20 cm, empezando en $x = 65$ cm hasta $x = 105$ cm.

Para la comparación de los parámetros de turbulencia se usaron las ecuaciones empleadas por Hamad-Mohamed (2015), que se muestran a continuación. La fluctuación de velocidad es el parámetro más utilizado en el análisis de la turbulencia, teniendo en cuenta que existen tres componentes y que está en función tanto de la velocidad instantánea (medida con el ADV) como de la velocidad media (Davidson, 2015):

$$u' = U - u \quad (7)$$

Donde:

u' = velocidad fluctuante (cm/s)

U = velocidad media (cm/s)

u = velocidad instantánea (cm/s)

La Figura 8 (A, C, E) muestra la evolución de las tensiones normales de Reynolds a lo largo del lecho en presencia de paneles, mientras que los apartados B, D, F de esta figura indican esta evolución para el caso sin paneles sumergidos.

II: Tensiones normales de Reynolds

Con paneles sumergidos

Sin paneles sumergidos

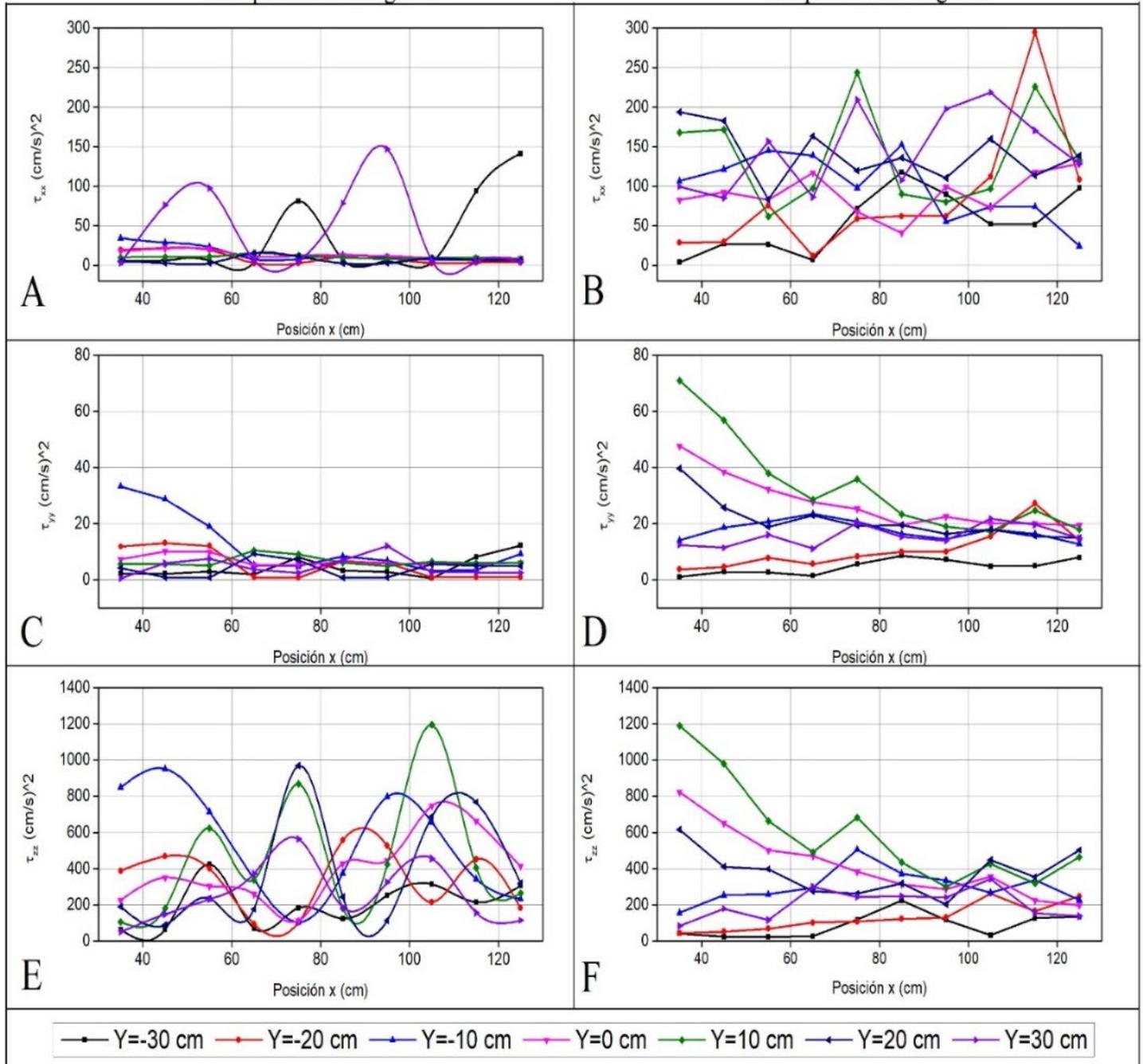


Figura 8. Características del flujo ($Z = 7$ cm). II. Tensiones normales instantáneas.

Las tensiones normales de Reynolds son un parámetro crítico para entender la dinámica de los flujos turbulentos, ya que reflejan la variabilidad de las velocidades en las diferentes direcciones. Estas tensiones son influenciadas significativamente por la presencia de estructuras sumergidas, como los paneles, que alteran el patrón de flujo y la distribución de las fuerzas dentro del fluido.

La Figura 9 (A, C, E) muestra la evolución de las tensiones tangenciales de Reynolds a lo largo de la sección de control en presencia de paneles, mientras que los apartados B, D, F de esta figura muestran esta tendencia para el caso sin paneles sumergidos.

III: Tensiones tangenciales de Reynolds

Con paneles sumergidos

Sin paneles sumergidos

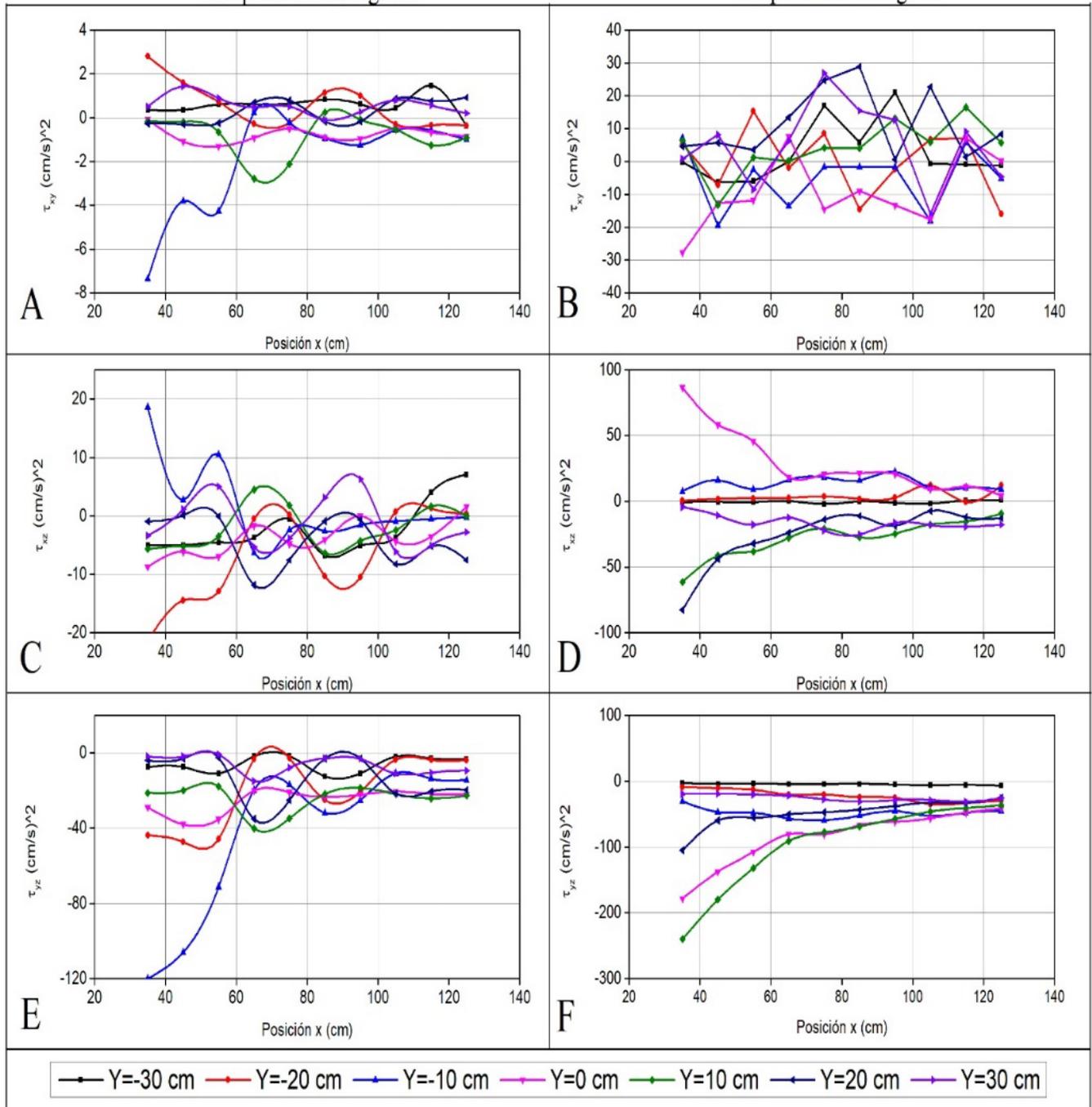


Figura 9. Características del flujo ($Z = 7$ cm). III. Tensiones tangenciales.

Las tensiones tangenciales de Reynolds dependen de las velocidades fluctuantes, en específico del cuadrado de una de las componentes de la velocidad fluctuante, como se evidencia en las ecuaciones (8), (9) y (10). Estas tensiones son fundamentales para el análisis de la transferencia de momentum dentro del fluido, que proporciona información sobre la mezcla y la difusión de las propiedades del flujo:

$$\tau_{xx} = -\rho \cdot u_x'^2 \quad (8)$$

$$\tau_{yy} = -\rho \cdot u_y'^2 \quad (9)$$

$$\tau_{zz} = -\rho \cdot u_z'^2 \quad (10)$$

$$\tau_{xy} = -\rho \cdot u_x' \cdot u_y' \quad (11)$$

$$\tau_{xz} = -\rho \cdot u_x' \cdot u_z' \quad (12)$$

$$\tau_{yz} = -\rho \cdot u_y' \cdot u_z' \quad (13)$$

Donde:

τ_{xx} = tensión normal en dirección X (cm/s)²

τ_{yy} = tensión normal en dirección Y (cm/s)²

τ_{zz} = tensión normal en dirección Z (cm/s)²

τ_{xy} = tensión tangencial al plano XY en dirección Y (cm/s)²

τ_{xz} = tensión tangencial al plano XZ en dirección Z (cm/s)²

τ_{yz} = tensión tangencial al plano YZ en dirección Z (cm/s)²

ρ = densidad del agua (g/cm³)

El uso de paneles sumergidos genera una uniformización en los valores de las curvas de las tensiones normales de Reynolds, lo que provoca que se agrupen alrededor del 0 (cm/s)², excepto en los extremos, donde se mantienen variables con valores mayores a 70 (cm/s)². Este comportamiento se debe al cambio de dirección en el flujo provocado por los paneles, pues al cambiar la dirección del flujo también cambia la dirección en la que la fuerza es aplicada sobre el fondo, lo que modifica la dirección en la que las partículas del fondo se mueven y generan el relleno deseado en el foso. El agrupamiento alrededor de 0 significa que los valores de la velocidad instantánea son cercanos al de la velocidad media; esto también se aplica para la tensión normal en dirección Y.

La tensión normal en dirección Z con y sin paneles presenta rangos de variación amplios; esto indica que las velocidades instantáneas están alejadas de la velocidad media en dirección Z, lo cual se explica porque es la dirección en la que está girando el vórtice. Los paneles provocan que la tensión en dirección Z sea más errática. Al igual que ocurre con las tensiones normales, las curvas de las tensiones tangenciales en presencia de los paneles tienden a agruparse alrededor de 0 y tienen rangos de variación mucho menores que en ausencia de los paneles.

La Figura 10 (A, C) muestra la evolución de la energía cinética turbulenta y de la disipación turbulenta en presencia de paneles sumergidos; mientras que los apartados B, D de esta figura muestran el caso sin presencia de paneles. La energía cinética turbulenta se calcula mediante la Ecuación (14):

$$k = \frac{1}{2}(\tau_{xx} + \tau_{yy} + \tau_{zz}) \quad (14)$$

Donde:

k = energía cinética turbulenta (cm/s)²

IV: Energía cinética y disipación turbulenta

Con paneles sumergidos

Sin paneles sumergidos

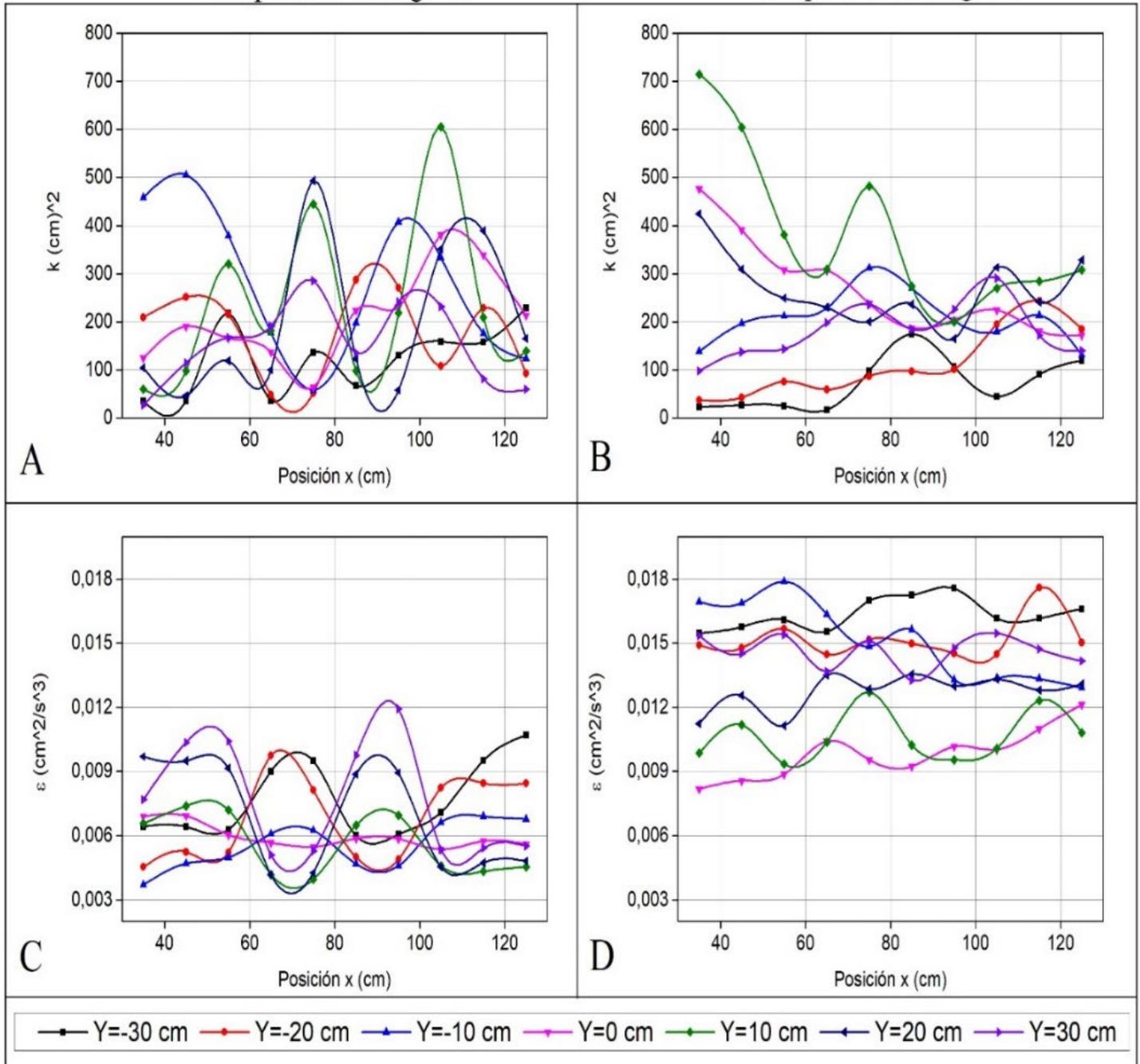


Figura 10. Características del flujo ($Z = 7 \text{ cm}$). IV. Energía cinética y disipación turbulenta.

En el caso sin paneles, la energía cinética turbulenta tiende a disminuir hacia el final de la sección de control, mientras que en presencia de los paneles, la variación es más errática y no hay una tendencia marcada; ello indica que se necesita una mayor longitud de desarrollo para que la energía del vórtice sea disipada. La energía cinética está relacionada con la velocidad instantánea, por lo que los picos más altos de la Figura 10 (A) están en la misma posición que los picos más altos de la Figura 7 (A).

La disipación turbulenta depende de la viscosidad cinemática del agua y es calculada por la Ecuación (15) (Taylor, 1935):

$$\varepsilon = 15\nu u_x^2 \quad (15)$$

Donde:

ε = disipación turbulenta (cm^2/s^3).

ν = viscosidad cinemática del agua (cm^2/s).

u_x = velocidad instantánea en la dirección X (cm/s).

En ambos casos, la disipación tiene valores bajos en comparación con la energía cinética; pero es notorio que sin el uso de paneles el rango de disipación energética es superior que en el caso del uso de paneles debido a que la disipación turbulenta depende de la velocidad instantánea; en la Figura 7 (A y C) se observa que la velocidad en dirección X es más alta sin uso de paneles sumergidos, lo cual genera una mayor acumulación de sedimento.

La disipación energética es muy baja, por lo que la energía cinética no se ve afectada consistentemente a lo largo de la sección de control; además, depende de la velocidad instantánea en dirección X ; por tanto, la forma de las curvas es similar a la forma de las curvas de la velocidad instantánea.

La intensidad turbulenta se muestra en la Figura 11: los casos A, C, E en presencia paneles y los casos B, D, F sin paneles. Este parámetro es la relación entre la velocidad fluctuante (u') y la velocidad media (U), como se indica en las ecuaciones (16) a (18):

$$TI_x = \frac{|u'_x|}{\sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2}} * 100 \quad (16)$$

$$TI_y = \frac{|u'_y|}{\sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2}} * 100 \quad (17)$$

$$TI_z = \frac{|u'_z|}{\sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2}} * 100 \quad (18)$$

Donde:

TI_x = intensidad turbulenta en dirección X (%)

TI_y = intensidad turbulenta en dirección Y (%)

TI_z = intensidad turbulenta en dirección Z (%)

V: Intensidades turbulentas

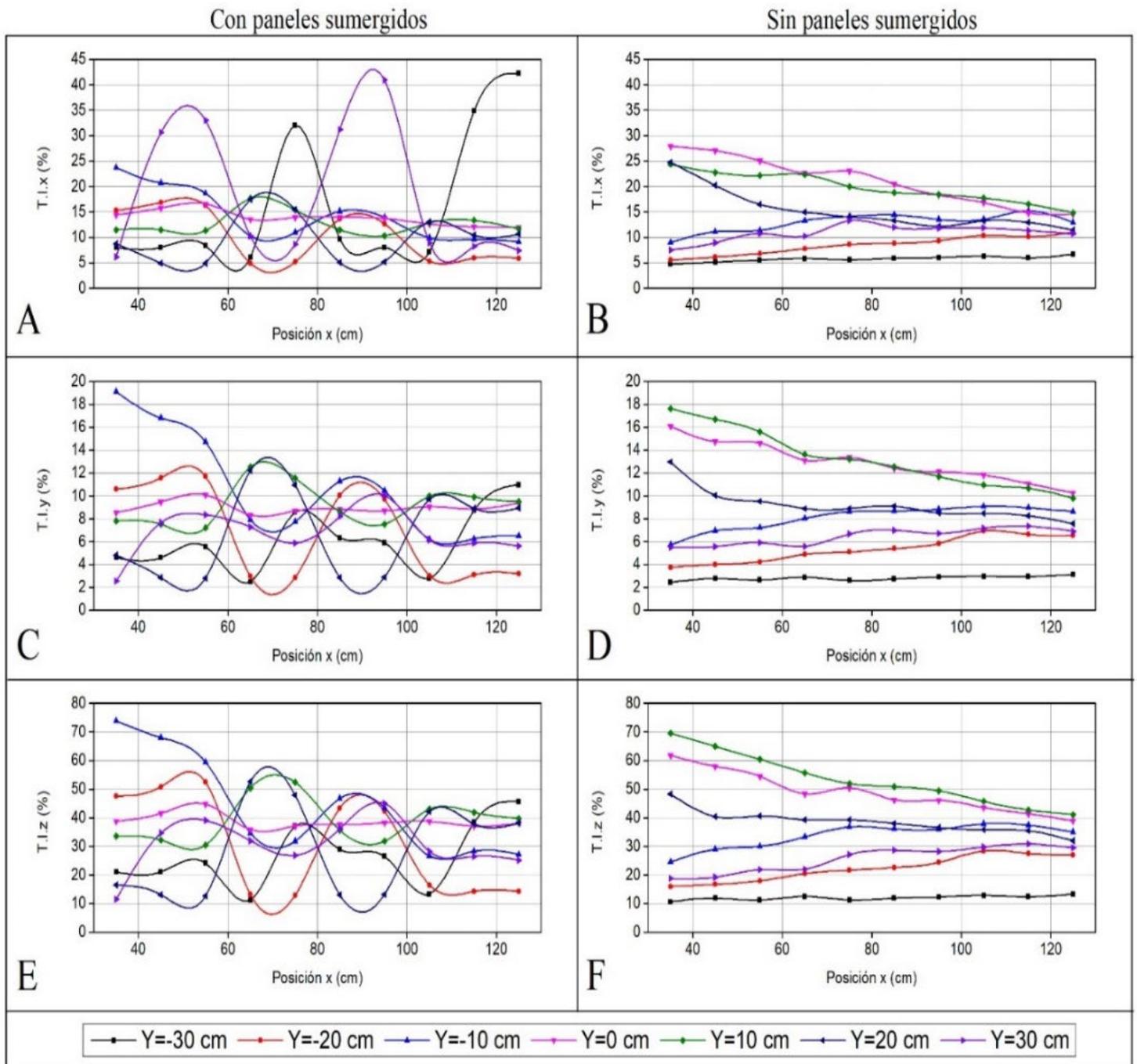


Figura 11. Características del flujo ($Z = 7$ cm). V. Intensidades turbulentas.

La gráfica de la intensidad turbulenta tiende a tener una forma similar que la gráfica de las velocidades instantáneas debido a la dependencia existente entre estos parámetros. En la Figura 11(A) se evidencia que el rango de intensidad fluctúa entre 5 y 40 %, mientras que en la Figura 11(B) lo hace entre 5 y 30 %; en ambos casos, las intensidades turbulentas sobre el eje Y tienen un rango de variación similar entre el 2 y 20 %; sobre el eje Z, como se observa en la Figura 11 (E y F), el rango es mucho más amplio entre el 10 y 80 %, lo que indica que los efectos de turbulencia afectan más al eje sobre el cual está girando el vórtice. Además, se pueden destacar en la Figura 11 (A) dos curvas que sobresalen del resto ($Y = -30$ cm, $Y = 30$ cm), lo cual se explica por la cercanía de esos puntos con las paredes del canal, lo que influye en el desarrollo de las líneas de corriente del flujo.

Los resultados obtenidos muestran que la presencia de paneles sumergidos reduce de manera significativa la socavación alrededor de las pilas, lo cual coincide con los hallazgos de Ghorbani y Kells (2008). Además, las mediciones de turbulencia realizadas con el ADV revelan patrones similares a los descritos por Lee y Hong (2019), e indican que los paneles afectan la distribución de las intensidades turbulentas y las tensiones de Reynolds. Se observó que el uso de paneles sumergidos reduce de forma significativa la socavación alrededor de pilas cuadradas de puente. Los datos mostraron una disminución notable en la profundidad del foso de socavación, y cambios en los patrones de velocidad y turbulencia del flujo. Estos resultados sugieren que los paneles sumergidos son efectivos para mitigar la erosión en la base de las pilas, tal como se investigó en Moghanloo *et al.* (2022) respecto al

impacto de aumentar el grosor de los collares alrededor de pilas en una curva de 180° ; se encontró que esto puede reducir la socavación al modificar el flujo de manera similar a los paneles sumergidos. Este estudio respalda los resultados obtenidos en la presente investigación y demuestra que las modificaciones estructurales pueden ser una solución efectiva para mitigar la socavación.

Respecto a los resultados obtenidos en las mediciones para $Z = 3$, se obtuvieron tendencias similares a las que se tienen en $Z = 7$, esto puede ser ratificado en la Figura 12, Figura 13, Figura 14, Figura 15 y Figura 16.

I: Velocidades instantáneas

Con paneles sumergidos

Sin paneles sumergidos

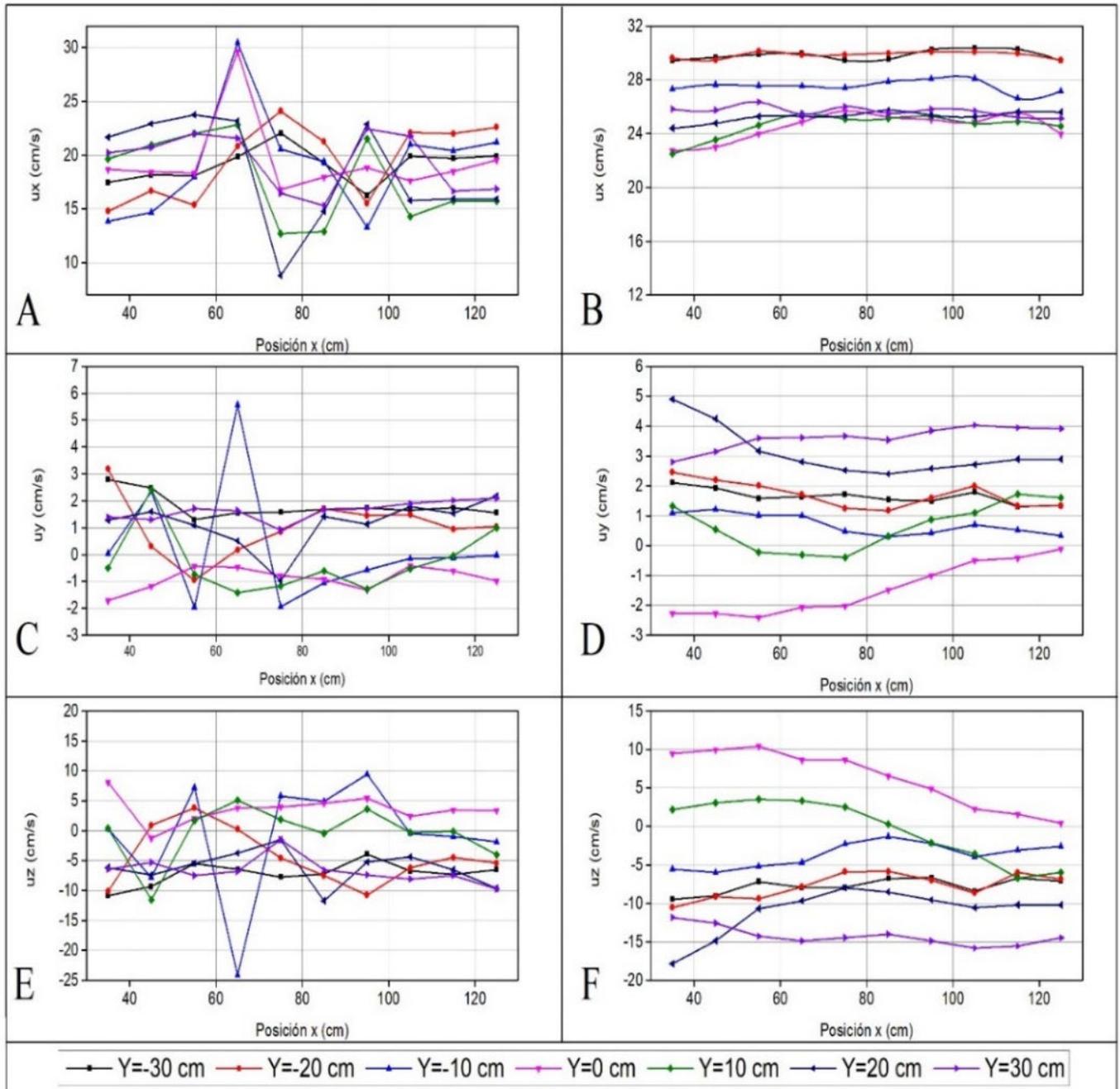


Figura 12. Características del flujo ($Z = 3$ cm). I Velocidades instantáneas.

II: Tensiones normales de Reynolds

Con paneles sumergidos

Sin paneles sumergidos

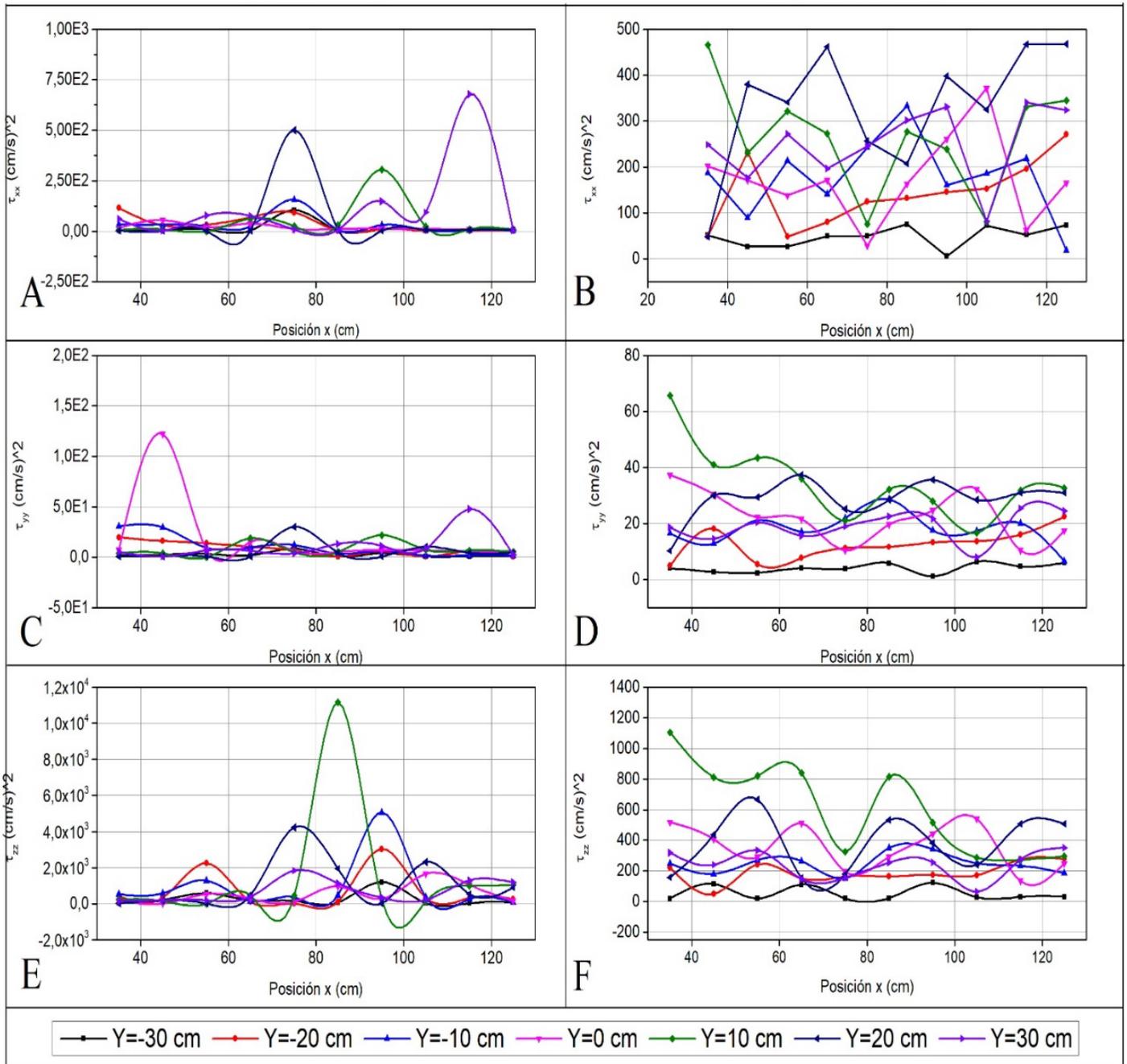


Figura 13. Características del flujo ($Z = 3 \text{ cm}$). II. Tensiones normales instantáneas.

III: Tensiones tangenciales de Reynolds

Con paneles sumergidos

Sin paneles sumergidos

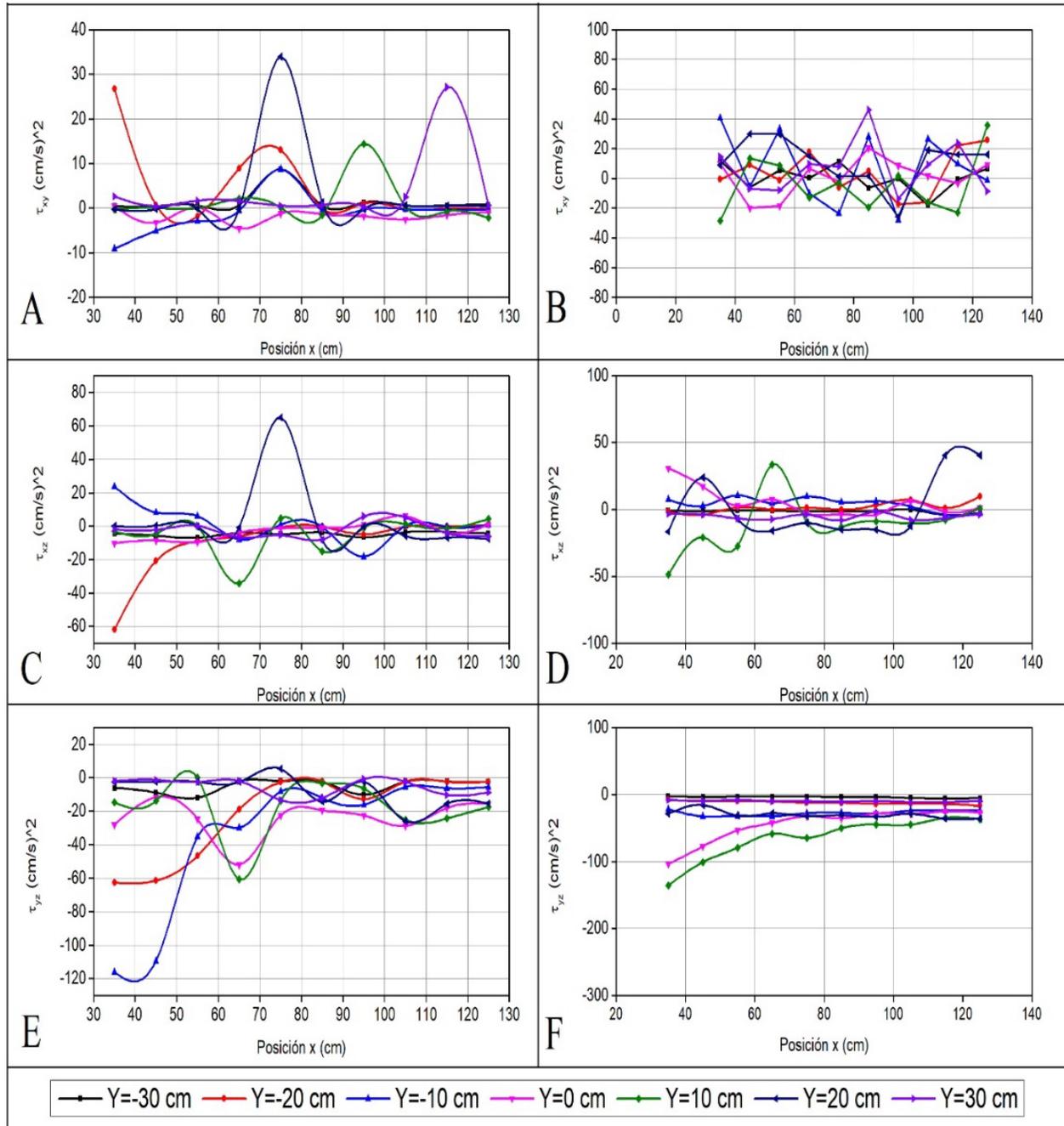


Figura 14. Características del flujo ($Z = 3$ cm). III. Tensiones tangenciales.

IV: Energía cinética y disipación turbulenta
Con paneles sumergidos Sin paneles sumergidos

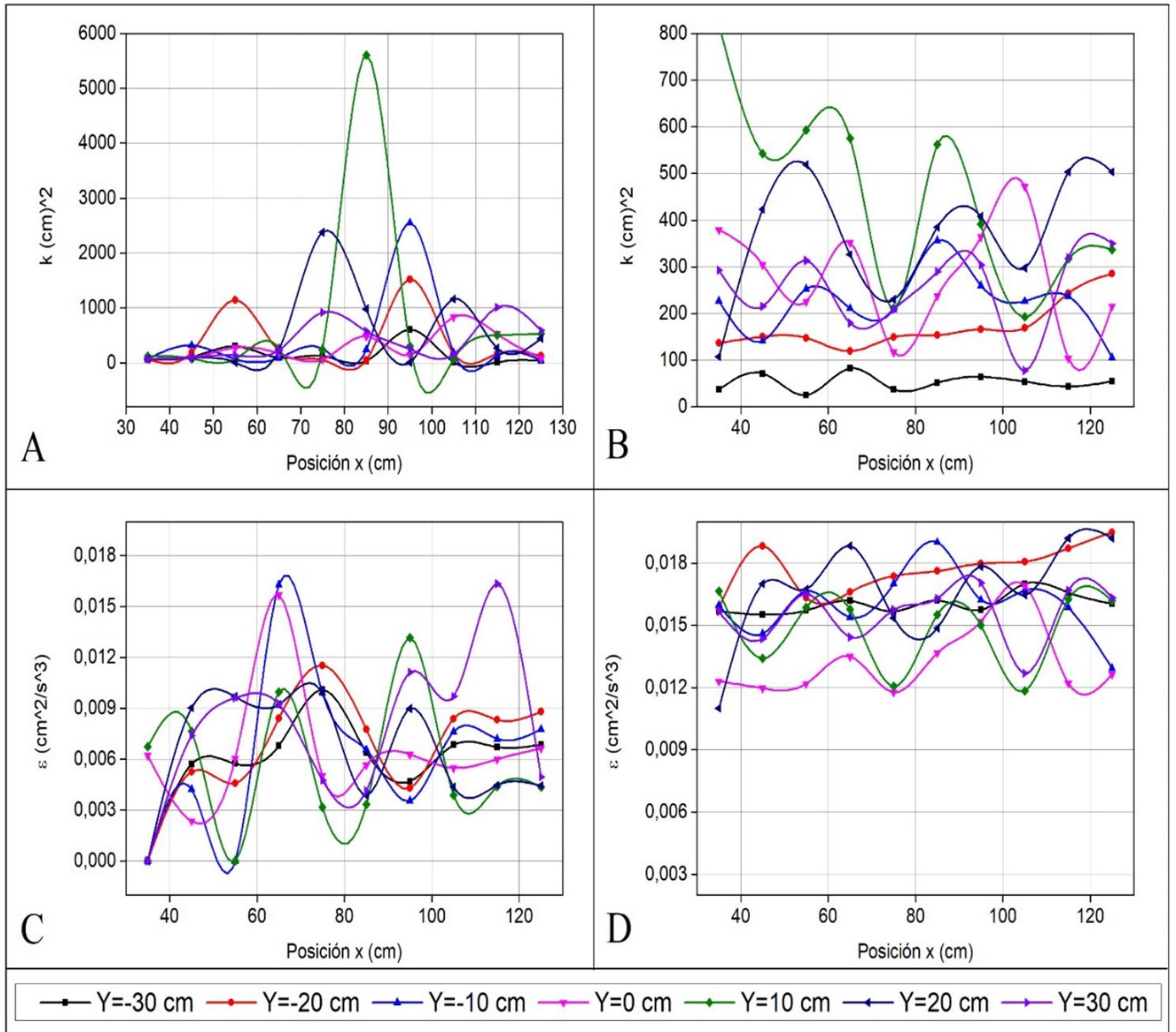


Figura 15. Características del flujo ($Z = 3$ cm). IV. Energía cinética y disipación turbulenta.

V: Intensidades turbulentas

Con paneles sumergidos

Sin paneles sumergidos

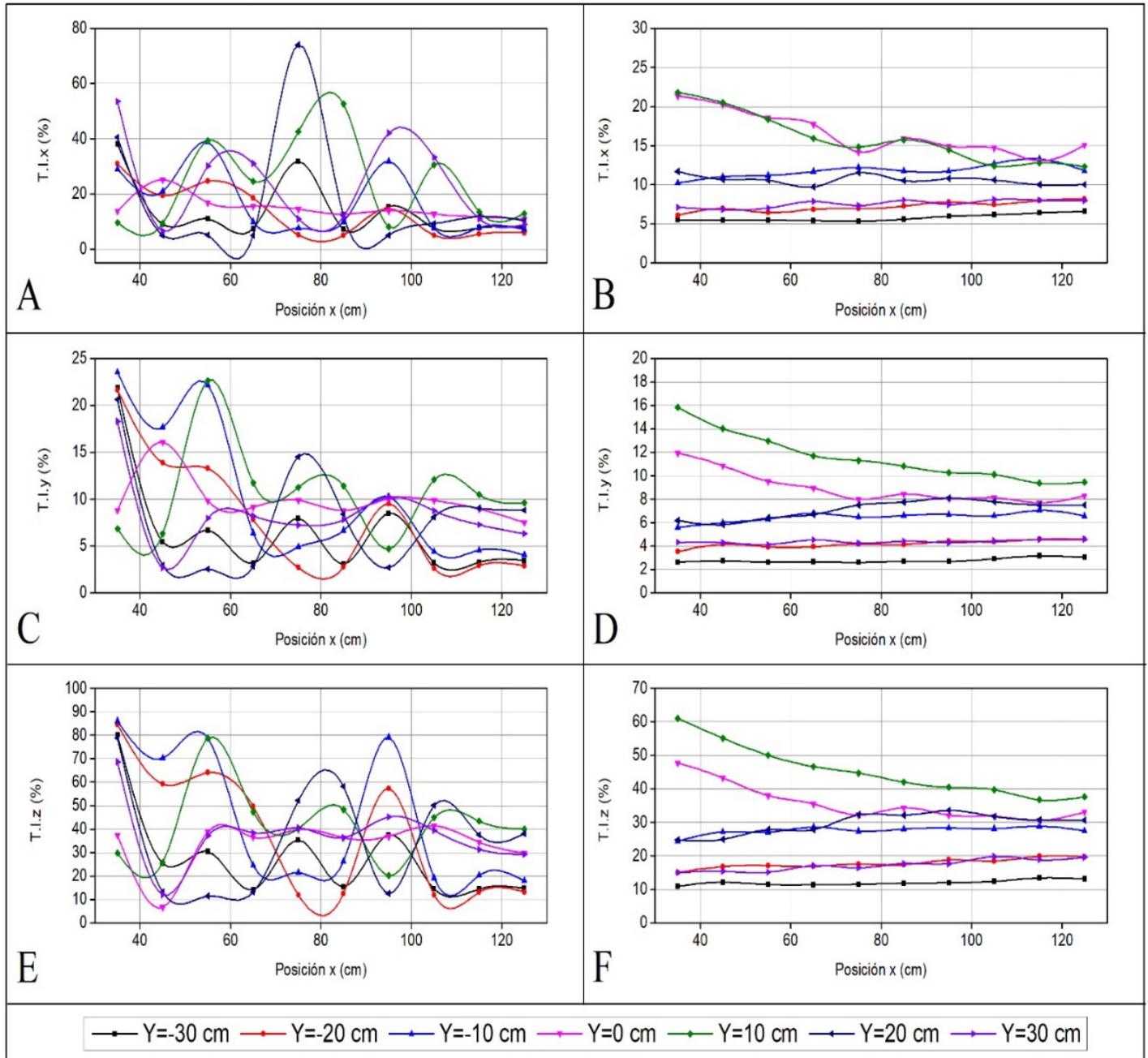


Figura 16. Características del flujo ($Z = 3 \text{ cm}$). V. Intensidades turbulentas.

Como se observan en la Figura 7 ($Z = 7$ cm) y Figura 12 ($Z = 3$ cm), las velocidades son generalmente mayores en $Z = 7$ cm en ambos casos (con y sin presencia de paneles), lo que sugiere un flujo más agresivo a mayor altura. Respecto a las tensiones normales y tangenciales de Reynolds, son más altas que $Z = 7$ cm, lo cual indica que la influencia de los paneles en reducir las tensiones es más efectiva a $Z = 3$ cm. La energía cinética es mayor que $Z = 7$ cm, mientras que la disipación turbulenta es más efectiva a $Z = 3$ cm con paneles.

Las intensidades turbulentas son mayores que $Z = 7$ cm, lo cual sugiere que la reducción de la turbulencia es más notable a menor altura. Estos cambios indican que la presencia de paneles sumergidos tiene un impacto más pronunciado en la reducción de la socavación y la estabilización del flujo cerca de la base de la pila ($Z = 3$ cm); mientras que a mayor altura ($Z = 7$ cm), el flujo retiene más energía, y muestra mayores intensidades turbulentas y tensiones.

Conclusiones

- El uso de paneles sumergidos genera vórtices que se evidencian en el comportamiento del flujo, reflejado en los cambios en la velocidad a lo largo de la sección de control, lo cual demuestra ser una solución efectiva para mitigar la socavación alrededor de las pilas de puentes; ello se alinea con estudios recientes que han explorado métodos similares (Harasti *et al.*, 2021; Ghorbani & Kells, 2008). La incorporación de tecnologías avanzadas para la medición de

turbulencia, como el ADV, ha permitido obtener datos precisos y comparables con investigaciones previas (Lee & Hong, 2019).

- Dos pares de curvas en dirección del flujo (u_x) con una misma numeración de “Y” y signos contrarios describen una hélice cuyos picos coinciden con el valle de su curva opuesta; a medida que el punto de medición se acerca al centro del canal, las curvas tienden a tomar los mismos valores.
- Los paneles sumergidos inducen vórtices que alteran la magnitud y dirección de las tensiones iniciales del fondo y las velocidades, lo que provoca que la velocidad media se vea disminuida; esto influye en los rangos de variación de las tensiones de Reynolds que, al depender de la velocidad media y la velocidad instantánea, son más pequeños en comparación con el caso sin paneles sumergidos.
- La dirección en la que se colocan los paneles influye en el desplazamiento y la dirección en que se mueve el sedimento, y depende, asimismo, del ángulo de ataque del panel.
- Los paneles pueden ser considerados como estructuras de protección fáciles de diseñar y con un gran desempeño, lo cual permite un relleno del foso de socavación en aproximadamente el 40 % de su tamaño.
- Los beneficios que tiene la aplicación de estos elementos son los siguientes: la reducida cantidad de materiales, sus bajos costos de aplicación y construcción, su diseño simple, y su mínimo o nulo mantenimiento.

Referencias

- Baranwal, A., & Das, B. S. (2024). Scouring around bridge pier: A comprehensive analysis of scour depth predictive equations for clear-water and live-bed scouring conditions. *Aqua Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 73(3), 424-452. DOI: 10.2166/aqua.2024.235
- Bateman, A., Fernández, M., & Parker, G. (2006). Temporal evolution of local scour in bridge piers: A morphodynamic approach. In: *Proceedings 3rd International Conference on Scour and Erosion (ICSE-3)* (pp. 53-61). Amsterdam, The Netherlands, November 1-3.
- De-León-Barrios, M. C., Leiva-Jimenez, C., Rincon-Canabal, K. P., Chamorro, S. C., Malaver-Florian, J. J., & Grau, V. (2018). *Análisis de las causas estructurales del colapso de puentes en Colombia*. DOI: 10.13140/RG.2.2.16102.11842
- Chiliquinga-Chiriboga, J. E., & Pinto-Franco, C. A. (2019). Análisis experimental en modelo físico de fenómenos de turbulencia causantes de erosión alrededor de pilas de puentes utilizando Acoustic Doppler Velocimeter ADV. Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional. Recuperado de <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20363>
- Davidson, P. A. (2015). *Turbulence: An introduction for scientists and engineers*. Oxford, UK: Oxford University Press. DOI: 10.1093/acprof:oso/9780198722588.001.0001

Du, S., & Liang, B. (2019). Comparisons of local scouring for submerged square and circular cross-section piles in steady currents. *Water*, 11(9). DOI: 10.3390/w11091820

Du, S., Wang, Z., Wang, R., Liang, B., & Pan, X. (2022). Effects of flow intensity on local scour around a submerged square pile in a steady current. *Physics of Fluids*, 34(8). DOI: 10.1063/5.0103556

Galiano-Ayala, L. M., & Toapaxi-Alvarez, J. A. (2010). *Análisis de la socavación en cauces naturales*. Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional. Recuperado de <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/1647>

Gallardo-Guamán, K. G. (2019). *Demostración experimental del efecto de los paneles sumergidos en la erosión local de pilas de puentes cuadradas*. Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional. Recuperado de <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20172>

García, C. M., Cantero, M., Niño, Y., & García, M. H. (2005). *Turbulence measurements with acoustic Doppler velocimeters*. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(12). DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2005)131:12(1062)

Ghorbani, B., & Kells, J. A. (2008). Effect of submerged vanes on the scour occurring at a cylindrical pier. *Journal of Hydraulic Research*, 46(5), 610-619. DOI: 10.3826/jhr.2008.3003

Hamad-Mohamed, K. (2015). *Submerged vanes turbulence: Experimental analysis* (tesis de doctorado). Universitat Politècnica de Catalunya, Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona, España. Recuperado de <http://hdl.handle.net/10803/377436>

- Harasti, A., Gilja, G., Potočki, K., & Lacko, M. (2021). Scour at bridge piers protected by the riprap sloping structure: A review. *Water*, 13(24). DOI: 10.3390/w13243606
- Lee, S. O., & Hong, S. H. (2019). Turbulence characteristics before and after scour upstream of a scaled-down bridge pier model. *Water*, 11(9). DOI: 10.3390/w11091900
- Martín, J. (2003). *Ingeniería de ríos*. Barcelona, España: Ediciones UPC, Editorial Alfaomega.
- Moghanloo, M., Vaghefi, M., & Ghodsian, M. (2022). Experimental study on the effect of thickness and level of the collar on the scour pattern in 180° sharp bend with bridge pier. *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering*, 46(1), 535-553. DOI: 10.1007/s40996-020-00511-9
- Odgaard, A. J. (2009). *River training and sediment management with submerged vanes*. Reston, USA: American Society of Civil Engineers. DOI: 10.1061/9780784409817
- Odgaard, A. J., & Spoljaric, A. (1986). Sediment control by submerged vanes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 112(12), 1164-1180. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1986)112:12(1164)
- Odgaard, A. J., & Wang, Y. (1990). *Sediment control in bridge waterways*. Iowa, USA: Iowa Institute of Hydraulic Research.
- Ouyang, H.-T., & Lai, J.-S. (2013). Design optimization of a submerged vane with streamlined profile for sediment management in rivers. *Journal of Marine Science and Technology*, 21(3), 11.

- Reza-Namaee, M., Sui, J., & Wu, P. (2020). Experimental study of local scour around side-by-side bridge piers under ice-covered flow conditions. In: *Current practice in fluvial geomorphology - dynamics and diversity*. DOI: 10.5772/intechopen.86369
- Richardson, E. V., & Davis, S. R. (2001). *Evaluating scour at bridges*. Washington, DC, USA: United States Federal Highway Administration, Office of Bridge Technology.
- Tajari, M., Dehghani, A. A., Halaghi, M. M., & Azamathulla, H. (2020). Use of bottom slots and submerged vanes for controlling sediment upstream of duckbill weirs. *Water Science and Technology: Water Supply*, 20(8), 3393-3403. DOI: 10.2166/ws.2020.238
- Taylor, G. I. (1935). Statistical theory of turbulence-II. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A-Mathematical and Physical Sciences*, 151(873), 444-454. DOI: 10.1098/rspa.1935.0159
- Trowbridge, J., & Elgar, S. (2001). Turbulence measurements in the surf zone. *Journal of Physical Oceanography*, 31(8), 2403-2417. DOI: 10.1175/1520-0485(2001)031<2403:TMITSZ>2.0.CO;2
- Voulgaris, G., & Trowbridge, J. H. (1998). Evaluation of the Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) for turbulence measurements. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 15(1), 272-289. DOI: 10.1175/1520-0426(1998)015<0272:EOTADV>2.0.CO;2
- Yang, Y., Li, J., Zou, W., & Chen, B. (2024). Numerical investigation of flow and scour around complex bridge piers in wind-wave-current conditions. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(1). DOI: 10.3390/jmse12010023