

DOI: 10.24850/j-tyca-14-01-07

Artículos

## **Análisis de las formas de fondo simuladas mediante el modelo tridimensional SSIIM, caso de un cauce natural de aguas poco profundas**

### **Analysis of the bed forms simulated using the three-dimensional model SSIIM, case of a natural shallow water channel**

Santiago Aurelio Ochoa-García<sup>1</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9695-5976>

Teresa Reyna<sup>2</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2114-0806>

Marcelo García<sup>3</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4091-6756>

Ana Heredia<sup>4</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4721-7891>

José Manuel-Díaz<sup>5</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6735-0916>

<sup>1</sup>Universidad Católica de Cuenca, Cuenca, Ecuador,  
saog2105@hotmail.com

<sup>2</sup>Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina,  
teresamaria.reyna@gmail.com



<sup>3</sup>Universidad Nacional de Córdoba, CETA, Córdoba, Argentina,  
cgarcia2mjc@gmail.com

<sup>4</sup>Universidad Nacional de Córdoba, CETA, Córdoba, Argentina,  
aheredil@hotmail.com

<sup>5</sup>Universidad Nacional de Córdoba, CETA, Córdoba, Argentina,  
jmdiazlozada@unc.edu.ar

Autor para correspondencia: Santiago Aurelio Ochoa-García,  
saog2105@hotmail.com

## Resumen

El objetivo de este trabajo se enfoca en analizar las dimensiones dominantes de las formas de fondo simuladas mediante un modelo hidrodinámico tridimensional acoplado con procesos de transporte de partículas y metodologías numéricas de utilidad para estimar los cambios en la morfología de flujos con superficie libre. En este sentido, se aplicaron técnicas de estadística descriptiva y espectral a las geometrías de fondo simuladas, obteniendo una discretización espacial y temporal de las dimensiones dominantes en el dominio de estudio del río Tercero en su paso por la ciudad de Villa María, Argentina. Las características del tramo seleccionado corresponden a las de un río de aguas poco profundas y con pendiente de fondo acorde con la de un cauce de planicie.

**Palabras clave:** modelo SSIIM, análisis de Fourier, wavelets.

## Abstract

This work's objective is to analyze the dominant dimensions of the simulated bed forms using a three-dimensional hydrodynamic model coupled with particle transport processes and useful numerical methodologies to estimate the changes in the morphology of free surface flows. In this sense, descriptive and spectral statistical techniques were applied to the simulated bed forms geometries, obtaining a spatial and temporal discretization of the dominant dimensions in the study domain of the Tercero river as it passed through the city of Villa María, Argentina. The characteristics of the selected domain correspond to that of a river with shallow waters and a bed slope corresponding to that of a plain channel.

**Keywords:** SSIIM Model, Fourier analysis, wavelets.

Recibido: 22/02/2021

Aceptado: 21/09/2021



## Introducción

La experimentación en flujos con superficie libre es indispensable para la caracterización y el análisis de los procesos hidrodinámicos con transporte de partículas de un cauce natural. El fenómeno de transporte de sedimentos genera ciertas formas en el fondo que alteran los efectos de resistencia generadas por las paredes sólidas del lecho, de manera que se ven afectadas las variables hidrodinámicas y de transporte. La medición de las distintas escalas de formas de fondo generadas en diferentes regímenes de flujo ayuda a aumentar el conocimiento de estos procesos de interacción entre el flujo, partículas y fronteras sólidas en el fondo de cauces naturales (Edwards & Glysson, 1999).

Sin embargo, en estudios de diversos autores se ha evidenciado la dificultad de contar con resultados experimentales de alta resolución para el análisis de formas de fondo en flujos de cauces naturales (Guy, Simons, & Richardson, 1966), por lo que se destaca la ventaja de contar con resultados validados de simulación numérica del flujo, que tendrán una resolución espacial y temporal con mayor detalle respecto a los datos medidos con técnicas experimentales.

En los últimos años se han desarrollado modelos numéricos tridimensionales para el cálculo de variables de flujo y transporte de

sedimentos. Un modelo de flujo con superficie libre puede resolverse con las ecuaciones tridimensionales de Navier-Stokes promediadas por Reynolds con modelos de cierre de la turbulencia de dos ecuaciones ( $K - \varepsilon$ ). Por otra parte, los módulos de transporte de sedimentos están compuestos por modelos cuasi-empíricos de carga en suspensión y carga de fondo.

El transporte de las partículas de sedimentos en suspensión puede ser simulado a través de la ecuación general de advección-difusión con expresiones empíricas que representan la velocidad vertical de caída de las partículas. Además, la evolución de la morfología del cauce puede simularse a partir de la ecuación general del balance de masa. Para el cálculo de la carga de sedimento de fondo y la interacción con la carga en suspensión se han implementado metodologías empíricas con base en estudios realizados por Meyer-Peter y Müller (1948), Einstein (1950), Engelund y Fredsøe (1976), van Rijn (1984), o Wong y Parker (2006), entre otros.

En este contexto se busca aplicar modelos y simulaciones con técnicas numéricas que permitan determinar las variables que caracterizan el flujo en ríos. Dentro del contexto de aplicar técnicas matemáticas y numéricas para describir y analizar el comportamiento hidráulico de cauces naturales se planteó el desafío de la simulación de la hidrodinámica tridimensional con procesos de transporte de sedimentos en un tramo de río en la provincia de Córdoba, Argentina.

El estudio se centra en el tramo medio del río Tercero o Ctalamochita ubicado en la localidad de Villa María al sureste de la provincia ( $32^{\circ} 25' 18.59''$  S;  $63^{\circ} 14' 40.07''$  W). Se destaca la importancia de este tramo para un estudio del transporte de sedimentos debido al continuo monitoreo experimental llevado a cabo por las instituciones de la provincia de Córdoba, que han evidenciado la variabilidad de las dimensiones de las formas de fondo que, a su vez, modifican la rugosidad del lecho y por lo tanto las condiciones hidrodinámicas en diferentes dominios espaciales del flujo del río Tercero (Heredia, 2017).

## Objetivos

El objetivo principal de esta investigación es realizar un análisis estadístico de las dimensiones dominantes de las formas de fondo simuladas en un modelo hidrodinámico tridimensional acoplado con procesos de transporte de partículas, teniendo en cuenta que la simulación numérica de las variables será aplicada a un río de aguas poco profundas y con pendiente de fondo correspondiente a la de un cauce de planicie, como lo es el río Tercero en su paso por la ciudad de Villa María.

Para calcular las variables de flujo y transporte de sedimentos en el dominio seleccionado se aplicará el modelo SSIIM.

La densidad espacial y temporal de los resultados simulados de la morfología fluvial permitirán emplear metodologías de análisis espectral con base en la transformada discreta de Fourier y curvas wavelets tipo Morlet para describir las escalas dominantes de las señales de formas de fondo estimadas.

Identificar la variabilidad espacio temporal de las escalas dominantes de formas de fondo mediante las técnicas de análisis espectral permitirá cuantificar la influencia de las distintas escalas de formas de fondo en el campo de flujo y en la resistencia que ejercen las fronteras sólidas sobre la corriente.

## Materiales y métodos

### Simulación numérica tridimensional

El esquema de cálculo seleccionado es el basado en el modelo SSIIM (Sediment Simulation In Intakes with Multiblock Option). SSIIM es una herramienta de mecánica de fluidos computacional para la simulación de variables de flujo tridimensional y transporte de sedimentos en flujos con superficie libre. El *software* es de libre distribución y tiene algunas librerías en código abierto para el desarrollo de metodologías de cálculo (Olsen, 2014).

El modelo SSIIM calcula las variables del flujo con las ecuaciones tridimensionales de Navier-Stokes promediadas por Reynolds, que se resuelven con un modelo de cierre de la turbulencia  $K - \varepsilon$ :

$$\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$



$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_j \bar{u}_i + \bar{u}_j \bar{u}_i)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (2)$$

$$\frac{\partial K}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial K}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \frac{\nu_t}{\sigma_K} \frac{\partial K}{\partial x_j} \right\} + E_T - \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \frac{\nu_t}{\sigma_K} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right\} + C_1 \frac{\varepsilon}{K} E_T - C_2 \frac{\varepsilon^2}{K} \quad (4)$$

Donde las ecuaciones (1), (2), (3) y (4) están escritas en forma tensorial y representan la ecuación de conservación de la masa; las ecuaciones de conservación del momento para las tres direcciones del eje cartesiano  $x_i$ ; la ecuación de cierre de la difusión molecular de la turbulencia, y la ecuación de cierre de la disipación de la energía cinética turbulenta. En las ecuaciones presentadas,  $\bar{u}_j$  representa las variables de velocidad promedio en las tres direcciones;  $t$ , el tiempo;  $\bar{u}_j$ , las fluctuaciones de la velocidad debidas a la turbulencia del flujo;  $\rho$ , la densidad del agua;  $\partial \bar{p}$ , el término de la presión piezométrica del flujo;  $\nu$ , la viscosidad cinemática del agua;  $K$ , la energía cinética turbulenta del flujo;  $\nu_t$ , la viscosidad cinemática debida a los vórtices;  $\sigma_K$ , el coeficiente de Schmidt;  $E_T$ , la tasa de producción de energía cinética turbulenta desde el flujo debido a su interacción con los esfuerzos de Reynolds;  $\varepsilon$ , la tasa de disipación de la energía cinética turbulenta; y  $C_1$  y  $C_2$  son

constantes empíricas que presentan valores calibrados de aproximadamente  $C_1 = 1.44$  y  $C_2 = 1.92$  (García & Niño, 2003).

El módulo hidrodinámico del modelo SSIIM resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds con un modelo de cierre de la turbulencia  $K - \varepsilon$  usando el método de volúmenes finitos con un esquema de cálculo SIMPLE. El planteamiento principal del método SIMPLE es calcular un valor de presión inicial y con el error en la continuidad obtener una ecuación para la corrección del campo de presiones; con las variables corregidas se procederá al cálculo de las otras incógnitas del sistema. Cuando esta corrección vinculada al campo de presión del flujo es adherida, la ecuación de continuidad es satisfecha (Olsen, 2012).

Para la simulación del transporte de sedimentos de carga en suspensión se tomó en cuenta el modelo de la ecuación de transporte o ecuación de advección (García, 2008):

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \bar{u}_i \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_i} - v_s \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_1} = \frac{\partial \overline{u'_i c'}}{\partial x_i} \quad (5)$$

En la ecuación (5),  $\bar{c}$  representa la concentración del sedimento en suspensión; los términos  $\overline{u'_i c'}$  representan las fluctuaciones de la concentración del sedimento por la turbulencia del flujo en las tres

direcciones de los ejes cartesianos, que son resueltos con el modelo de cierre  $K - \varepsilon$ .

Para la discretización de los términos difusivos-convectivos de las ecuaciones (1), (2), (3), (4) y (5) se tomó en cuenta el esquema de volúmenes finitos de primer orden con ley potencial (POW) y para los términos temporales se consideró el esquema implícito de Euler de primer orden (Patankar, 1980).

La expresión para la estimación del transporte de sedimentos de fondo se basó en estudios previos presentados por Van Rijn (1984):

$$q^* = 0.053 \frac{\tau_s^* - \tau_c^{*2.1}}{D^{*0.3}} \quad (6)$$

Donde en la Ecuación (6),  $\tau_s^*$  el esfuerzo cortante superficial de las partículas;  $\tau_c^*$ , el esfuerzo cortante crítico del flujo, y  $D^*$  es el diámetro adimensional de las partículas de sedimento. La selección de la metodología de Van Rijn queda justificada por el material que conforma el lecho del río Tercero en el tramo de estudio, con partículas de material no cohesivo con tamaño medio de aproximadamente 1.95 milímetros (Heredia, 2017).

Con la Ecuación (6) del transporte de sedimentos de fondo se puede estimar la evolución de la morfología en el fondo del cauce, esto tomando en cuenta la ecuación de balance de masa del transporte de sedimentos:

$$\frac{\partial z_0}{\partial t} = c_{\lambda_p} * \frac{\partial u_{qb_i}}{\partial x_i} \quad (7)$$

Donde en la Ecuación (7),  $\partial z_0$  es la diferencia en el fondo estimada por el transporte de sedimentos en función del tiempo;  $c_{\lambda_p} \approx 2$ , el valor de la porosidad relativa de las partículas de carga de fondo, y  $\frac{\partial u_{qb_i}}{\partial x_i}$  es el flujo de transporte de sedimentos en el fondo. La evolución del fondo del cauce en una celda de cálculo para un tiempo  $t$  se obtiene del balance de la tasa de transporte de sedimentos de fondo  $qb_i$  entre celdas contiguas, que se estima a partir de la Ecuación (6).

Tomando en cuenta el modelo SSIIM se aborda un enfoque totalmente desacoplado en la simulación de la hidrodinámica tridimensional y de la evolución de la morfología fluvial, asumiendo que no hay interacción directa del flujo con la carga en suspensión con la carga de fondo o con el nivel del fondo. Sin embargo, se consideran los resultados del flujo medio en cada paso de iteración con el objeto de obtener la variabilidad del transporte de partículas en un paso de tiempo morfológico, en el que se calcula el transporte de sedimentos en suspensión, el transporte de carga de fondo y la evolución de la morfología. Esta suposición es válida en casos donde la concentración de sedimentos en suspensión es tan diluida que no podrá alterar las condiciones de flujo. Este enfoque para SSIIM se refuerza aún más por el

hecho de que en el modelo numérico la evolución de la morfología y los procesos de transporte de carga de fondo se calculan en términos de una capa de carga de fondo y no de partículas de sedimento individuales.

## **Análisis espectral y discretización de formas de fondo**

La transformada discreta de Fourier descompone una señal en funciones seno y coseno que se denominan comúnmente funciones base de la transformada discreta de Fourier. El resultado de la transformada discreta de Fourier es un conjunto de números que representan amplitudes de las funciones base. Las funciones base son un conjunto de ondas seno y coseno con amplitud unitaria; se asigna a cada amplitud (el dominio de frecuencia) la onda seno o coseno adecuada (funciones base); el resultado es un conjunto de ondas de seno y coseno escaladas que se pueden añadir para formar la señal del dominio (Smith, 1999).

La transformada discreta de Fourier sufre un fenómeno conocido como fuga de energía, que ocurre en la estimación del espectro de energía relacionado con las frecuencias de la señal. Se han desarrollado técnicas con el objetivo de suprimir este fenómeno de fuga de energía, tales metodologías introducen una función del paso espacial o temporal que es

igual a la extensión de la señal analizada, lo que permite disminuir los datos del historial y eliminar las discontinuidades al inicio y al final de un registro de baja frecuencia (Bendat & Piersol, 2010).

Sin embargo, para un análisis en el que no sería apropiado definir una escala predeterminada debido al amplio rango de frecuencias espaciales (como el caso de las formas de fondo estudiadas en este trabajo), un método de localización de frecuencias dominantes que tiene escala independiente, como el análisis con curvas tipo wavelets, podría ser la solución (Catano-Lopera, Abad, & Garcia, 2009).

En este sentido, para las señales que presentan múltiples escalas de variabilidad y frecuencia en el espacio o tiempo puede ser de utilidad un análisis localizado de transformaciones con curvas tipo wavelets para discriminar las geometrías dominantes de las variables analizadas (Singh, Lanzoni, Wilcock, & Foufoula-Georgiou, 2011).

La transformación discreta con curvas tipo wavelet se define como la convolución del producto de la transformada inversa de Fourier. Se han desarrollado gran cantidad de familias de wavelets que se adaptan a diferentes tipos de análisis, tal como lo es la función Morlet, que se asocia con números complejos de funciones Gaussianas (Catano-Lopera *et al.*, 2009).

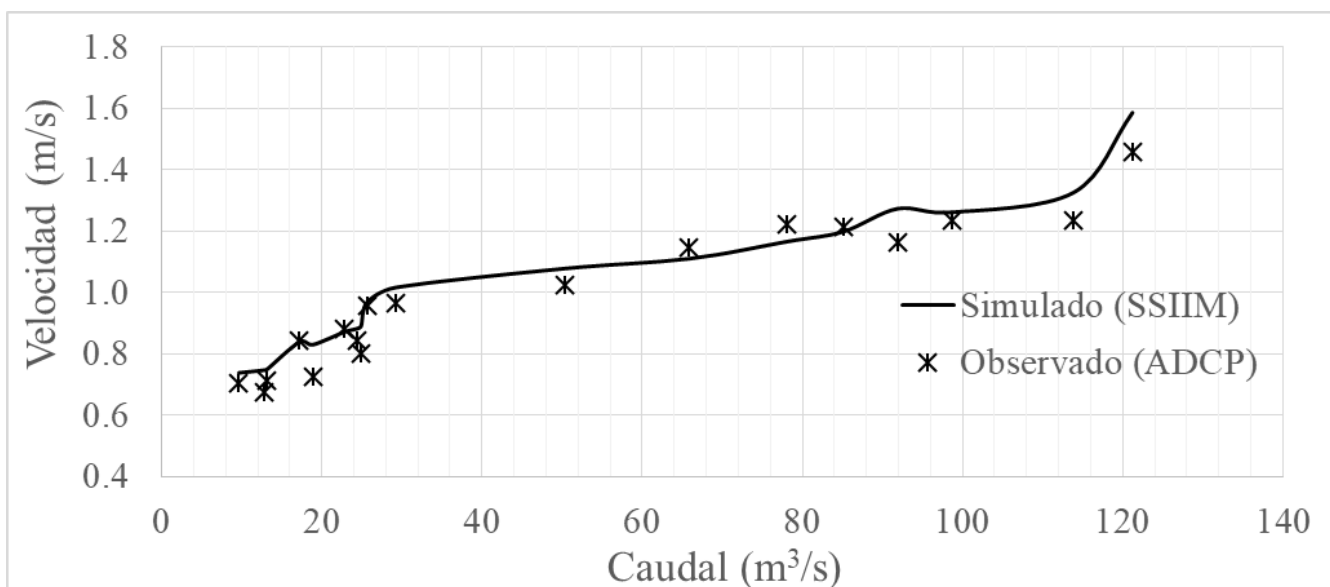
En la discretización de frecuencias dominantes con base en curvas wavelets de señales de morfología fluvial se ha evidenciado que la función Morlet ha presentado eficiencia y resultados uniformes al analizarse señales

con periodicidades bajas, como lo son las formas de fondo tipo rizos y dunas presentadas en el flujo de cauces naturales (Gutierrez, Abad, Parsons, & Best, 2013). De acuerdo con esto se ha considerado el paquete "Bedforms-ATM" (Gutierrez, Mallma, Nuñez-Gonzalez, Link, & Abad, 2018) para analizar las señales de formas de fondo simuladas en el río Tercero aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi con curvas wavelets tipo Morlet.

## Resultados

En el dominio del tramo del río Tercero aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi de la ciudad de Villa María se implementó la modelación tridimensional con SSIIM para simular la hidrodinámica del flujo con procesos de transporte de sedimentos. Se simularon 18 eventos a partir de los caudales caracterizados con mediciones realizadas con un perfilador de corriente acústico doppler (ADCP, por sus siglas en inglés) YSI/SonTek S5, y que están en el rango de 9.64 a 121.22 m<sup>3</sup>/s; los eventos seleccionados no presentan desborde o flujo en las riveras de inundación del cauce; por esta razón no es necesario tomar en cuenta

efectos de secado-mojado en el tramo analizado. En la Figura 1 se presentan resultados de la velocidad media del flujo obtenidos de la caracterización con el instrumento ADCP y de la simulación con la herramienta de cálculo SSIIM.



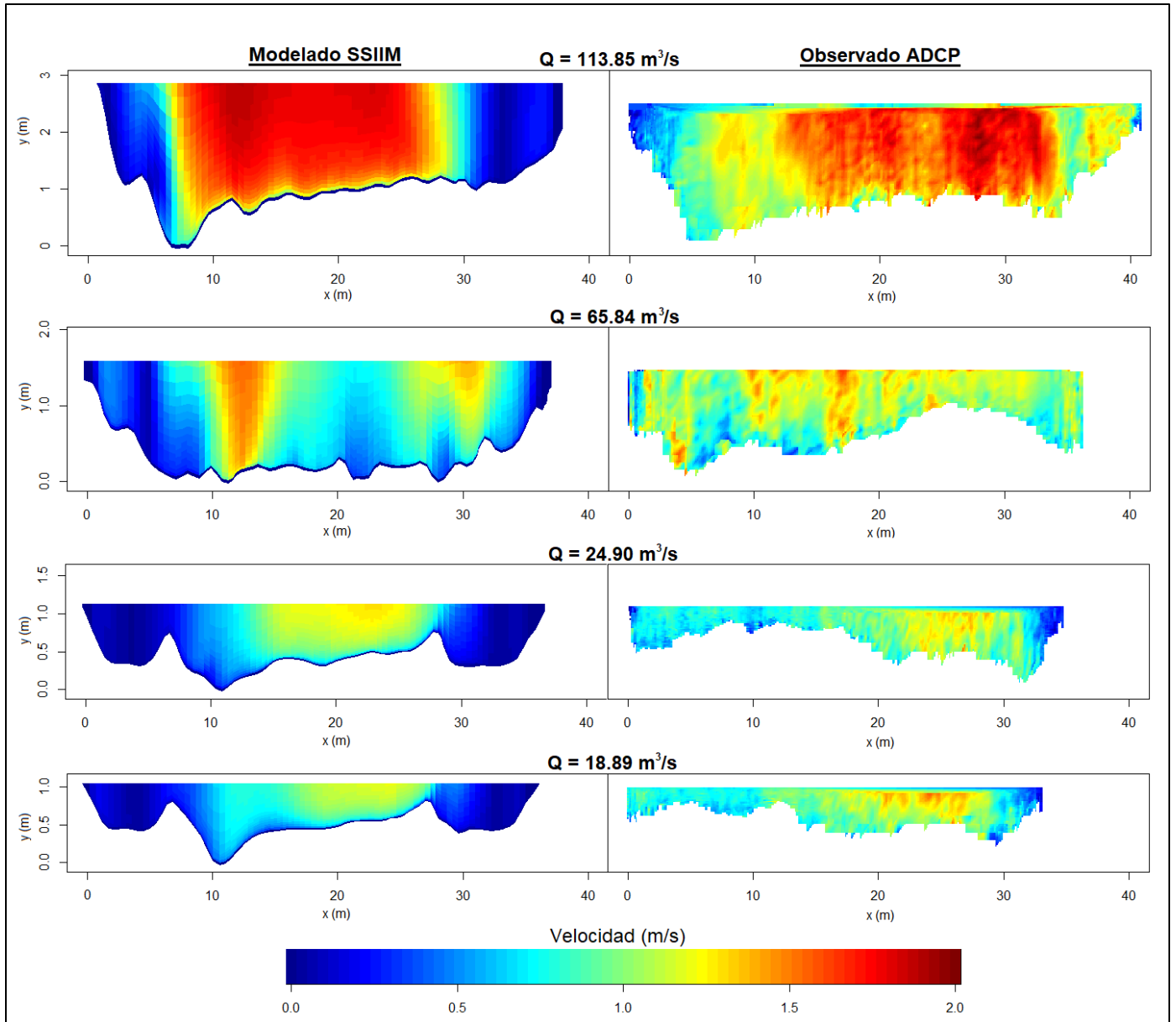
**Figura 1.** Resultados de la velocidad media observada y simulada en el flujo del río Tercero a 10 metros del puente Juan Bautista Alberdi de la ciudad de Villa María.

Los resultados presentados en la Figura 1 corresponden a una sección de control localizada a 10 metros del puente Juan Bautista Alberdi y se puede observar un buen comportamiento de los resultados de velocidad media simulada en SSIIM, en contraste, con los datos medidos



mediante un instrumento ADCP que obtuvo datos de velocidad instantánea en celdas con tamaño de 10 centímetros en la horizontal por dos centímetros en la vertical. El error máximo al comparar las series es menor al 15 %, que corresponde al evento con caudal de 18.89 m<sup>3</sup>/s y se tiene un error promedio cercano al 6 % de los valores calculados frente a los observados en campo.

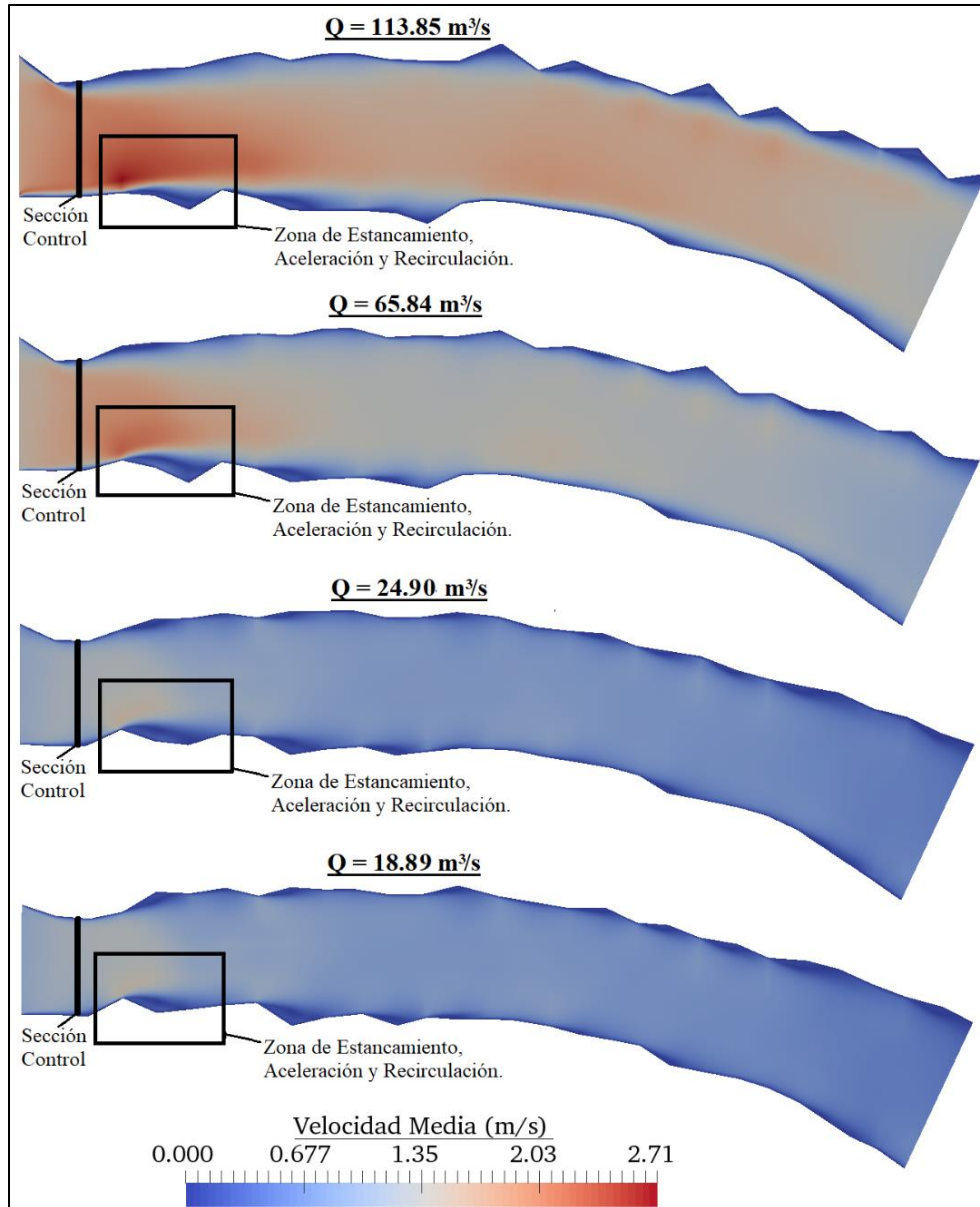
Se han contrastado los perfiles de velocidad instantánea en la sección de control con ADCP con los resultados de velocidad media del modelo tridimensional (Figura 2) para los eventos de 113.85, 65.84, 24.90 y 18.89 m<sup>3</sup>/s.



**Figura 2.** Esquema de áreas coloreadas que representan la velocidad modelada y observada en la sección de control del río Tercero aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi.

Analizando los resultados presentados en la Figura 2 se observan diferencias propias de comparar resultados de velocidad instantánea medidas con un ADCP con la velocidad promediada obtenida con el modelo tridimensional SSIIM. Sin embargo, se puede observar que los valores medios están en el mismo orden de aproximación para los eventos correspondientes.

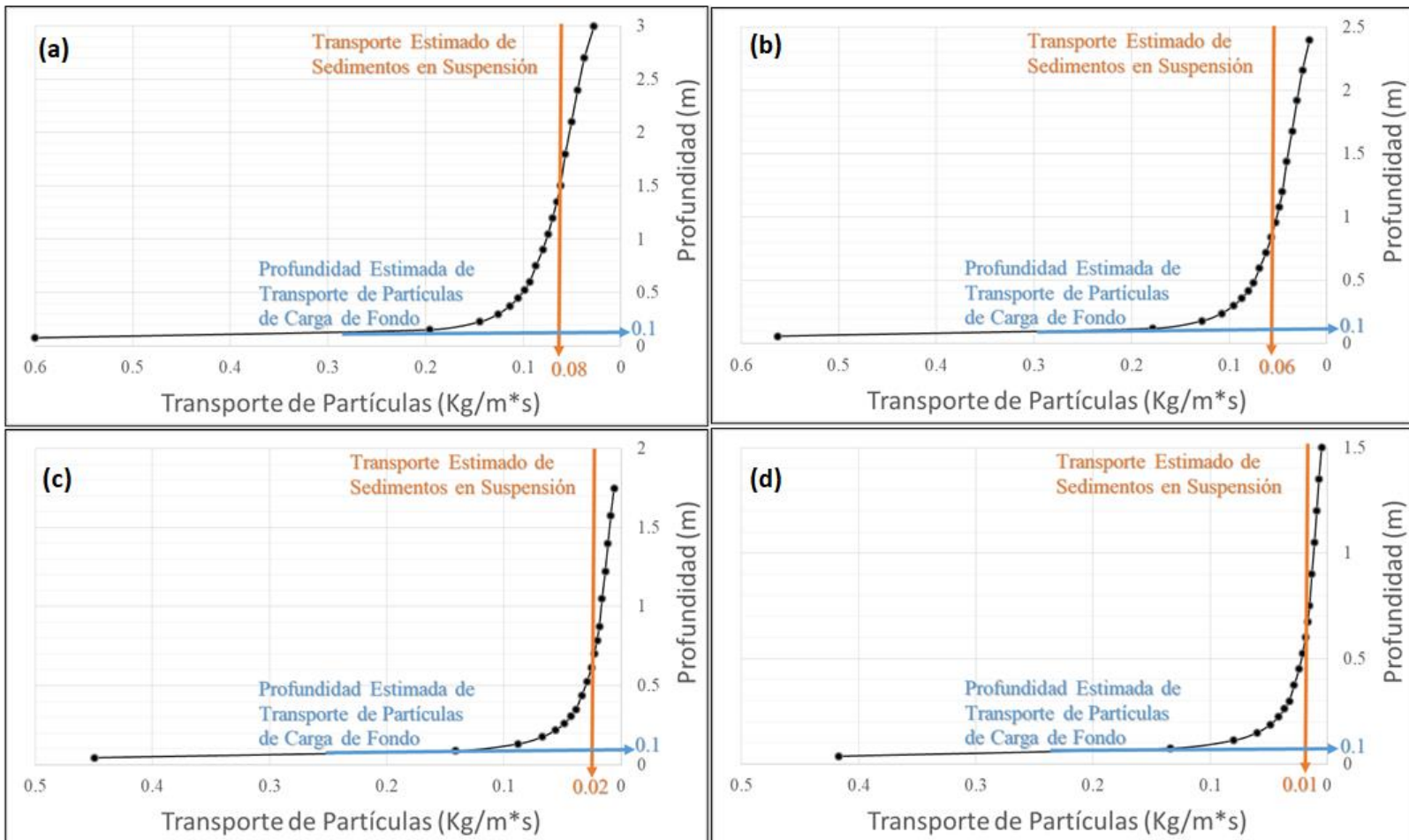
En la Figura 3 se presenta un esquema de áreas coloreadas que representan la velocidad media simulada en la superficie del flujo del tramo del río Tercero: los eventos de 113.85 m<sup>3</sup>/s, 65.84 m<sup>3</sup>/s, 24.90 m<sup>3</sup>/s y 18.89 m<sup>3</sup>/s.



**Figura 3.** Esquema de áreas coloreadas que representan la velocidad media superficial del flujo del río Tercero aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi.

Analizando la Figura 3 se observan zonas de estancamiento y aceleración en el flujo ubicadas en las cercanías de las márgenes de río Tercero simulado y estos fenómenos, que representan la variabilidad del flujo medio, son atribuidos principalmente a la interacción del fluido con las fronteras sólidas y a las irregularidades en la batimetría del cauce.

En la Figura 4 se presenta el perfil vertical del transporte de sedimentos simulado que representa el flujo del río Tercero aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi en el centro de la sección de control.



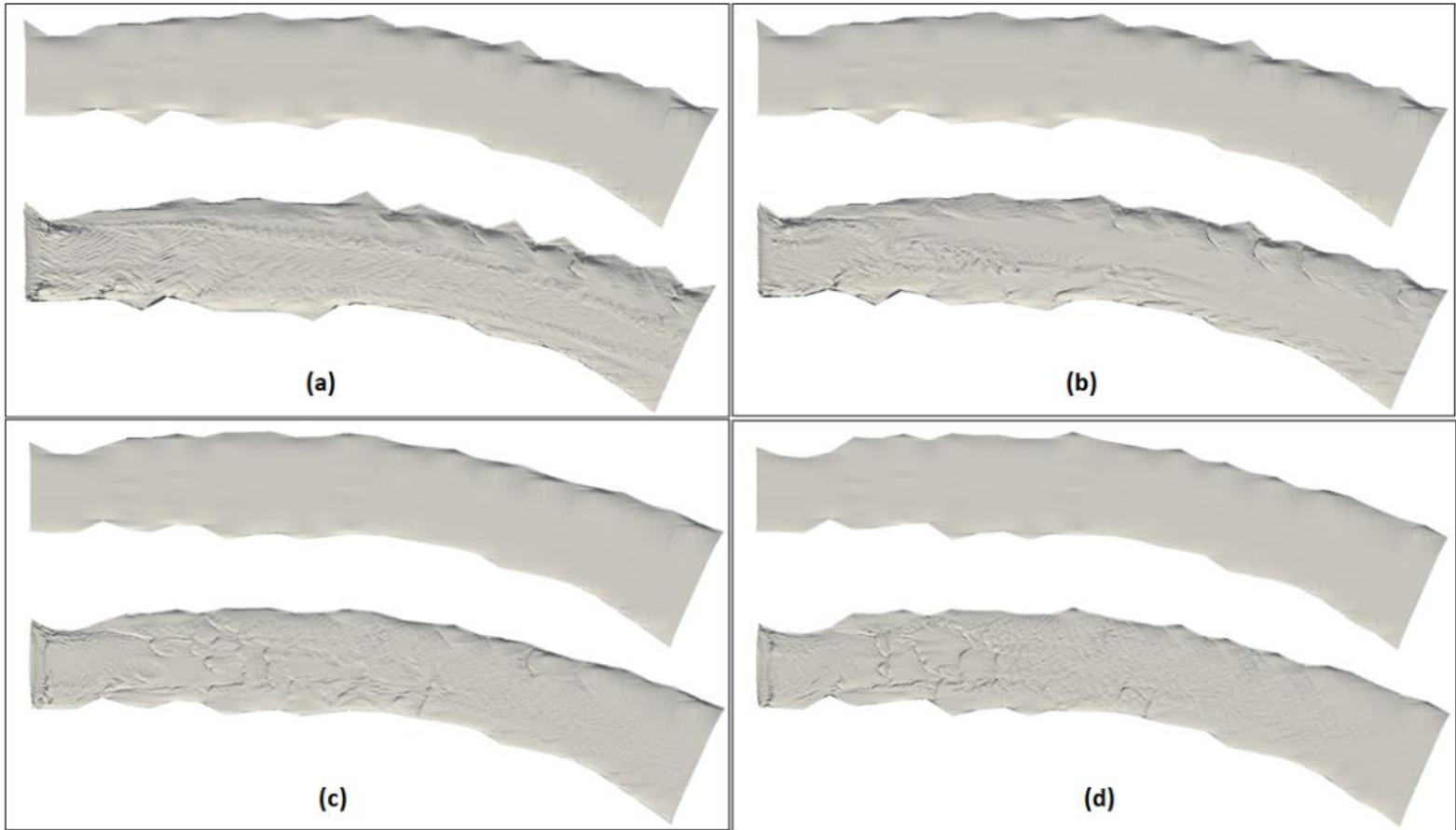
**Figura 4.** Resultados del perfil de transporte de sedimentos simulado en SSIIM que representan el tramo medio de la sección de control del río Tercero aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi: (a) 113.85 m<sup>3</sup>/s; (b) 65.84 m<sup>3</sup>/s; (c) 24.90 m<sup>3</sup>/s, y (d) 18.89 m<sup>3</sup>/s.

Respecto al perfil vertical del transporte de sedimentos simulado que representa el flujo del río Tercero (Ctalamochita) aguas abajo del

puede desprenderse que la mayor parte del transporte de partículas ocurre cerca del fondo, en un porcentaje mayor al 90 %, en contraste con la media de partículas que se mueven en la vertical en forma de carga en suspensión, que es del orden del 10 % de la carga total de sedimentos. También en la Figura 4 se observa que la línea activa de transporte de sedimentos en el fondo se encuentra a unos 10 centímetros del fondo del cauce para todos los eventos analizados.

En la Figura 5 se presentan las superficies que representan el fondo del río Tercero (Ctalamochita) aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi; en la parte superior, la morfología base; en la parte inferior, la morfología resultante de la simulación con SSIIM.



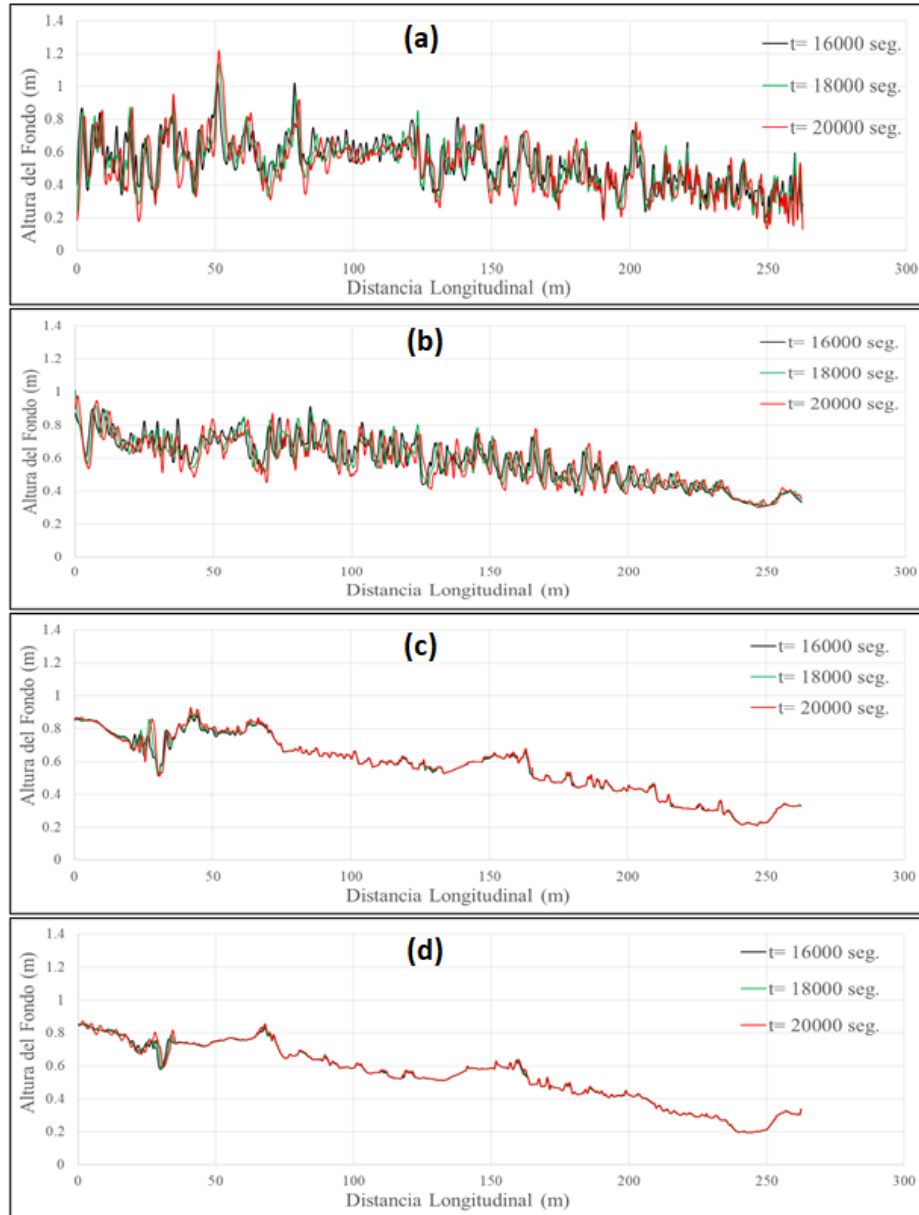


**Figura 5.** Superficies que representan la morfología del tramo del río Tercero aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi: (a)  $113.85 \text{ m}^3/\text{s}$ ; (b)  $65.84 \text{ m}^3/\text{s}$ ; (c)  $24.90 \text{ m}^3/\text{s}$ , y (d)  $18.89 \text{ m}^3/\text{s}$ .

La estimación de las morfologías presentadas en la Figura 5 para los eventos simulados con el modelo SSIIM depende principalmente de las características de las partículas, de la estimación del transporte sedimentos, de las variables hidrodinámicas, del régimen de flujo en las

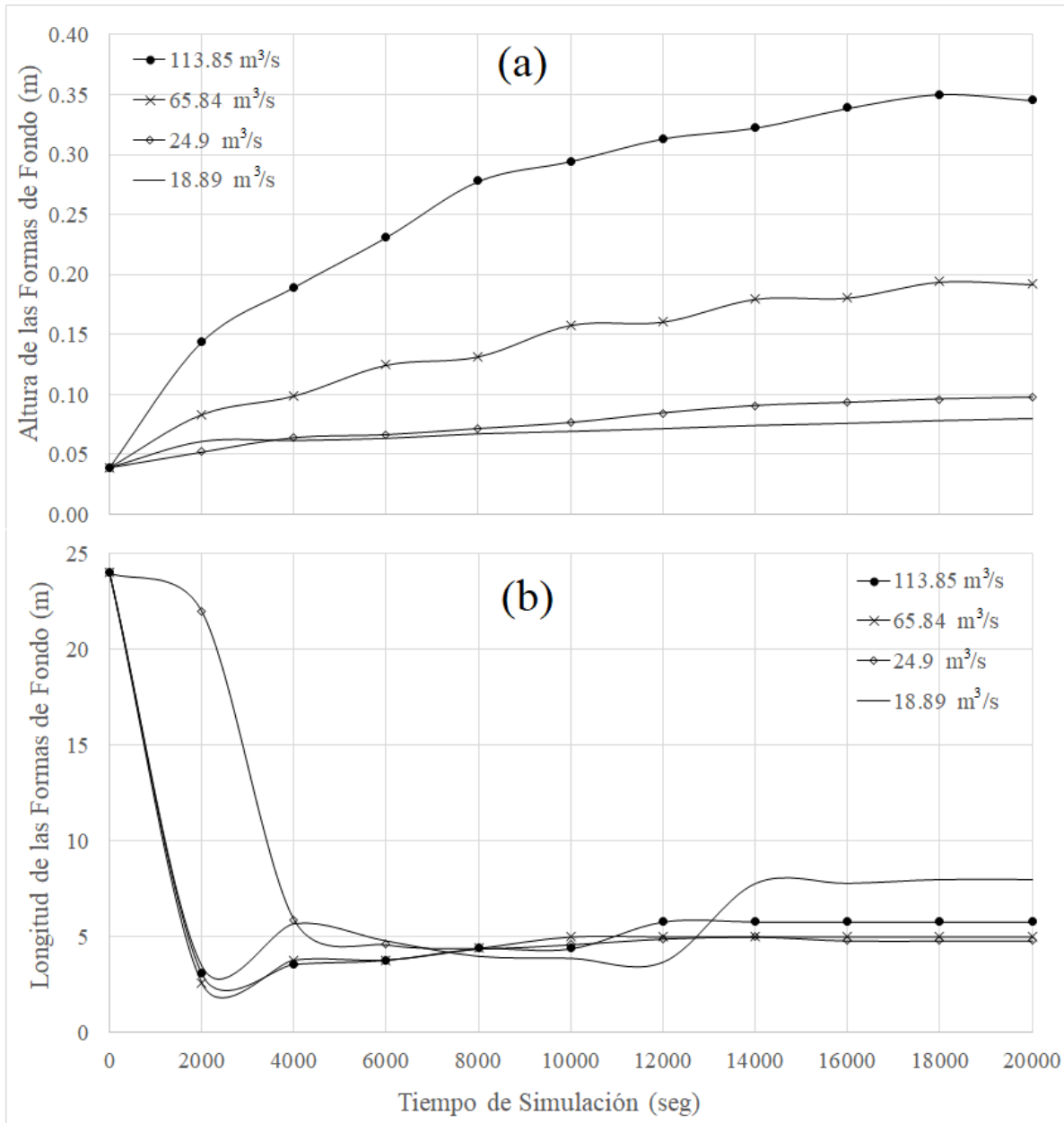


celdas cercanas al fondo y del tiempo de simulación, que fue de 20 000 segundos con un paso de 20 segundos y 100 iteraciones para cada paso de tiempo. En forma transitoria, las formas de fondo se desarrollan según la intensidad del flujo hasta alcanzar un estado de régimen —como se observa en la Figura 6— de las señales longitudinales en el medio del tramo.



**Figura 6.** Señales de la morfología fluvial simuladas con SSIIM del río Tercero aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi: (a)  $113.85 \text{ m}^3/\text{s}$ ; (b)  $65.84 \text{ m}^3/\text{s}$ ; (c)  $24.90 \text{ m}^3/\text{s}$ , y (d)  $18.89 \text{ m}^3/\text{s}$ .

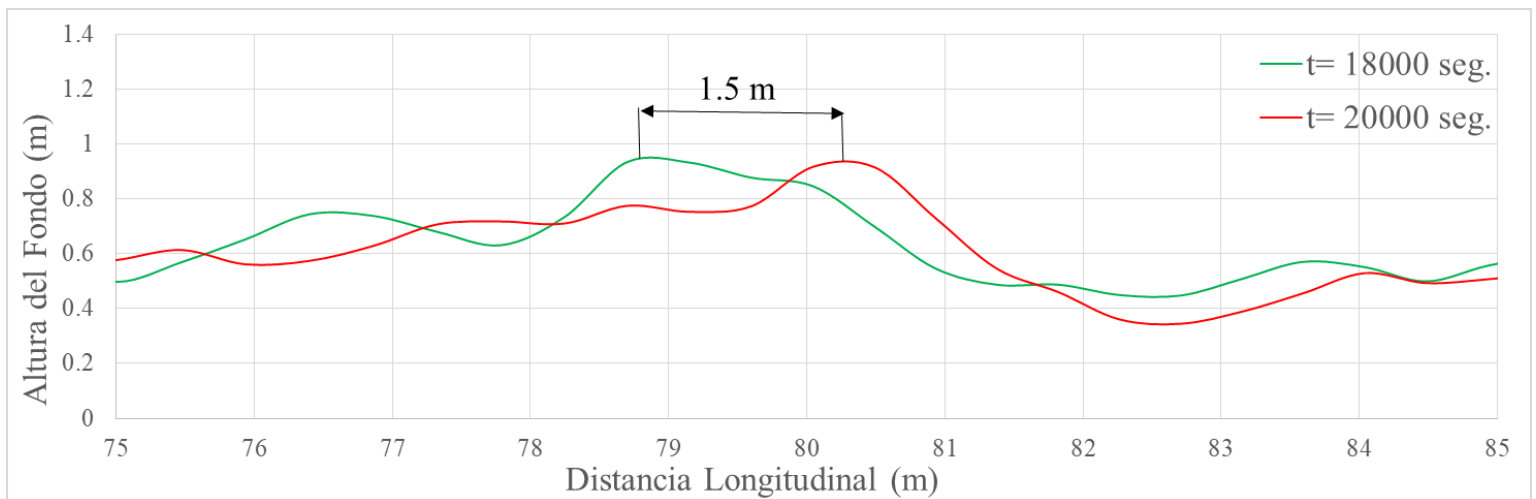
La estabilidad de los perfiles del lecho presentados en la Figura 6 se puede verificar analizando la Figura 7 con la evolución de la altura y longitud media de las formas de fondo en función del tiempo de simulación.



**Figura 7.** Evolución de la altura (a) y longitud de onda (b) de las formas de fondo simuladas con SSIIM.

De acuerdo con lo presentado en la Figura 7, la geometría de los perfiles longitudinales simulados tienden a un régimen estable a partir del tiempo de 16 000 segundos con dimensiones en el mismo orden conforme aumenta el paso temporal.

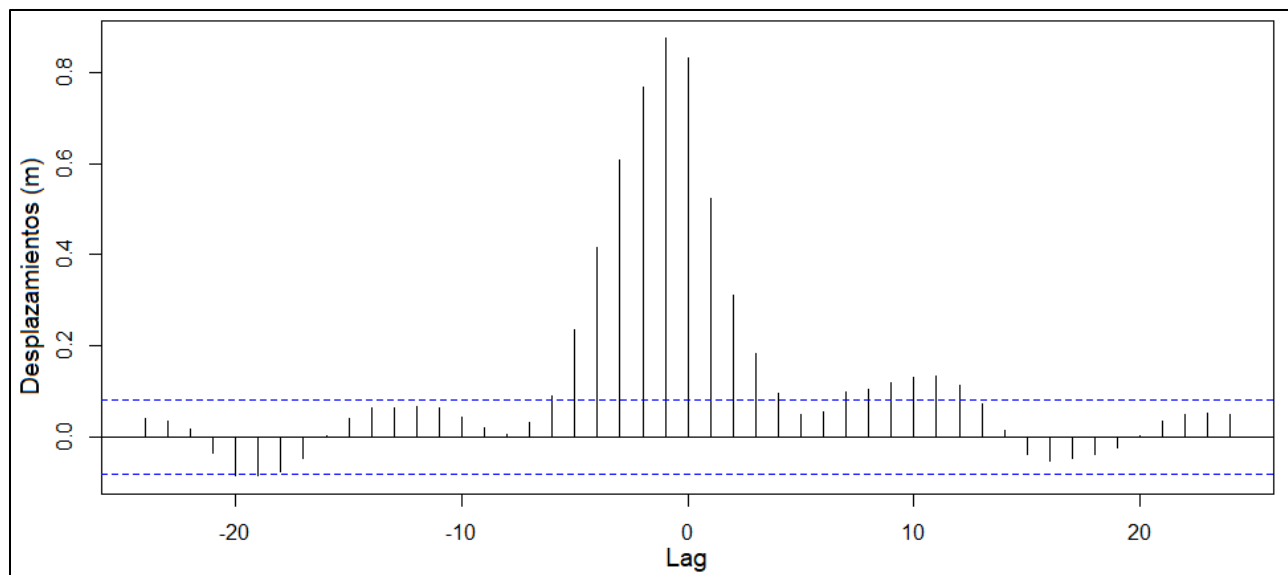
Se puede estimar la celeridad de las dunas simuladas vinculando tramos de las señales de formas de fondo en dos pasos de tiempo contiguos, como se presenta en la Figura 8.



**Figura 8.** Duna en el corte longitudinal de la morfología fluvial simulada del río Tercero  $Q = 113.85 \text{ m}^3/\text{s}$ .

La celeridad que corresponde a la duna presentada en la Figura 8 tiene una magnitud de  $0.00075 \text{ m/s}$ . También mediante la correlación

cruzada de las formas de fondo simuladas en SSIIM para diferentes tiempos se pueden obtener valores de la celeridad promedio de las formas de fondo de acuerdo con lo presentado en la Figura 9 para el evento de  $113.85 \text{ m}^3/\text{s}$ .



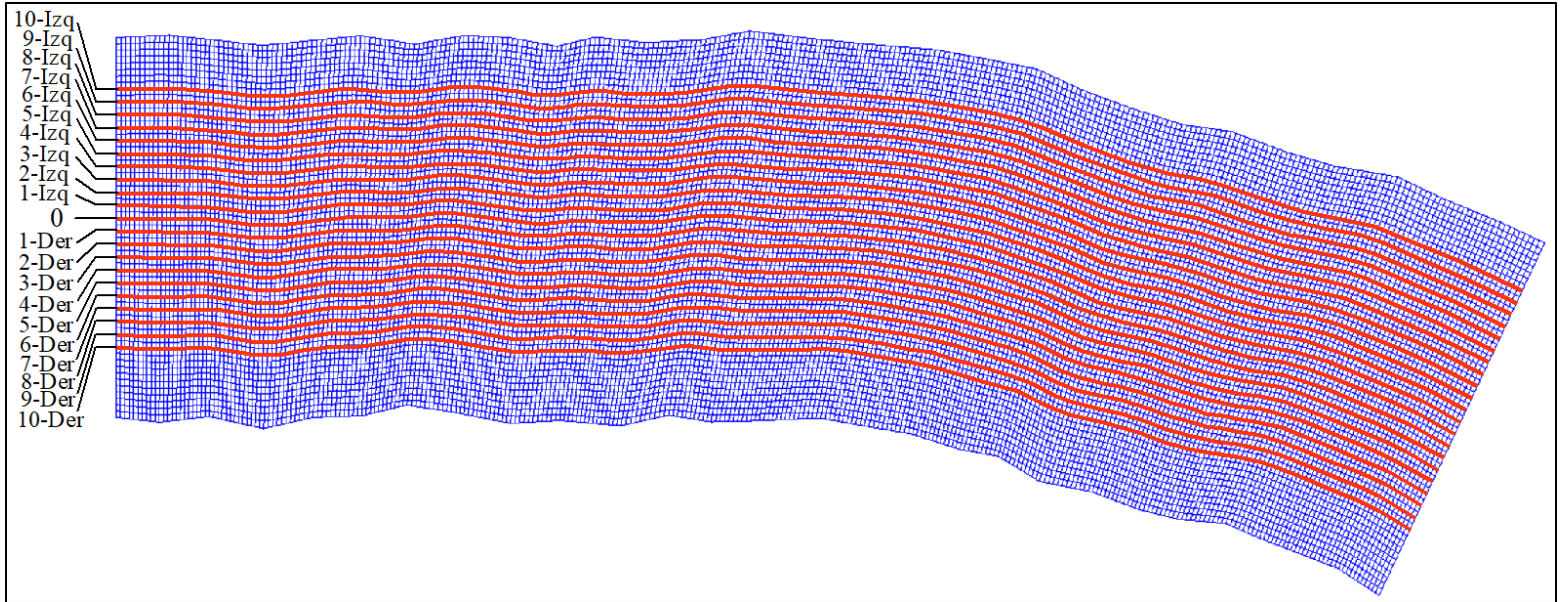
**Figura 9.** Correlación cruzada de perfiles longitudinales de formas de fondo simuladas en el río Tercero,  $Q = 113.85 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Teniendo en cuenta el paso temporal de 2 000 segundos y los resultados presentados en la Figura 9, para el tramo analizado se estimó una celeridad en el orden de  $0.00045 \text{ m/s}$ , que está en el rango de formas de fondo de pequeña magnitud según la discretización realizada por Coleman y Melville (1994).

## Discusión

La densidad espacial y temporal de los resultados simulados de la morfología fluvial ha permitido plantear como innovación de este trabajo emplear metodologías de análisis espectral con base en la transformada discreta de Fourier y curvas wavelets tipo Morlet para describir las escalas dominantes de las señales de formas de fondo estimadas y analizar la distribución de la geometría del fondo del cauce.

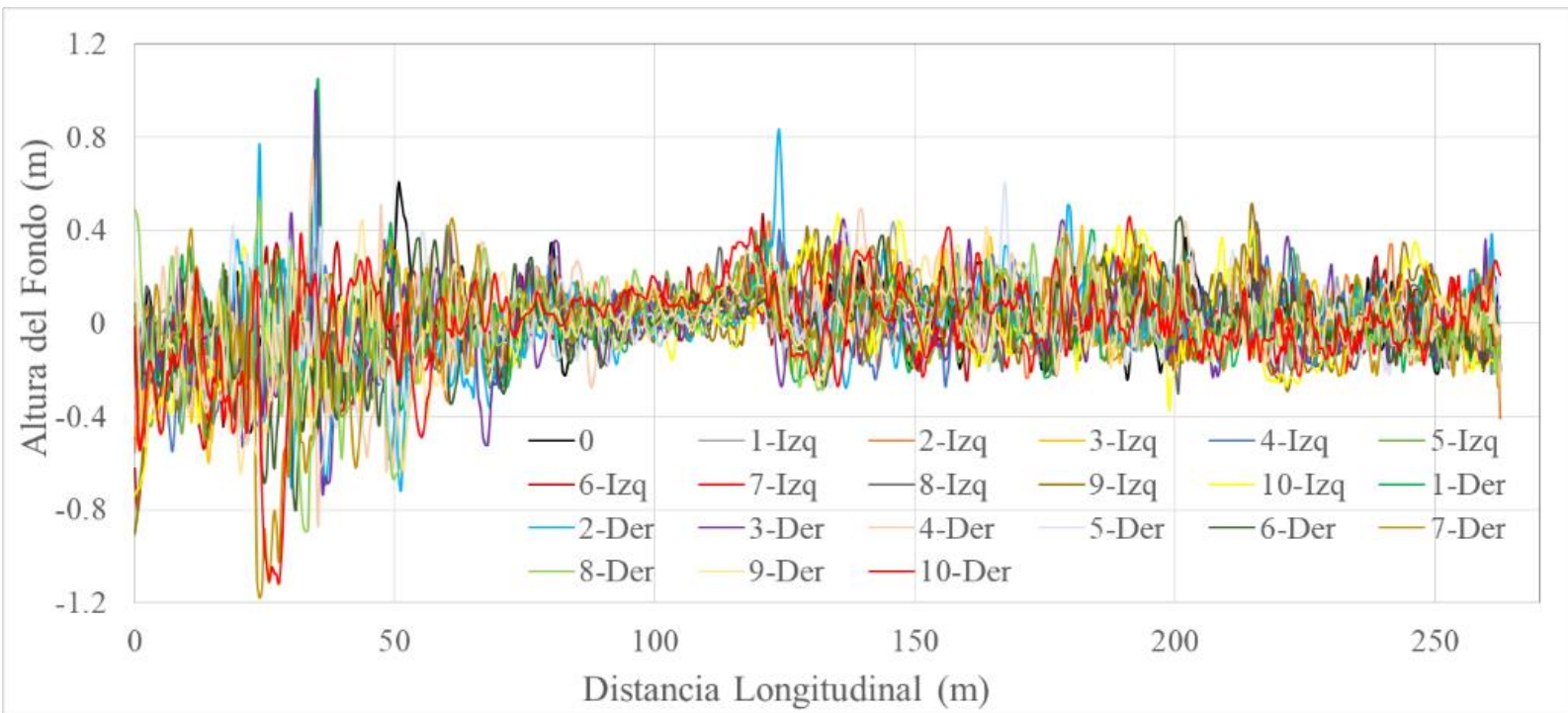
Se han procesado 21 señales unidimensionales de morfología fluvial simuladas en el tramo del río Tercero para el evento de  $113.85 \text{ m}^3/\text{s}$ , correspondiente al paso temporal de 20 000 segundos y separadas uniformemente a una distancia aproximada de un metro, como se presenta en la Figura 10.



**Figura 10.** Esquema de las señales unidimensionales de formas de fondo analizadas.

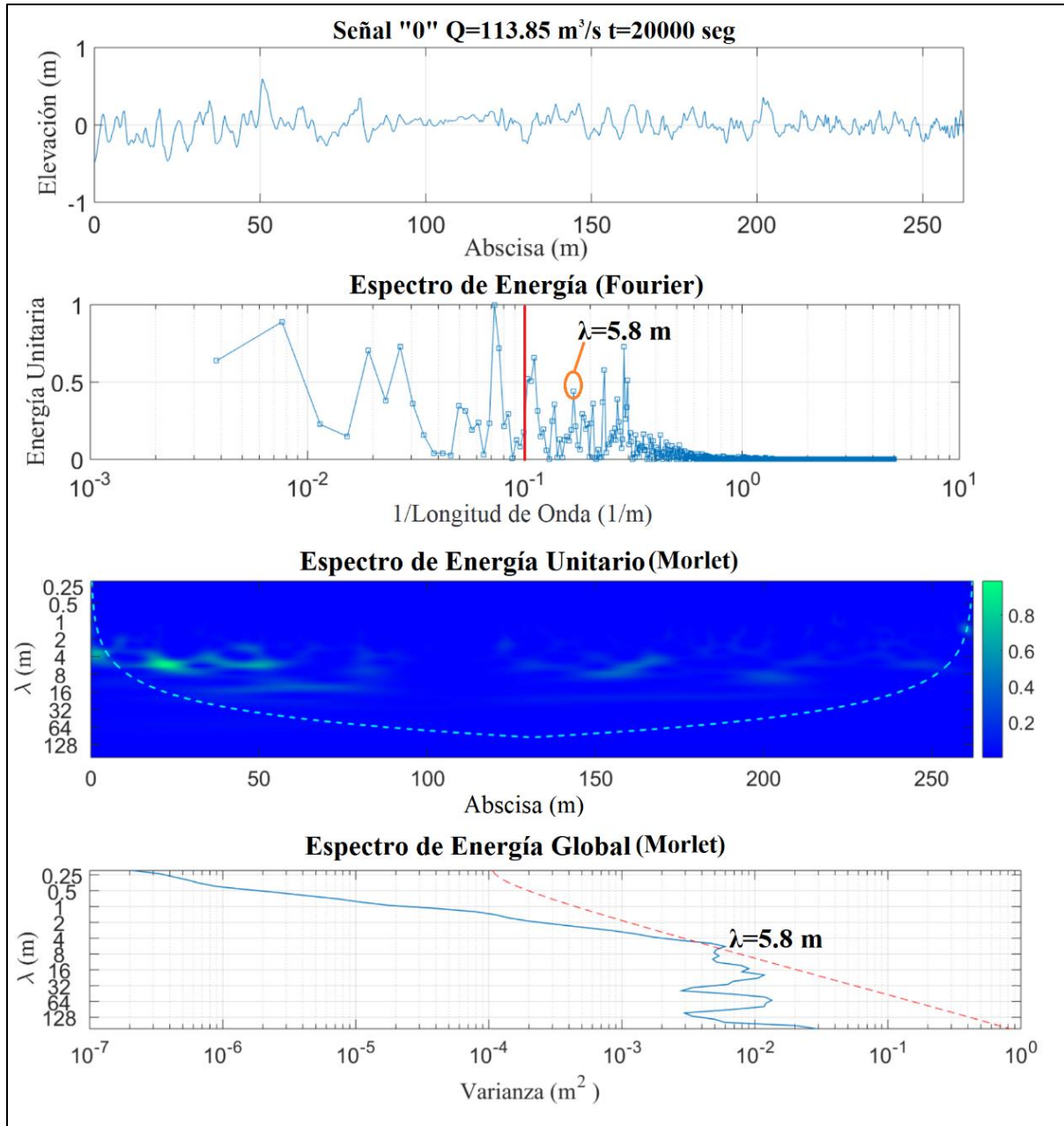
Se puede observar en la Figura 10 que las señales longitudinales de morfología fluvial han sido extraídas en dirección de las líneas de flujo en el tramo del río Tercero simulado. En la Figura 11 se presentan las 21 señales unidimensionales de morfología fluvial simuladas y proyectadas con pendiente nula y media cero para el evento de  $113.85 \text{ m}^3/\text{s}$ .





**Figura 11.** Señales unidimensionales de formas de fondo simuladas en SSIIM,  $Q=113.85 \text{ m}^3/\text{s}$ .

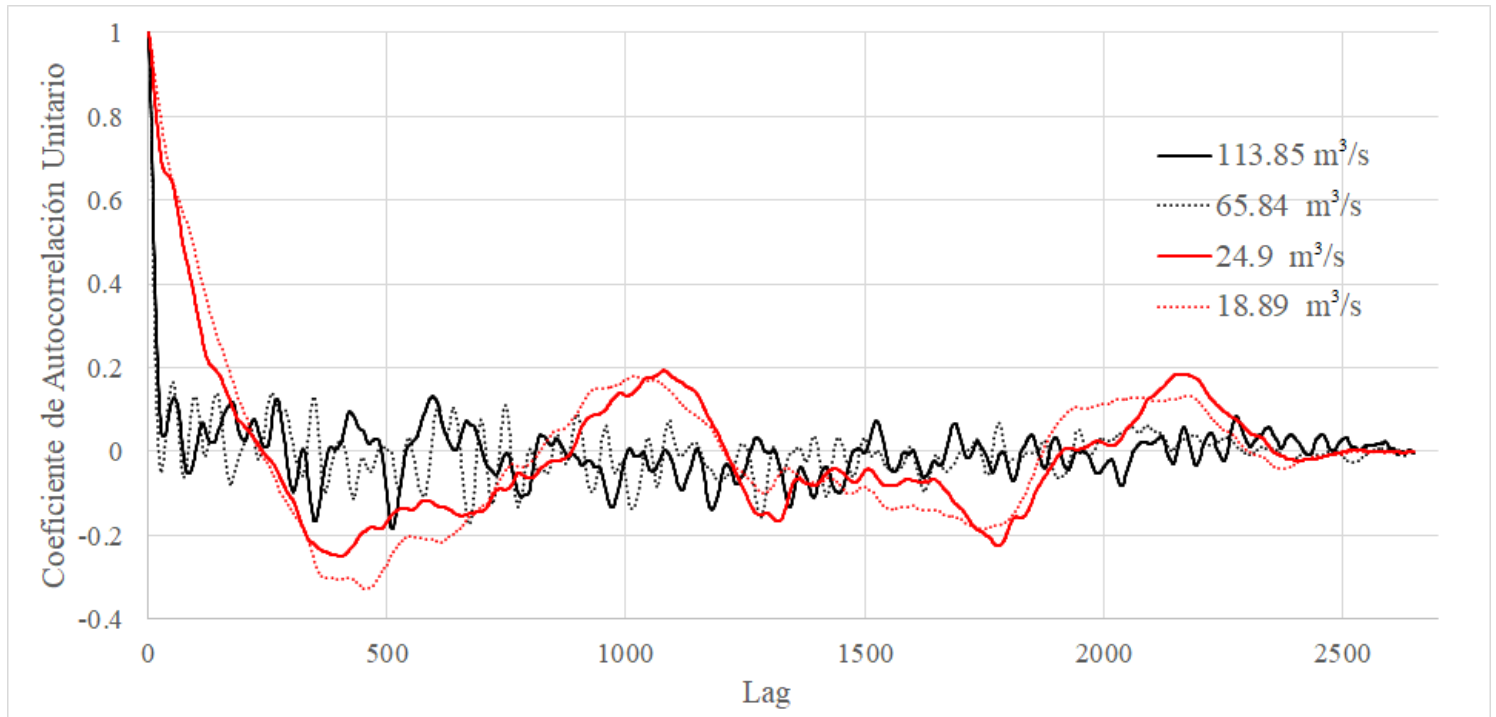
De la Figura 11 se desprende que las 21 señales analizadas tendrían un orden de magnitud similar respecto a su comportamiento y dimensiones geométricas. En la Figura 12 se presenta el análisis de frecuencias con la transformada discreta de Fourier y con curvas wavelets tipo Morlet realizado sobre la señal "0" de la morfología fluvial (ver Figura 10).



**Figura 12.** Análisis de frecuencias con la transformada de Fourier y curvas wavelets tipo Morlet, señal "0"  $Q = 113.85 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Como se puede observar en la Figura 12, con el espectro de energía dado por la transformada discreta de Fourier se dificulta observar con claridad las frecuencias dominantes atribuidas a las formas de fondo tipo dunas; esto se debe a la fuga de energía presentada por las dimensiones de baja frecuencia atribuidas a curvaturas longitudinales del río Tercero que no se consideran en el espectro de formas de fondo (a la izquierda de la línea roja sólida) y a la alta variabilidad de frecuencias de las formas de fondo tipo dunas que presentan diferentes dimensiones a lo largo de la señal. Sin embargo, normalizando sobre la varianza el espectro de energía global obtenido con la transformación wavelet con la curva tipo Morlet en cada longitud característica de la señal, se puede obtener el espectro de energía global, donde la línea punteada color rojo representa el intervalo de confianza correspondiente al 80 % de la función wavelet considerada y la longitud dominante se obtiene en el máximo valor sobre el intervalo de confianza considerado.

Se debe analizar si el incremento de la variabilidad de las formas de fondo con respecto al tiempo de simulación se debe a los procesos físicos simulados y no a un ruido ocasionado por errores numéricos, por lo que se plantea un análisis mediante autocorrelación de las señales de formas de fondo correspondientes a los eventos de 113.85, 65.84, 24.90 y 18.89 m<sup>3</sup>/s para el tiempo final de simulación correspondiente a 20 000 segundos (Figura 13).

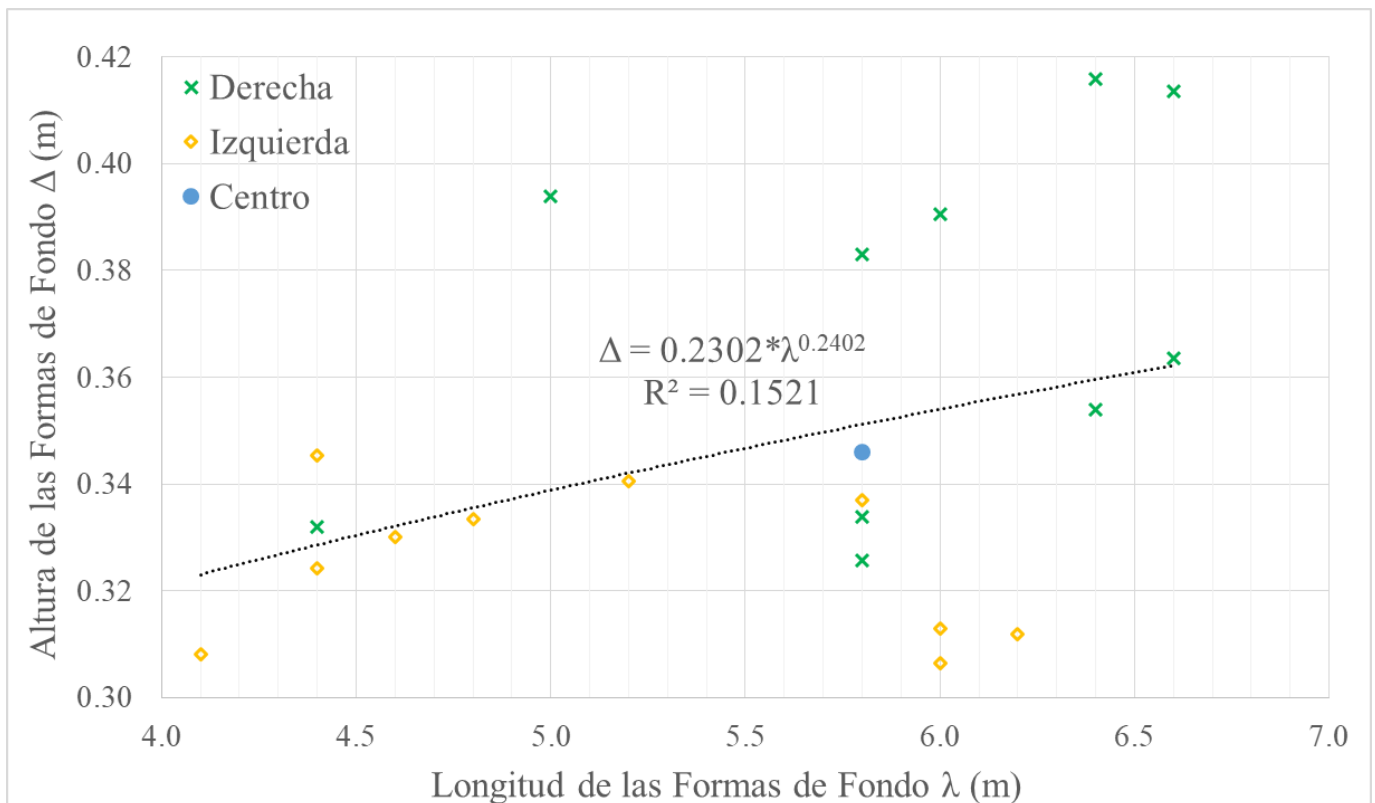


**Figura 13.** Autocorrelación de perfiles de morfología fluvial simuladas en el río Tercero.

La forma de la distribución del coeficiente de autocorrelación unitario de las señales simuladas de morfología fluvial presentado en la Figura 13 es similar al que se puede obtener en una señal sinodal con procesos aleatorios. La geometría de las formas de fondo encontradas en el flujo del río Tercero aguas abajo del puente Juan Bautista Alberdi corresponde a ondas tipo dunas, que de acuerdo con los procesos estocásticos propios de la turbulencia del flujo darían una distribución de

las formas de fondo similar a la de ondas sinodales con procesos aleatorios.

En la Figura 14 se presentan los resultados de las dimensiones dominantes obtenidas con el análisis de frecuencias de las 21 señales consideradas.



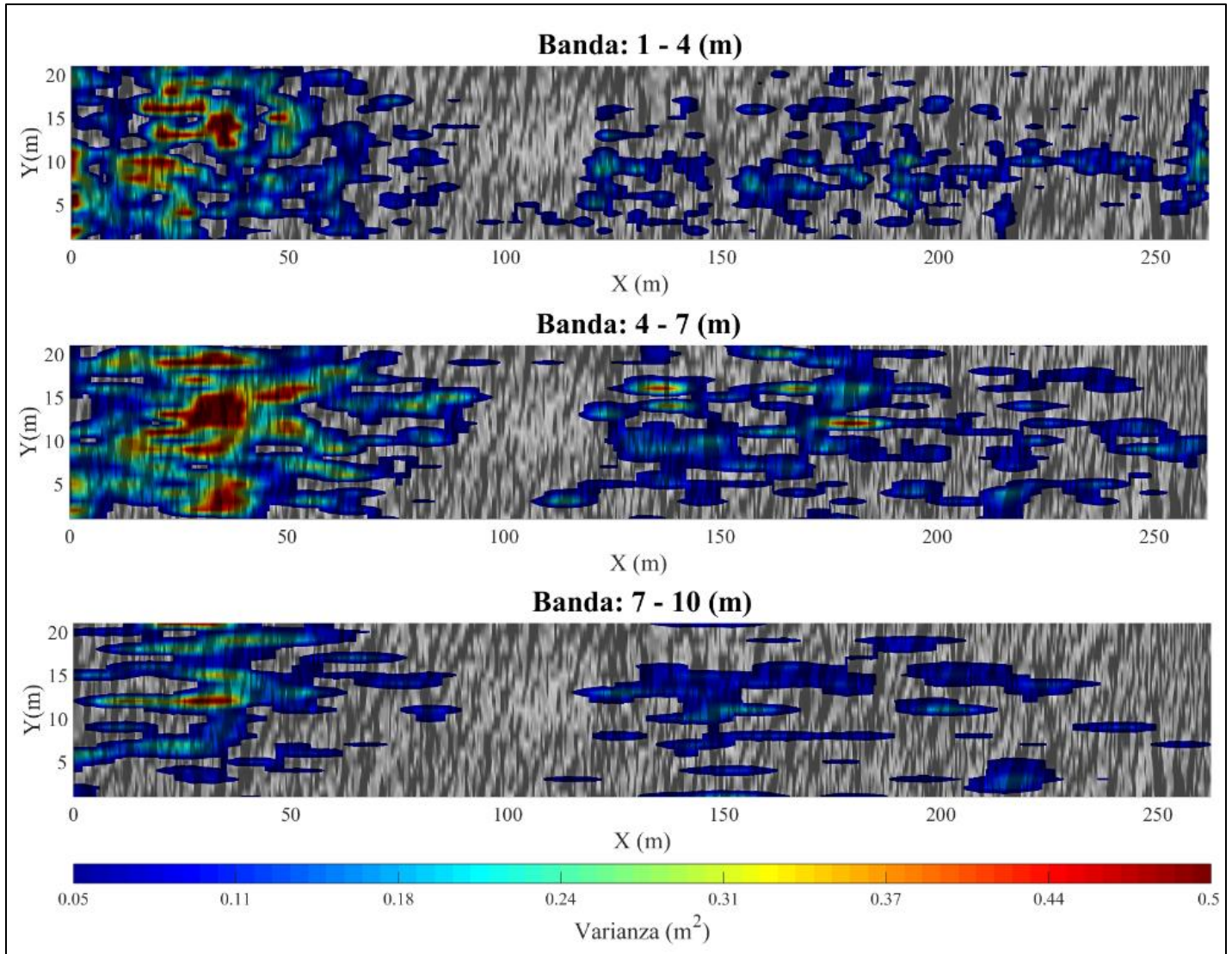
**Figura 14.** Resultados de las dimensiones dominantes obtenidas con el análisis de frecuencias de las señales simuladas,  $Q = 113.85 \text{ m}^3/\text{s}$ .

La Figura 14 muestra que las formas de fondo con mayor magnitud se forman en el lado derecho, lo que es consistente con la pequeña curvatura del tramo analizado (ver Figura 10). También en la Figura 14 se puede observar que las variables geométricas de las formas de fondo tipo dunas, a pesar de tener el mismo orden de magnitud, tienen una dispersión importante con un coeficiente de correlación cuadrático  $R^2$  menor a 0.2, lo que representa una alta variabilidad espacial de las formas de fondo en el tramo analizado.

El promedio de la altura  $\Delta$  de las formas de fondo en el tramo del río Tercero para el evento de 113.85 m<sup>3</sup>/s es de 35 centímetros, y se observa una banda de periodos o longitudes dominantes de entre 4 a 7 metros, aproximadamente.

Se ha planteado como una cuestión interesante analizar la distribución bidimensional de las frecuencias dominantes de la geometría de las formas de fondo simuladas con base en los resultados obtenidos con la función wavelet tipo Morlet. En la Figura 15 se presentan los diagramas de Hovmöller para las bandas de longitud de onda de entre 1 a 10 metros.





**Figura 15.** Diagramas de Hovmöller de formas de fondo de las señales simuladas,  $Q = 113.85 \text{ m}^3/\text{s}$ .

De la Figura 15 se puede inferir que la mayor variabilidad en las dimensiones de las formas de fondo ocurre antes de los 80 metros de longitud; ésta sería la parte en que los procesos tridimensionales serían relevantes respecto a todo el tramo de 270 metros simulados.

También analizando la Figura 15 se puede observar que alrededor de la abscisa de 100 metros se observa que los resultados de las dimensiones de formas de fondo simuladas son de menor magnitud, comparables con formas de fondo tipo rizos y de magnitud diferente a las formas de fondo tipo dunas que se presentan simuladas en los otros tramos. A partir de la abscisa 120, las dimensiones de formas de fondo simuladas tendrían una longitud de onda dominante de entre 4 y 7 metros, que pertenece al orden de las formas de fondo tipo dunas simuladas en los primeros 80 metros, pero con menor variabilidad.

## Conclusiones

Se aplicaron metodologías numéricas y experimentales para el análisis de la estimación del transporte de sedimentos y predicción de la morfología fluvial en cauces naturales de aguas poco profundas ubicados en áreas de



planicie, como lo es el río Tercero en su paso por la ciudad de Villa María, en la provincia de Córdoba, Argentina.

Con base en el análisis de frecuencias dominantes de las señales de morfología fluvial simuladas en el flujo del río Tercero, aplicando la transformada discreta de Fourier y las funciones wavelets tipo Morlet, se obtuvieron alturas promedio de las formas de fondo tipo dunas del orden de 35 cm, así como bandas de longitud de onda dominantes de 4 a 7 metros.

Se observó que las formas de fondo con mayor magnitud se han desarrollado en el lado derecho del cauce, cuestión que es consistente con la curvatura longitudinal que se presenta en el tramo analizado.

Mediante un análisis bidimensional con diagramas de Hovmöller se identificó un alto nivel de variabilidad en la distribución espacial de la geometría de las formas de fondo, y se comprobó que los procesos con mayor variabilidad ocurrirán sobre todo en los primeros 80 metros del tramo analizado.

Se recomienda que las técnicas de medición en cauces de aguas poco profundas también tomen en cuenta la variabilidad de los procesos que podrían ocurrir cerca del fondo, en especial cuando se tiene como objetivo caracterizar variables de flujo vinculadas con el transporte de sedimentos y la evolución de la morfología en un cauce natural (p. ej., socavación o deposición sobre estructuras).

## Agradecimientos

Se agradece el financiamiento dado por la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional de Córdoba (SECyT) y la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación de la República de Ecuador (SENESCYT) para llevar a cabo esta investigación. Se agradece al grupo de investigación del Centro de Tecnologías del Agua (CETA) por todo el apoyo brindado.

## Referencias

- Bendat, J. S., & Piersol, A. G. (2010). *Random Data: Analysis and Measurement Procedures* (4<sup>th</sup> ed.). Hoboken, USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Catano-Lopera, Y., Abad, J. D., & Garcia, M. H. (2009). Characterization of bedform morphology generated under combined flows and currents using wavelet analysis. *Ocean Engineering*, 36, 617-632.
- Coleman, S. E., & Melville, B. W. (1994). Bed-form development. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 120(4), 544-560.
- Edwards, T. K., & Glysson, D. G. (1999). Applications of Hydraulics. Field Methods for Measurement of Fluvial Sediment, Book 3, Chapter C2. In: *Techniques of water-resources investigations of the U.S. Geological Survey* (pp. 89). Virginia, USA: U.S. Geological Survey.

- Einstein, H. A. (1950). *The bedload function for bedload transportation in open channel flows*. USA: USDA Soil Conservation Service.
- Engelund, F., & Fredsøe, J. (1976). A sediment transport model for straight alluvial channels. *Nordic Hydrology*, 7, 293-306.
- García, M. H. (2008). *Sediment transport and morphodynamics. Manuals and Reports on Engineering Practice, chapter 2 (No. 110)*. Reston, USA: American Society of Civil Engineers (ASCE).
- García, M. H., & Niño, Y. (2003). *Flow and transport equations in surface waters. Annotations of CEE 498 Environmental Hydrodynamics. Spring Sem.* Champaign, USA: University of Illinois Urbana-Champaign.
- Gutierrez, R. R., Abad, J. D., Parsons, D. R., & Best, J. L. (2013). Discrimination of bed form scales using robust spline filters and wavelet transforms: methods and application to synthetic signals and bed forms of the Paraná river, Argentina. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 118(3), 1400-1418.
- Gutierrez, R. R., Mallma, J. A., Nuñez-Gonzalez, F., Link, O., & Abad, J. D. (2018). Bedforms-ATM, an open-source software to analyze the scale-based hierarchies and dimensionality of natural bed forms. *SoftwareX*, 7, 184-189, Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.softx.2018.06.001>

- Guy, H. P., Simons, D. B., & Richardson, E. V. (1966). *Summary of alluvial channel data from flume experiments* (Professional Paper 462-I). Washington, DC, USA: U.S. Geological Survey.
- Heredia, A. I. (2017). *Caracterización del transporte de sedimentos en un tramo del río Tercero (Ctalamochita) utilizando tecnología acústica Doppler* (tesis de maestría). Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Meyer-Peter, E., & Müller, R. (1948). *Formulas for bedload transport*. 2<sup>nd</sup> IAHR World Congress, Stockholm, Sweden.
- Olsen, N. R. B. (2012). *Numerical modelling and hydraulics*. Trondheim, Norway: Department of Hydraulic and Environmental Engineering, Norwegian University of Science and Technology.
- Olsen, N. R. B. (2014). *A three-dimensional numerical model for simulation of sediment movements in water intakes with multiblock option. User's manual*. Trondheim, Norway: Department of Hydraulic and Environmental Engineering, Norwegian University of Science and Technology.
- Singh, A., Lanzoni, S., Wilcock, P. R., & Foufoula-Georgiou, E. (2011). Multiscale statistical characterization of migrating bed forms in gravel and sand bed rivers. *Water Resources Research*, 47, W12526.

- Smith, S. W. (1999). *The scientist and engineer's guide to digital signal processing* (2<sup>nd</sup> ed.). San Diego, USA: California Technical Publishing.
- Patankar, S. V. (1980). *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. Series in Computational and Physical Processes in Mechanics and Thermal Sciences. Washington, DC, USA: Hemisphere Publishing Corporation,
- Van Rijn, L. (1984). Sediment transport part I: Bed load transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(10), 1431-1456.
- Wong, M., & Parker, G. (2006). *Flume experiments with tracer stones under bedload transport. River, coastal, and estuarine morphodynamics*. London, UK: Taylor & Francis Group.