

Influence of Bed Roughness on Turbulence Characteristics in a Gravel-Bed Reach of the Mapocho River

Nicolás Salinas Ibáñez ¹ , Juan Pablo Toro Labbé ² 

Faculty Mentor: Juan Pablo Toro Labbé, PhD²

¹ Universidad Andres Bello, Chile, n.salinasibez@uandresbello.edu

² Universidad Andres Bello, Chile, juan.toro.l@unab.cl

Abstract—*This study investigates turbulence intensity (TI) in the longitudinal direction and its relationship with bed roughness in a reach of the Mapocho River, characterized by a straight morphology, a fine gravel bed, and subcritical flow. Two field campaigns were conducted in September 2025, measuring instantaneous velocities at three cross-sections using the SEBA FlowSens electromagnetic sensor in accordance with ISO 748:2007, complemented by a granulometric characterization using the Wolman method. The bed was dominated by moderately sorted fine gravels ($D_{50} \approx 4.8$ mm, $\sigma_g = 1.40$). Results show that TI decreases markedly from the bed toward the free surface in all sections, with values ranging between 4.7% and 22.3%. At verticals associated with zones of greater local roughness, turbulence intensity increased significantly, with maximum TKE values in the range of approximately 0.030 to 0.045. These maxima were concentrated in the roughest sectors, which may be associated with the generation of turbulent structures that develop from the bed and extend into intermediate layers of the water column. The Shields parameter exceeded the critical threshold in all three sections, confirming active bedload transport under the measured discharges.*

Keywords—*bed roughness, turbulence intensity, sediment transport, instantaneous velocity, shear stress, gravel-bed rivers*

Influencia de la Rugosidad del Lecho en las Características de la Turbulencia en un Tramo de Lecho de Grava del Río Mapocho

Nicolás Salinas Ibáñez ¹ , Juan Pablo Toro Labbé ² 

Mentor Académico: Juan Pablo Toro Labbé, PhD²

¹ Universidad Andres Bello, Chile, n.salinasibez@uandresbello.edu

² Universidad Andres Bello, Chile, juan.toro.l@unab.cl

Resumen—Este estudio investiga la intensidad de turbulencia (IT) en la dirección longitudinal y su relación con la rugosidad del lecho en un tramo del río Mapocho, caracterizado por una morfología recta, un lecho de grava fina y flujo subcrítico. Se realizaron dos campañas de terreno en septiembre de 2025, midiendo velocidades instantáneas en tres secciones transversales con el sensor electromagnético SEBA FlowSens conforme a la norma ISO 748:2007, complementadas con una caracterización granulométrica mediante el método de Wolman. El lecho estuvo dominado por gravas finas moderadamente clasificadas ($D_{50} \approx 4,8$ mm, $\sigma_g = 1,40$). Los resultados muestran que la IT disminuye fuertemente desde el fondo hacia la superficie libre en todas las secciones, con valores entre 4,7 % y 22,3 %. En verticales asociadas a zonas con mayor rugosidad local, la intensidad de turbulencia aumentó de forma significativa, registrándose valores máximos de TKE en un rango aproximado entre 0,030 y 0,045. Estos máximos se concentraron en los sectores más rugosos, lo que puede asociarse a la generación de estructuras turbulentas que se desarrollan desde el fondo y se extienden hacia capas intermedias de la columna de agua. El parámetro de Shields superó el umbral crítico en las tres secciones, confirmando transporte de fondo activo bajo los caudales medidos.

Palabras clave: Río Mapocho, turbulencia, velocidades instantáneas, granulometría, transporte de sedimentos

I. INTRODUCCIÓN

La intensidad de turbulencia (IT) en ríos de grava determina la estructura del flujo y controla el inicio del movimiento de sedimentos, siendo un parámetro fundamental para el diseño de obras hidráulicas en cauces naturales [1]. A diferencia de lechos lisos o arenosos, los elementos de rugosidad alteran significativamente los perfiles de velocidad y generan estructuras turbulentas que ocupan gran parte de la profundidad del flujo [2, 3]. Esta interacción es crítica para el transporte de sedimentos y la estabilidad de obras hidráulicas, pues la turbulencia puede incrementar los esfuerzos de corte instantáneos muy por encima de los valores medios calculados tradicionalmente [4].

En el contexto local, el sistema del río Mapocho ha sido ampliamente estudiado debido a las alteraciones morfológicas asociadas a la extracción de áridos en el cauce [5]. La literatura señala que, en cauces de lecho de grava, la intensidad de turbulencia y los esfuerzos de Reynolds son considerablemente mayores que en lechos arenosos [6], lo que induce una mayor transferencia de energía hacia el lecho. No obstante, la predicción del transporte de sedimentos bajo estas condiciones sigue siendo difícil de cuantificar debido a la variabilidad espacial del material del lecho [7] y a la incertidumbre en la estimación de la velocidad de fricción en cauces naturales rugosos [8]. La caracterización granulométrica mediante el método de Wolman

introduce, además, sesgos asociados al operador y al protocolo de muestreo [9, 10], lo que exige cautela al derivar parámetros hidráulicos y umbrales de arrastre.

La mayoría de los modelos de turbulencia empleados para predecir flujos en canales abiertos se han desarrollado a partir de experimentos de laboratorio bajo condiciones controladas, donde las primeras mediciones sistemáticas en canales lisos y rugosos datan de mediados de los años 70 [11]. En contraste, las mediciones en ríos de grava siguen siendo limitadas, especialmente en Chile, donde existe escasez de datos de campo. En este contexto, el presente estudio aporta mediciones de campo en el río Mapocho, proporcionando registros de velocidades instantáneas que contribuyen a reducir esta brecha de información. Los resultados permiten contrastar la dinámica observada con modelos teóricos de turbulencia desarrollados en laboratorio, y entregan información de base para la gestión y el diseño de obras de defensa fluvial en cauces con características similares.

Para ello, se plantea la hipótesis de que sectores con mayor rugosidad relativa generarán intensidades de turbulencia superiores que facilitarán el inicio del movimiento de sedimentos incluso cuando los esfuerzos cortantes medios se encuentren próximos al umbral crítico de Shields [4, 12]. Las preguntas de investigación que estructuran este trabajo son: (1) ¿Cuál es la magnitud de la IT en diferentes sectores del río Mapocho y cómo varía con la profundidad? (2) ¿Existen diferencias en la estructura turbulenta entre verticales con distinta rugosidad local del lecho? (3) ¿En qué medida las fluctuaciones turbulentas instantáneas modifican la predicción del transporte de sedimentos respecto a los métodos basados únicamente en esfuerzos medios?

El objetivo de este estudio es cuantificar la relación entre la rugosidad del lecho y la intensidad de turbulencia en un tramo del río Mapocho mediante mediciones de velocidades instantáneas con un sensor electromagnético, complementadas con una caracterización granulométrica del lecho.

II. Área de Estudio y Campañas de Terreno

El área de estudio corresponde a un tramo del río Mapocho ubicado en la estación de aforo Los Almendros, en la comuna de Lo Barnechea, Región Metropolitana de Chile (coordenadas: $-33,3706$, $-70,4513$; altitud: 966 m.s.n.m.). El acceso al sitio se realizó mediante un camino vehicular dentro de un recinto administrado por la Dirección General de Aguas (DGA), lo que requirió autorización previa. El cauce presenta una morfología recta en el tramo estudiado, lecho compuesto mayoritariamente por grava fina y pendiente longitudinal suave ($S_0 = 0,0037$ m/m).

Se definieron tres secciones transversales perpendiculares al eje del flujo (Fig. 1). Las Secciones 1 y 2 presentan un ancho de 11 m y la Sección 3, ubicada aguas arriba, alcanza los 13 m. La separación longitudinal entre secciones es de aproximadamente 20 m entre las

Secciones 1 y 2, y 80 m entre las Secciones 2 y 3.



Fig. 1 (a) Estación fluviométrica Los Almendros y (b) ubicación de las tres secciones de medición en el río Mapocho. Flecha amarilla indica el sentido del flujo.

Campanías de medición

Se realizaron dos campañas de terreno en septiembre de 2025. La primera, el 5 de septiembre, se enfocó en la Sección 1, registrando un caudal de $Q \approx 2,2 \text{ m}^3/\text{s}$. La segunda, el 14 de septiembre, cubrió las Secciones 2 y 3, con caudales del orden de $Q \approx 3,5 \text{ m}^3/\text{s}$, diferencia atribuible a la variabilidad temporal del flujo entre ambas jornadas. En cada campaña se midieron profundidades, velocidades medias e instantáneas, y se realizó la caracterización granulométrica del lecho en el tramo comprendido entre las Secciones 1 y 2 mediante el método de Wolman [13]. Dada la proximidad entre secciones y la homogeneidad morfológica del tramo recto estudiado, los parámetros granulométricos obtenidos se consideran representativos del tramo de estudio en su conjunto.

III. Metodología

A. Aforo por vadeo y medición de velocidades

Las velocidades se midieron con el sensor electromagnético SEBA FlowSens, basado en el principio de Faraday, con un rango de $\pm 5 \text{ m/s}$ y error típico de $\pm 0,005 \text{ m/s}$ o $\pm 2 \%$ del valor registrado [14], siguiendo la norma ISO 748:2007 [15]. La velocidad media en cada vertical se obtuvo según la profundidad:

$$v_{\text{media}} = \begin{cases} v_{40\%} & \text{si } h \leq 50 \text{ cm} \\ \frac{v_{20\%} + v_{80\%}}{2} & \text{si } h > 50 \text{ cm} \end{cases} \quad (1)$$

donde $v_{40\%}$, $v_{20\%}$ y $v_{80\%}$ corresponden a las velocidades medidas al 40 %, 20 % y 80 % de la profundidad total desde el fondo, respectivamente. En la Sección 1, el tiempo de registro fue de 300 s por vertical, lo que permitió establecer un estándar estadístico de convergencia de la IT. El análisis de esta primera campaña demostró que la IT convergía satisfactoriamente antes de los 100 s, por lo que en las Secciones 2 y 3 se redujo la duración de registro a 100 s por vertical, con una frecuencia de muestreo de 1 Hz, optimizando el tiempo de medición en terreno sin comprometer la representatividad estadística de los resultados.

B. Cálculo de caudal

El caudal se determinó mediante integración por paneles trapezoidales. El área de cada panel A_i entre verticales consecutivas se calculó como:

$$A_i = \frac{h_i + h_{i+1}}{2} \Delta x_i \quad (2)$$

y la velocidad representativa de cada panel como la semisuma de las

velocidades medias temporales, obtenidas según la ecuación (1), en los bordes del panel:

$$\bar{v}_i = \frac{v_i + v_{i+1}}{2} \quad (3)$$

El caudal total se obtuvo integrando sobre todos los paneles:

$$Q_{\text{total}} = \sum_i A_i \bar{v}_i \quad (4)$$

La velocidad media global, el área mojada total $A = \sum_i A_i$ y el radio hidráulico se calcularon como:

$$V_m = \frac{Q_{\text{total}}}{A}, \quad R_h = \frac{A}{P} \quad (5)$$

donde P es el perímetro mojado de la sección.

C. Intensidad de turbulencia y TKE

Las fluctuaciones de velocidad se calcularon como $u'(t) = u(t) - \bar{u}$, donde $u(t)$ es la velocidad instantánea, y $\bar{u}$ es la velocidad media de la serie temporal. La intensidad de turbulencia se definió como:

$$IT = \frac{\sigma_u}{\bar{u}} \times 100 \% \quad (6)$$

donde σ_u es la desviación estándar de las fluctuaciones de velocidad. La energía cinética turbulenta se aproximó como:

$$TKE \approx 0,91 \bar{u}'^2 \quad (7)$$

El factor 0,91 corrige la subestimación producida al disponer únicamente de la componente longitudinal de velocidad, dado que esta representa aproximadamente el 55 % de la varianza total en flujos turbulentos anisotrópicos [6]. La TKE se adimensionalizó con el cuadrado de la velocidad media local en cada profundidad de medición:

$$TKE^* = \frac{0,91 \bar{u}'^2}{\bar{u}^2} \quad (8)$$

donde $\bar{u}$ corresponde a la velocidad media temporal para el nivel de medición respectivo (20 %, 40 % o bien 80 % de la profundidad). La estabilidad estadística de IT se verificó mediante su evolución acumulada en función del número de datos.

D. Caracterización granulométrica

La granulometría del lecho se obtuvo mediante el método de recuento de cantos de Wolman [13], midiendo 100 partículas a lo largo de transectos representativos entre las Secciones 1 y 2. Los diámetros se convirtieron a escala logarítmica:

$$\psi = \log_2(D) \quad (9)$$

A partir de esta escala se calculó el diámetro geométrico medio:

$$D_g = 2^{\bar{\psi}} \quad (10)$$

y la desviación geométrica [12]:

$$\sigma_g = 2^{\sigma_{\psi}} \quad (11)$$

Se determinaron los percentiles D_{16} , D_{50} , D_{84} y D_{90} , y el material se clasificó según σ_g como bien clasificado ($\sigma_g < 1,3$), moderadamente clasificado ($1,3 \leq \sigma_g < 1,6$) o pobremente clasificado ($\sigma_g \geq 1,6$) [12].

E. Transporte de sedimentos

La pendiente longitudinal del cauce se estimó mediante análisis topográfico en Google Earth sobre un tramo de 535 m centrado en el área de estudio (235 m aguas arriba y 300 m abajo de las secciones de medición), obteniéndose $S_0 = 0,0037$ m/m. El coeficiente de rugosidad de Manning se calculó con la formulación de Meyer-Peter & Müller (1948) basada en D_{90} , diámetro percentil que caracteriza las partículas más gruesas del lecho y controla la resistencia al flujo:

$$n = \frac{D_{90}^{1/6}}{26} \quad (12)$$

Este valor se empleó para verificar la consistencia entre la velocidad media medida en terreno y la estimada mediante la ecuación de Manning. El esfuerzo cortante sobre el lecho se obtuvo como:

$$\tau_0 = \rho g R_h S_0 \quad (13)$$

y el parámetro adimensional de Shields como:

$$\tau^* = \frac{\tau_0}{(\rho_s - \rho) g D_g} \quad (14)$$

con $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$ para grava [16]. El umbral crítico adoptado fue $\tau_c^* = 0,047$ [12]. Si $\tau^* > \tau_c^*$, el flujo posee capacidad suficiente para movilizar las fracciones gruesas del lecho.

IV. Resultados y Discusión

A. Parámetros hidráulicos

La Tabla I resume los parámetros hidráulicos obtenidos en las tres secciones. La Sección 1, aforada el 5 de septiembre, registró un caudal de $Q = 2,20 \text{ m}^3/\text{s}$ y una velocidad media de $V_m = 0,51 \text{ m/s}$. Las Secciones 2 y 3, aforadas el 14 de septiembre, presentaron caudales del orden de $3,5 \text{ m}^3/\text{s}$ y velocidades medias cercanas a $0,79 \text{ m/s}$, diferencia atribuible a la variabilidad temporal del flujo entre ambas jornadas. Las áreas mojadas fueron similares entre secciones ($4,26$ y $4,46 \text{ m}^2$), mientras que el radio hidráulico disminuyó de $R_h = 0,39 \text{ m}$ en la Sección 2 a $R_h = 0,33 \text{ m}$ en la Sección 3, efecto asociado al mayor ancho transversal (13 m) y al incremento del perímetro mojado de esta última.

Tabla I
PARÁMETROS HIDRÁULICOS POR SECCIÓN

Parámetro	Secc. 1	Secc. 2	Secc. 3
Q (m^3/s)	2,20	3,55	3,41
V_m (m/s)	0,51	0,79	0,78
A (m^2)	4,26	4,46	4,43
R_h (m)	0,37	0,39	0,33
u_* (m/s)	0,12	0,12	0,11

Las Figs. 2, 3 y 4 muestran los perfiles transversales de las tres secciones con las velocidades medias registradas. En la Sección 2 se observan las velocidades puntuales más altas, con valores máximos de hasta $1,98 \text{ m/s}$ en la vertical $x = 8 \text{ m}$.

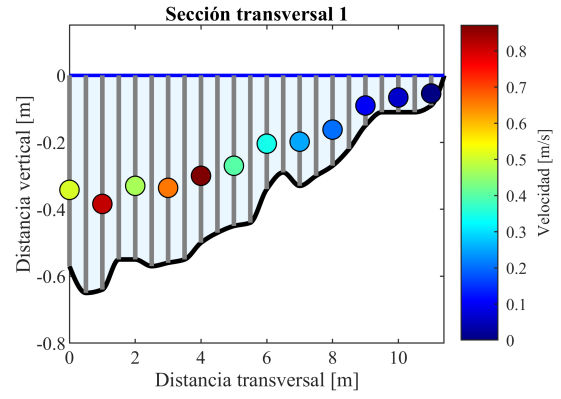


Fig. 2 Perfil transversal con velocidades medias, Sección 1.

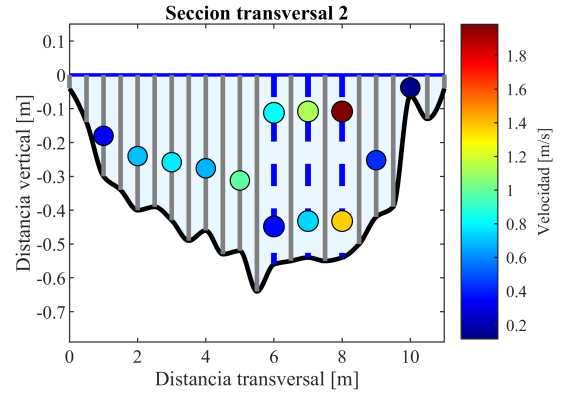


Fig. 3 Perfil transversal con velocidades medias, Sección 2.

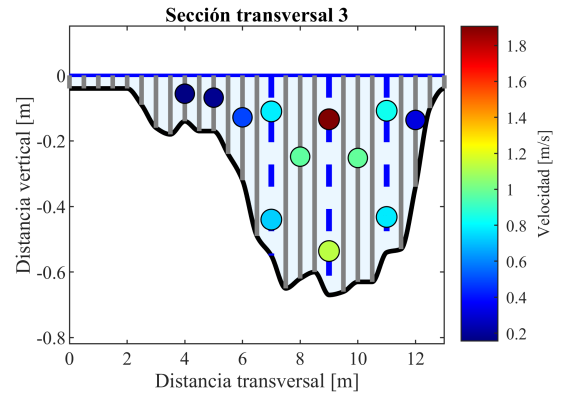


Fig. 4 Perfil transversal con velocidades medias, Sección 3.

B. Intensidad de turbulencia y TKE

En las tres secciones, la intensidad de turbulencia (IT) fue mayor cerca del fondo (20 % de la profundidad) y disminuyó hacia la superficie (80 %), comportamiento consistente con la influencia de la rugosidad del lecho sobre la estructura del flujo. La Tabla II resume la velocidad media, los valores de IT y TKE adimensional, y los estadísticos de asimetría y curtosis para las verticales más representativas de cada sección.

Tabla II

VELOCIDAD MEDIA, INTENSIDAD DE TURBULENCIA, TKE ADIMENSIONAL, ASIMETRÍA Y CURTOSIS POR VERTICAL Y PROFUNDIDAD

Sección	Prof.	$\bar{u}$ (m/s)	σ_u (m/s)	IT (%)	TKE*	S	K
Secc. 1, $x = 1$ m	20%	0,53	0,10	18,20	0,030	0,17	3,00
	40%	0,64	0,10	15,42	0,022	-0,17	2,86
	80%	1,09	0,05	4,74	0,002	-0,08	3,31
Secc. 2, $x = 7$ m	20%	1,07	0,12	11,34	0,012	0,56	2,95
	40%	1,43	0,13	8,87	0,007	-0,25	3,24
	80%	1,79	0,09	4,90	0,002	-0,49	2,69
Secc. 2, $x = 8$ m	20%	0,88	0,19	22,27	0,045	0,31	1,90
	40%	1,09	0,21	19,07	0,033	-0,34	2,50
	80%	1,98	0,11	5,51	0,003	-0,49	3,29
Secc. 3, $x = 7$ m	20%	0,79	0,13	16,24	0,024	0,14	2,93
	40%	0,89	0,12	13,93	0,017	0,19	2,66
	80%	0,97	0,08	8,74	0,007	-0,45	3,65
Secc. 3, $x = 9$ m	20%	1,12	0,16	14,53	0,019	-0,16	2,32
	40%	1,17	0,11	9,48	0,008	0,81	4,28
	80%	1,91	0,08	4,13	0,002	0,05	2,63
Secc. 3, $x = 11$ m	20%	0,64	0,08	13,00	0,015	0,12	2,04
	40%	0,66	0,07	11,10	0,011	0,20	3,38
	80%	0,73	0,06	7,78	0,005	-0,10	2,85

La Fig. 5 presenta los valores adimensionales de σ_u/u_* en función de y/h para cada sección analizada. Notar que todas las mediciones experimentales corresponden a un lecho completamente rugoso. A modo de contraste, se presenta sobre la misma figura la expresión propuesta por Nezu y Nakagawa (1993), válida para flujo en canales lisos:

$$\frac{\sigma_u}{u_*} = C_u \exp\left(-\lambda \frac{y}{h}\right) \quad (15)$$

con $C_u = 2,30$ y $\lambda = 1,00$.

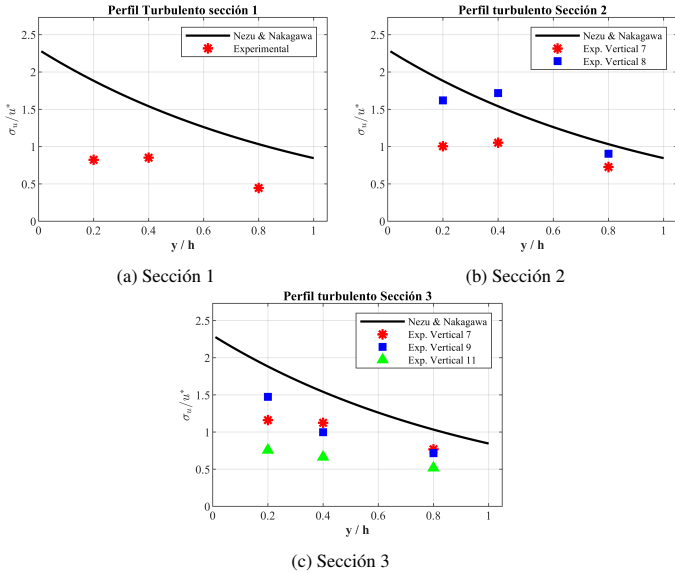


Fig. 5 Perfil adimensional σ_u/u_* en función de y/h comparado con la expresión de Nezu y Nakagawa (1993).

Los datos experimentales muestran que la intensidad de las fluctuaciones turbulentas disminuye desde el fondo hacia la superficie libre, como es de esperar.

En la Sección 1, la magnitud de las fluctuaciones de velocidad es similar para las profundidades del 20 % y 40 %, con valores de 0,1 m/s, las cuales a su vez duplican a las fluctuaciones cerca de la superficie libre (0,05 m/s).

Para la Sección 2, resalta la gran variabilidad que existe en las fluctuaciones de turbulencia en dos verticales separadas por solamente un metro. En particular, la IT de $x = 8$ m duplica los valores de $x = 7$ m para las profundidades del 20 % y 40 %, mientras que cerca de la superficie libre la IT alcanza un valor cercano al 5 % en ambos casos.

En $x = 7$ m, donde el lecho es relativamente más uniforme, la IT decreció de forma progresiva desde 11,34 % al 20 % hasta 4,90 % al 80 %, con una TKE adimensional máxima de 0,012. La curtosis cercana a 3 en todas las profundidades indica que las fluctuaciones de velocidad presentan una distribución próxima a la normal (Tabla II, Fig. 9a). Por otro lado, la vertical $x = 8$ m, asociada a la presencia de elementos de gran tamaño en el lecho, mostró un comportamiento diferente. Al 20 % se obtuvo $IT = 22,27$ %, la mayor intensidad registrada en todo el estudio, con $TKE^* = 0,045$. La IT se mantuvo elevada al 40 % (19,07 %, $TKE^* = 0,033$), lo que es consistente con la propagación de estructuras turbulentas desde el lecho hacia capas intermedias de la columna de agua [2]. Al 80 % la IT disminuye a 5,51 %, reflejando una menor energía turbulenta cerca de la superficie. La distribución aplanada ($K = 1,90$) al 20 % refleja fluctuaciones amplias e irregulares, compatibles con estructuras turbulentas de gran escala (Fig. 9b).

En la Sección 3, las tres verticales muestran una disminución de la IT desde el fondo hacia la superficie. La vertical $x = 7$ m presenta los valores más altos de la sección, mientras que $x = 11$ m los más bajos. La vertical $x = 9$ m presenta la caída más pronunciada entre el fondo y la superficie libre.

Los perfiles muestran que la reducción de σ_u/u_* con la altura puede ser igual o más rápida que la predicha por el modelo de Nezu y Nakagawa, lo que es consistente con cauces naturales de lecho granular, donde la generación de turbulencia está asociada a la rugosidad del fondo y su intensidad disminuye al alejarse del lecho.

La Fig. 6 muestra la IT acumulada en la Sección 1 ($x = 1$ m). Para cada punto se utilizó un registro de 5 minutos contabilizando un total de 300 valores de velocidad longitudinal instantánea. Se observa que para las profundidades del 20 % y 40 % se requieren aproximadamente 100 valores para lograr la convergencia de la IT, mientras que para el punto más cercano a la superficie libre (80 %) se requieren aproximadamente 50 valores. Al 20 % de la profundidad se registró $IT = 18,20$ %, valor que disminuye a 15,42 % al 40 % y a 4,74 % al 80 %. Esta reducción progresiva desde el fondo hacia la superficie es el comportamiento esperado en ríos de lecho de grava, donde la fricción del fondo es la principal fuente de energía turbulenta [1]. La distribución estadística de las fluctuaciones (Fig. 7) en esta sección es cercana a la normal en todas las profundidades ($K \approx 3$).

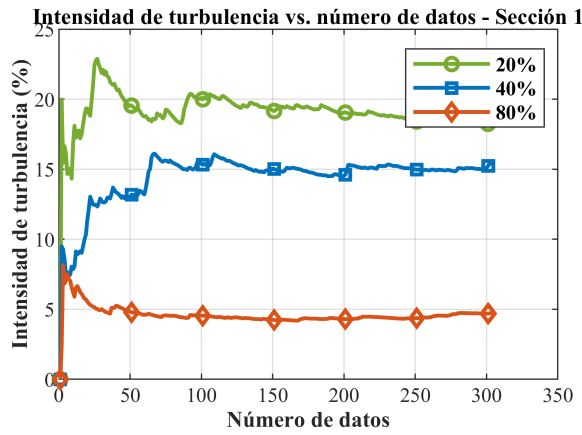


Fig. 6 IT acumulada en Sección 1, $x = 1$ m.

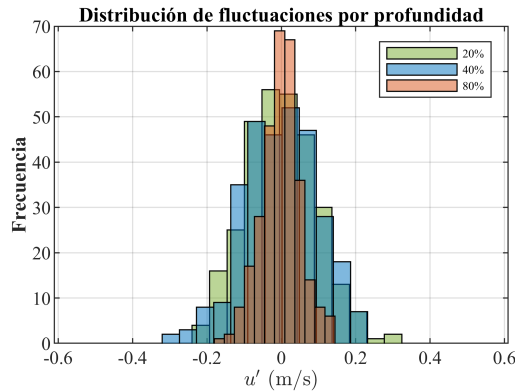


Fig. 7 Distribución de fluctuaciones de velocidad por profundidad en la Sección 1, $x = 1$ m. Las barras muestran la frecuencia de ocurrencia de cada rango de fluctuación a 20 %, 40 % y 80 % de la profundidad.

La Sección 2 presenta resultados con características diferentes respecto de las demás secciones. La comparación entre las verticales $x = 7$ m y $x = 8$ m permite cuantificar el efecto de la rugosidad local sobre la estructura turbulenta, dado que ambas pertenecen a la misma sección y fueron medidas bajo idénticas condiciones de caudal ($Q = 3,55 \text{ m}^3/\text{s}$).

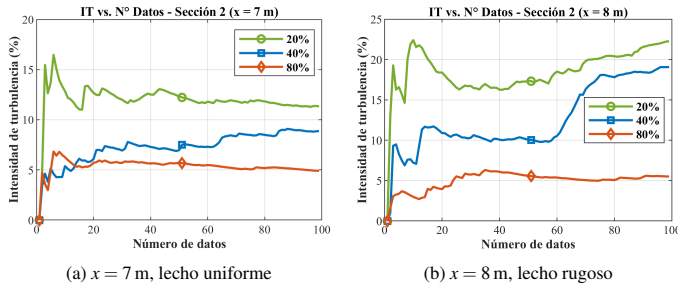


Fig. 8 IT acumulada en la Sección 2, $x = 7$ m (a) y $x = 8$ m (b).

La Fig. 8 muestra la evolución de la IT acumulada para ambas verticales. En (a), correspondiente a $x = 7$ m, las tres profundidades muestran una convergencia razonable a lo largo del registro. Sin embargo, el 40 % presenta una leve tendencia creciente hacia el final, lo que sugiere que 100 valores podrían no ser suficientes para alcanzar una

convergencia completa en esta profundidad. En (b), correspondiente a $x = 8$ m, solo el 80 % muestra una convergencia clara y estable. Las profundidades del 20 % y 40 % presentan mayor variabilidad a lo largo del registro, y el 40 % muestra una tendencia creciente hacia el final, por lo que existe incertidumbre en los valores de IT reportados para estas profundidades en esta vertical.

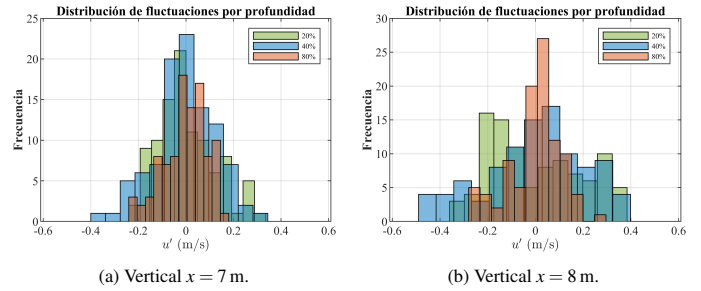


Fig. 9 Distribución de fluctuaciones de velocidad en la Sección 2. En (a) las distribuciones son próximas a la normal; en (b) la distribución al 20 % presenta mayor dispersión ($K = 1,90$).

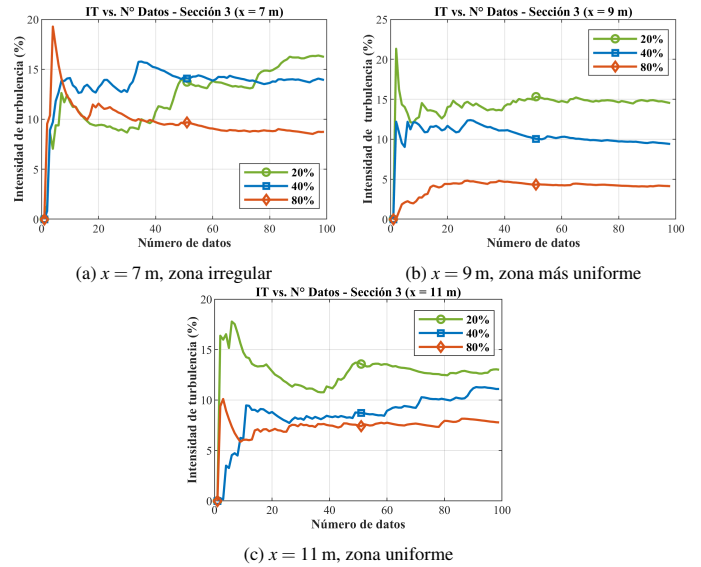


Fig. 10 IT acumulada en la Sección 3.

En la Sección 3, la IT varía entre verticales en función de la rugosidad local del lecho. La Fig. 10 muestra las IT acumuladas para las tres verticales.

La vertical $x = 7$ m, ubicada sobre una zona de mayor irregularidad morfológica, registró las intensidades más altas de la sección: $IT_{20\%} = 16,24\%$, $IT_{40\%} = 13,93\%$ e $IT_{80\%} = 8,74\%$, con TKE adimensional de hasta 0,024 al 20 % (Fig. 10a), lo que es consistente con una mayor energía turbulenta en esta zona del cauce.

La vertical $x = 9$ m (Fig. 10b) mostró un comportamiento particular al presentar las mayores velocidades medias de la sección (1,91 m/s al 80 %) junto con intensidades de turbulencia relativamente bajas (14,53 % al 20 % y 4,13 % al 80 %), con TKE adimensional máximo de 0,019. Esto sugiere que la velocidad media por sí sola no determina la estructura turbulenta, siendo la rugosidad local un factor relevante a considerar. Además, al 40 % se registró $S = 0,81$ y $K = 4,28$, la mayor curtosis observada, asociada a fluctuaciones de velocidad más

concentradas en torno a la media (Fig. 11).

La vertical $x = 11$ m (Fig. 10c), representativa de una zona de lecho más uniforme, registró los valores más bajos: IT de 13,00 % al 20 %, 11,10 % al 40 % y 7,78 % al 80 %, con TKE adimensional entre 0,005 y 0,015, mostrando una reducción progresiva de menor contraste entre profundidades respecto a las verticales anteriores. Las distribuciones de las velocidades fluctuantes fueron en general cercanas a la normal ($K \approx 3$) [4].

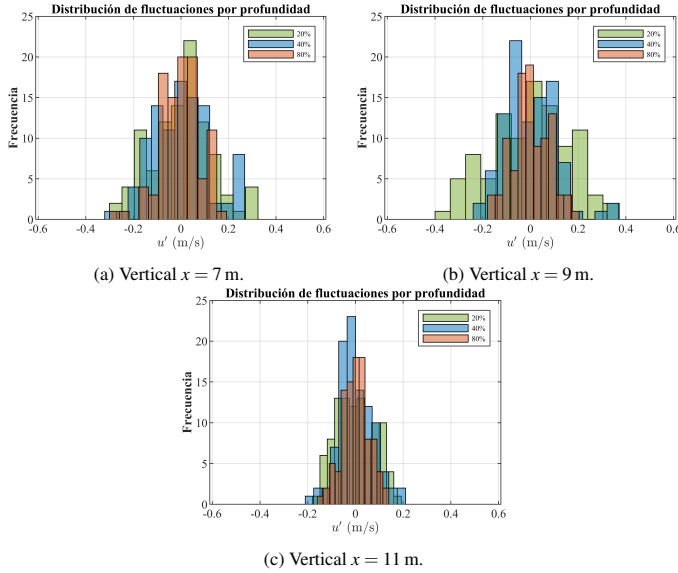


Fig. 11 Distribución de fluctuaciones de velocidad por profundidad en verticales representativas.

C. Granulometría

La caracterización granulométrica del lecho se realizó mediante el conteo de 100 partículas siguiendo el método de Wolman [13]. La curva granulométrica obtenida (Tabla III, Fig. 12) muestra una distribución con un rango de valores relativamente estrecho, con partículas que van desde los 1,8 mm hasta los 10,46 mm, concentrándose la mayor parte entre 3 y 7 mm. El diámetro mediano resultó $D_{50} = 4,81$ mm, lo que clasifica al material como *grava fina* según la escala de Wentworth. El diámetro geométrico medio fue $D_g = 4,83$ mm, prácticamente igual al D_{50} , indicando una distribución simétrica sin predominio de fracciones muy finas ni muy gruesas. Los percentiles superiores arrojaron $D_{84} = 7,13$ mm y $D_{90} = 7,30$ mm, valores relevantes para el cálculo de la rugosidad del cauce mediante la formulación de Manning. La desviación geométrica $\sigma_g = 1,40$ clasifica el material como *moderadamente clasificado* ($1,3 \leq \sigma_g < 1,6$), lo que implica cierta variabilidad en el tamaño de las partículas y una superficie de lecho rugosa e irregular, condiciones que son consistentes con la generación de las estructuras turbulentas observadas en el tramo estudiado [4].

Tabla III
PARÁMETROS GRANULOMÉTRICOS DEL LECHO

Parámetro	Valor
D_g (mm)	4,83
D_{50} (mm)	4,81
D_{84} (mm)	7,13
D_{90} (mm)	7,30
σ_g	1,40
Clasificación	Moderada

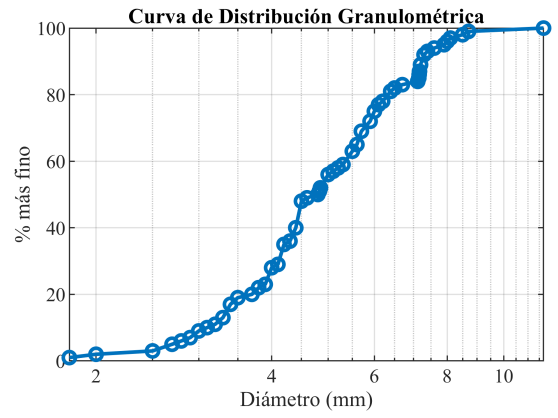


Fig. 12 Curva granulométrica del lecho obtenida mediante el método de Wolman (100 partículas). Se indican los percentiles D_{50} , D_{84} y D_{90} .

D. Transporte de sedimentos

La Tabla IV muestra los resultados del análisis de transporte de sedimentos. En las tres secciones el esfuerzo cortante adimensional τ^* superó ampliamente el umbral crítico de Shields $\tau_c^* = 0,047$, confirmando condiciones de transporte activo de sedimentos bajo los caudales medidos. La Sección 2 presentó el mayor valor ($\tau^* = 0,18$), seguida por la Sección 1 ($\tau^* = 0,17$) y la Sección 3 ($\tau^* = 0,15$).

Tabla IV
PARÁMETROS DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS POR SECCIÓN

Parámetro	Secc. 1	Secc. 2	Secc. 3
τ_0 (Pa)	13,64	14,16	11,98
τ^*	0,17	0,18	0,15
τ_c^*	0,047	0,047	0,047

Si bien el esfuerzo cortante medio superó el umbral de inicio de movimiento en las tres secciones, los valores de TKE elevados registrados en zonas de mayor rugosidad local, como la vertical $x = 8$ m de la Sección 2, sugieren que las fluctuaciones turbulentas instantáneas podrían incrementar los esfuerzos efectivos sobre el lecho, favoreciendo el transporte localizado de sedimentos incluso cuando el esfuerzo cortante medio se mantiene cercano al umbral teórico [4, 12].

V. Conclusiones

Este estudio analizó la relación entre la rugosidad del lecho, la intensidad de turbulencia y el transporte de sedimentos en un tramo del río Mapocho, mediante registros de velocidades instantáneas en tres secciones transversales y una caracterización granulométrica por el método de Wolman.

Respecto a la magnitud de la IT y su variación con la profundidad, los resultados mostraron que la IT disminuye desde el fondo hacia la superficie libre en todas las secciones. Los valores de IT cerca de la superficie libre fueron los que tuvieron menor variabilidad con un rango de intensidades de entre 4,1 % y 8,7 %. En sectores con mayor rugosidad local como la vertical $x = 8$ m de la Sección 2 se registraron los valores máximos de IT cerca del fondo con valores de hasta 22,3 % ($TKE^* = 0,045$). En áreas con lecho más uniforme, como $x = 11$ m de la Sección 3, la IT se mantuvo entre 7,8 % y 13,0 %. Esto sugiere que la rugosidad local es un factor relevante en el control de la estructura turbulenta; las verticales sobre zonas de mayor heterogeneidad superficial alcanzaron intensidades de turbulencia más elevadas y con mayor dispersión en las fluctuaciones de velocidad ($K < 3$), mientras que las verticales en sectores de lecho más regular mostraron una dinámica menos turbulenta. La variabilidad de la IT se explica también por los valores granulométricos del tramo estudiado ($D_{50} = 4,81$ mm, $\sigma_g = 1,40$) que corresponden a un lecho completamente rugoso.

Finalmente, el parámetro de Shields superó el umbral crítico en las tres secciones ($\tau^* = 0,15\text{--}0,18 > \tau_c^* = 0,047$), confirmando transporte activo bajo los caudales medidos. Los valores de TKE en zonas rugosas sugieren que las fluctuaciones turbulentas instantáneas contribuyen a la movilización del material más allá de lo estimado a partir del esfuerzo cortante medio, lo que tiene implicancias para el diseño de obras de defensa fluvial en cauces de grava como el río Mapocho.

Los resultados presentados deben complementarse con campañas de medición adicionales en distintas épocas del año, con el fin de evaluar la variabilidad estacional de la estructura turbulenta. Asimismo, la obtención de perfiles de velocidad completos en la vertical permitiría estimar la velocidad de fricción u_* a partir del perfil logarítmico local, mejorando la caracterización de los esfuerzos de corte y la predicción del transporte de sedimentos en el tramo estudiado.

Referencias

- [1] I. Nezu and H. Nakagawa, *Turbulence in Open-Channel Flows*, ser. IAHR Monograph Series. Rotterdam: A.A. Balkema, 1993.
- [2] A. G. Roy, T. Buffin-Bélanger, H. Lamarre, and A. D. Kirkbride, "Size, shape and dynamics of large-scale turbulent flow structures in a gravel-bed river," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 500, pp. 1–27, 2004.
- [3] P. Kumar and A. Sharma, "Reynolds number effect on the parameters of turbulent flows over open channels," *AQUA - Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, vol. 73, no. 5, pp. 1030–1047, 04 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2166/aqua.2024.056>
- [4] F. Bagherimiyab and U. Lemmin, "Shear velocity estimates in rough-bed open-channel flow," *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 38, no. 14, pp. 1714–1724, 2013. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/esp.3421>
- [5] F. Arróspide, L. Mao, and C. Escarriaza, "Morphological Evolution of the Maipo River in Central Chile: Influence of Instream Gravel Mining," *Geomorphology*, vol. 306, pp. 182–197, 2018. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X1830031X>
- [6] A. Sharma and B. Kumar, "Comparison of flow turbulence over a sand bed and gravel bed channel," *Water Supply*, vol. 21, no. 8, pp. 4581–4592, 06 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2166/ws.2021.201>
- [7] E. Deal, J. G. Venditti, S. J. Benavides, R. Bradley, Q. Zhang, K. Kamrin, and J. T. Perron, "Grain shape effects in bed load sediment transport,"

Nature, vol. 613, no. 7943, pp. 298–302, Jan. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05564-6>

- [8] S. Song, B. Schmalz, and N. Fohrer, "Improved structure of vertical flow velocity distribution in natural rivers based on mean vertical profile velocity and relative water depth," *Hydrology Research*, vol. 49, no. 3, pp. 878–892, 08 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2166/nh.2017.258>
- [9] M. D. Daniels and M. H. McCusker, "Operator bias characterizing stream substrates using wolman pebble counts with a standard measurement template," *Geomorphology*, vol. 115, no. 1, pp. 194–198, 2010. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X09004139>
- [10] T. Galia, V. Škarpich, K. Gajdošová, and P. Krpec, "Variability of wolman pebble samples in gravel/cobble bed streams," *Acta Scientiarum Polonorum Formatio Circumiectionis*, vol. 16, no. 1, pp. 237–246, 2017.
- [11] H. Nakagawa, I. Nezu, and H. Ueda, "Turbulence of open channel flow over smooth and rough beds," *Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers*, vol. 241, pp. 155–168, 1975.
- [12] M. H. Chaudhry, *Open-Channel Flow*, 2nd ed. Springer, 2008.
- [13] M. G. Wolman, "A method of sampling coarse river-bed material," *Transactions, American Geophysical Union*, vol. 35, no. 6, 1954.
- [14] SEBA Hydrometrie, *Operation Manual Electromagnetic Flow Meter SEBA FlowSens*, SEBA Hydrometrie, 2011, manual de operación, FMT 168.
- [15] ISO, "Hydrometry measurement of liquid flow in open channels using current-meters or floats," International Organization for Standardization, Geneva, CH, Standard ISO 748:2007, 2007.
- [16] Y. Hassanzadeh, *Hydraulics of Sediment Transport*. Tabriz, Iran: IntechOpen, 2012, ch. 1, pp. 23–58.