



## EVOLUCIÓN DEL ANCHO DE CAUCES EXPERIMENTALES ANTE LA VARIABILIDAD DEL CAUDAL Y LAS CARACTERÍSTICAS DEL SEDIMENTO

*Andrés Vargas-Luna*<sup>1,\*</sup>, *Alessandra Crosato*<sup>2</sup>, *Protogene Byishimo*<sup>3</sup> y  
*Wim Uijttewaal*<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Profesor Asociado, Pontificia Universidad Javeriana, Colombia, email: [avargasl@javeriana.edu.co](mailto:avargasl@javeriana.edu.co)

<sup>2</sup> Profesora Asociada, Unesco-IHE, Países Bajos, email: [a.crosato@un-ihe.org](mailto:a.crosato@un-ihe.org)

<sup>3</sup> M.Sc., Universidad Tecnológica de Delft, Países Bajos, email: [byishimo.protogene@gmail.com](mailto:byishimo.protogene@gmail.com)

<sup>4</sup> Profesor, Universidad Tecnológica de Delft, Países Bajos, email: [W.S.J.Uijttewaal@tudelft.nl](mailto:W.S.J.Uijttewaal@tudelft.nl)

### RESUMEN:

Mediciones de campo han demostrado que además de la magnitud, también la frecuencia y la duración de las variaciones de caudal pueden ser importantes en la formación de los cauces. Adicionalmente, la morfología de los ríos parece estar influenciada también tanto por el tamaño como por el grado de uniformidad de su sedimento. Sin embargo, muchos estudios morfológicos todavía describen el régimen de flujo con un valor único de caudal, frecuentemente correspondiente a la condición de banca llena, y por un sedimento uniforme, descrito por su tamaño medio. Este trabajo investiga los efectos de la variabilidad del caudal y de las características del sedimento en la formación del ancho del cauce, analizando la evolución de canales experimentales con diferentes sedimentos e hidrogramas de caudal. Los resultados muestran que la condición formativa del ancho del canal no corresponde al caudal de banca llena geométrico sino al caudal pico más frecuente.

### ABSTRACT:

Observations show that besides the magnitude, also the frequency and duration of streamflow oscillations might be important for the river channel formation. In addition, the river morphology appears influenced also by both size and degree of uniformity of the sediment. Nevertheless, many morphodynamic studies still represent the flow regime with a single value of the discharge, often corresponding to the bankfull condition, and the sediment with its median grain size. This work investigates the effects of streamflow variability and sediment characteristics on channel width formation, analysing the evolution of experimental streams with different sediments and discharge hydrographs. Results show that the formative condition of the channel width is not the geometric bankfull flow but a rather frequent peak flow.

Mayor Información

**PALABRAS CLAVE:** *Morfodinámica fluvial, evolución morfológica, caudal de banca llena.*

## INTRODUCCIÓN

El régimen de caudales al que están expuestos los cauces aluviales gobierna su formación a través de la erosión, transporte y deposición de sus sedimentos (Surian et al., 2009). Por lo tanto, cada magnitud de caudal contribuye de manera diferente en la evolución morfológica de los ríos (Lane et al, 1996). Adicionalmente, las características de los sedimentos del lecho, como su uniformidad y calibre, determinan la morfología de estos cauces. Sin embargo, muchos estudios de morfología fluvial en la actualidad todavía consideran cauces descritos por un caudal constante, regularmente el caudal de banca llena, y sedimentos uniformes, descritos por su tamaño medio.

El concepto del caudal formativo,  $Q_f$ , se basa en la suposición de que un solo caudal puede ser capaz de producir un cauce con la misma morfología (ancho, profundidad del flujo y pendiente, por ejemplo) que el régimen natural de caudales (Asahi et al, 2013). Los métodos más comunes incluyen la estimación de este caudal formativo,  $Q_f$ , como el caudal que tiene un cierto periodo de retorno,  $Q_{Tr}$ , como el caudal efectivo,  $Q_{eff}$ , o como el caudal de banca llena,  $Q_{bf}$ . Sin embargo, asumir el caudal de banca llena,  $Q_{bf}$ , como el caudal formativo,  $Q_f$ , es la suposición más frecuente en los estudios relacionados con la práctica de la hidráulica fluvial y la ingeniería de ríos.

Este trabajo analiza los efectos de la variabilidad del caudal y las características de los sedimentos en el proceso de formación del ancho del cauce, registrando la evolución de canales de laboratorio con diferentes sedimentos y expuestos a diferentes hidrogramas de caudal.

## MATERIALES Y MÉTODOS

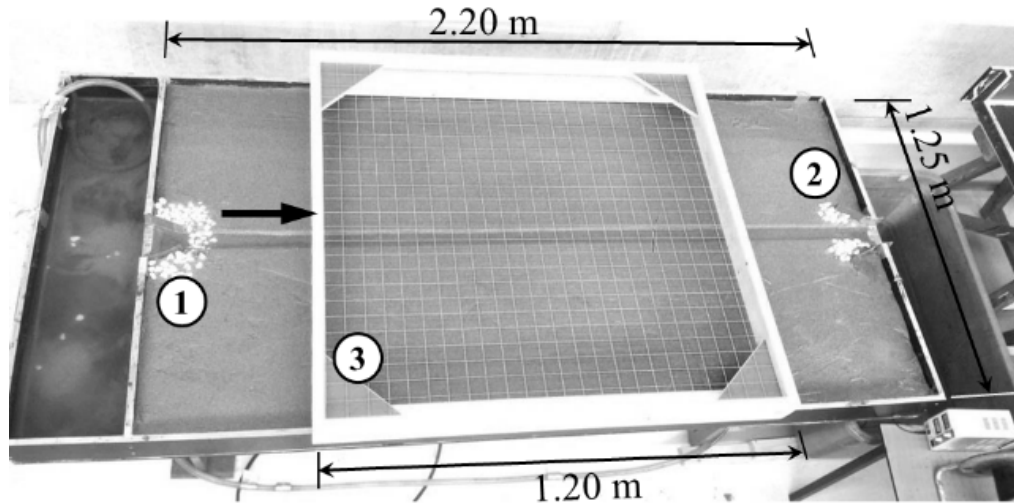
Los experimentos se realizaron en un pequeño canal de laboratorio (1.25 m de ancho x 2.2 m de largo) de lecho movable y sin alimentación de sedimento, construido en la Universidad Tecnológica de Delft (Byishimo, 2014; Vargas-Luna et al., 2018). El canal de laboratorio fue llenado con una capa de arena de 20 cm de espesor, en la cual se excavaba el canal rectangular inicial, de alineamiento recto (ver Figura 1).

La gradación de los sedimentos se presenta en este trabajo por medio del índice de gradación,  $I$ , descrito por la Ec. [1].

$$I = 0.5 \left( \frac{D_{84}}{D_{50}} + \frac{D_{50}}{D_{16}} \right) \quad [1]$$

Donde  $D_x$  es el diámetro del tamaño de sedimento excediendo el x% de cada muestra de sedimento.

Mayor Información



**Figura 1.-** Canal de laboratorio empleado en el estudio: (1) entrada, (2) salida, y (3) malla utilizada para visualización.

La Tabla 1 resume las características de los sedimentos empleados. Todos los ensayos, difiriendo únicamente en el tipo de arena utilizada, iniciaron con el mismo caudal constante,  $Q_f$ , de  $0.1 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ . Este caudal se aplicó en un canal de alineamiento recto, rectangular (3 cm de ancho y 2 cm de profundidad), con lecho móvil, bancas erosionables y una pendiente longitudinal del 1%. Este caudal inicial,  $Q_f$ , era aproximadamente el caudal de banca llena para este canal inicial.

**Tabla 1.-** Características de las muestras de sedimento

Muestra	$D_{50}$ [mm]	$I$ [-]
S1	0,26	1,26
S2	0,50	1,20
S3	0,40	1,84
S4	1,00	2,26

La primera parte de los experimentos permitió estimar los efectos de las características de los sedimentos en la formación del canal, dado que todos los experimentos tenían las mismas condiciones iniciales y de frontera. Cuando el canal alcanzaba su ancho de equilibrio,  $B_f$ , siendo éste el punto en el cual el canal paraba de erosionar sus bancas, el caudal se incrementaba al valor  $Q_{bf}$ , correspondiente al caudal de banca llena para la nueva sección transversal. Esto permitió observar de inmediato que el caudal formativo,  $Q_f$ , difiere del caudal de banca llena,  $Q_{bf}$ , ya que para cada muestra de sedimento se obtuvo un valor diferente de  $Q_{bf}$ .

Iniciando desde esta última condición de equilibrio, diferentes hidrogramas de caudal constante y variable fueron mantenidos durante 3.5 horas, duración que se identificó como suficiente para alcanzar una condición de equilibrio final,  $B_{eq}$ . Todos los hidrogramas considerados tuvieron como caudal medio  $Q_{bf}$  (nótese que  $Q_{bf}$  depende del tipo de sedimento). Esto permitió incluir hidrogramas con diferentes secuencias de caudal bajo y alto, difiriendo en intensidades y frecuencias, pero manteniendo el mismo caudal medio ( $Q_{bf}$ ).

Mayor Información

La Tabla 2 resume las características de los hidrogramas considerados en este estudio.

**Tabla 2.-** Características de los hidrogramas considerados

Hidrograma	$Q_{bajo}$	$\Delta t_{Qbajo}$ [minutos]	$Q_{pico}$	$\Delta t_{Qpico}$ [minutos]
H0	$Q_{bf}$	-	$Q_{bf}$	-
H1	$0,50 \cdot Q_{bf}$	10	$1,50 \cdot Q_{bf}$	10
H2	$0,50 \cdot Q_{bf}$	20	$1,50 \cdot Q_{bf}$	20
H3	$0,83 \cdot Q_{bf}$	30	$1,50 \cdot Q_{bf}$	10
H4	$0,80 \cdot Q_{bf}$	10	$1,20 \cdot Q_{bf}$	10
H5	$0,80 \cdot Q_{bf}$	20	$1,20 \cdot Q_{bf}$	20

Para reducir la influencia de las condiciones de frontera de aguas arriba y aguas abajo, el ancho del canal fue medido en tres secciones transversales localizadas en la zona media del canal (región de 1.2 m indicada en la Figura 1). La evolución temporal fue registrada por medio de una cámara de alta resolución colocada en la parte superior de la instalación. Utilizando la malla de elementos cuadrados de 5 cm de lado ubicada en la parte superior del canal y técnicas de análisis de imágenes se extrajo el ancho del canal. Los anchos de canal reportados en este trabajo corresponden al promedio de las tres mediciones realizadas. Debido a la escala del canal empleado en este estudio, la medición de la profundidad del flujo y la pendiente del canal fueron posibles únicamente al inicio del experimento.

## RESULTADOS

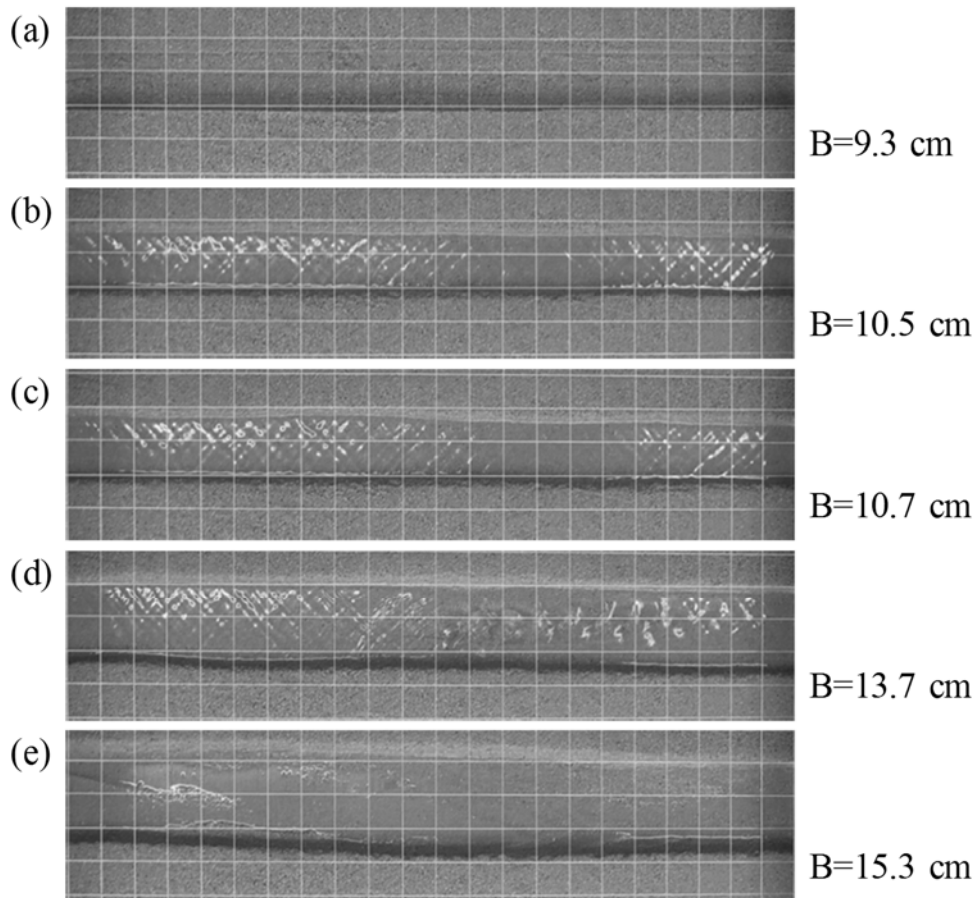
Al inicio de cada experimento se observó una alta tasa de transporte de sedimentos, que fue disminuyendo como respuesta del proceso de ensanchamiento del canal. En estos experimentos, el proceso de formación del canal fue gobernado por la erosión de las bancas, fenómeno que produjo altas tasas de aporte de sedimentos al sistema. Por este motivo, a pesar de no incluir alimentación o recirculación de sedimento, el sedimento proveniente del colapso de las bancas produjo la agradación del lecho y el ajuste de la pendiente del canal, evitando fenómenos de incisión.

En los canales considerados no se observaron formas de lecho durante los experimentos, sin embargo, para el material uniforme y fino, muestra S1, algunos agujeros de socavación fueron observados. El sedimento fue transportado principalmente como carga de lecho, alternando entre períodos de alta movilidad durante los caudales pico y cercanas al criterio de iniciación de movimiento durante los caudales bajos. Las características de estos experimentos, como la mayoría de los experimentos en pequeña escala, reflejan de manera cualitativa algunas dinámicas observadas en ríos con lecho de grava que tienen bancas y lecho conformados por materiales similares.

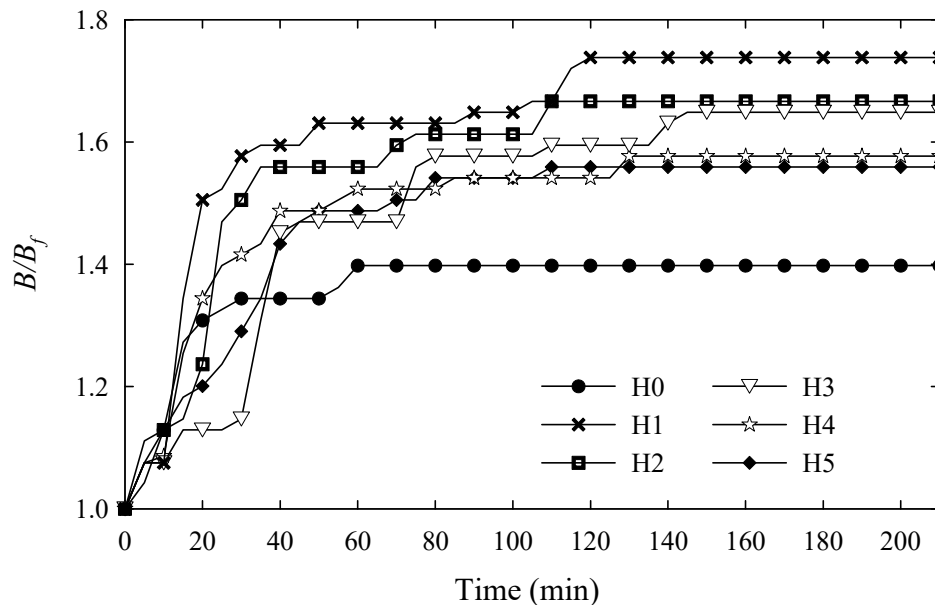
La Figura 2 presenta la evolución de la muestra de sedimento S4 ( $D_{50}=1$  mm) y el hidrograma H3 (Véase Tabla 2).

En la Figura 3 se presenta la evolución obtenida en la muestra de sedimento S4 con todos los hidrogramas considerados en el estudio.

Mayor Información



**Figura 2.-** Evolución del ancho del canal con sedimento S4 e hidrograma H3, para: a) T=0 min, b) T=15 min, c) T=30 min, d) T=60 min y e) T=150 min.



**Figura 3.-** Evolución adimensional del ancho del canal en función del tiempo para los hidrogramas considerados con la muestra de sedimento S4.

Mayor Información

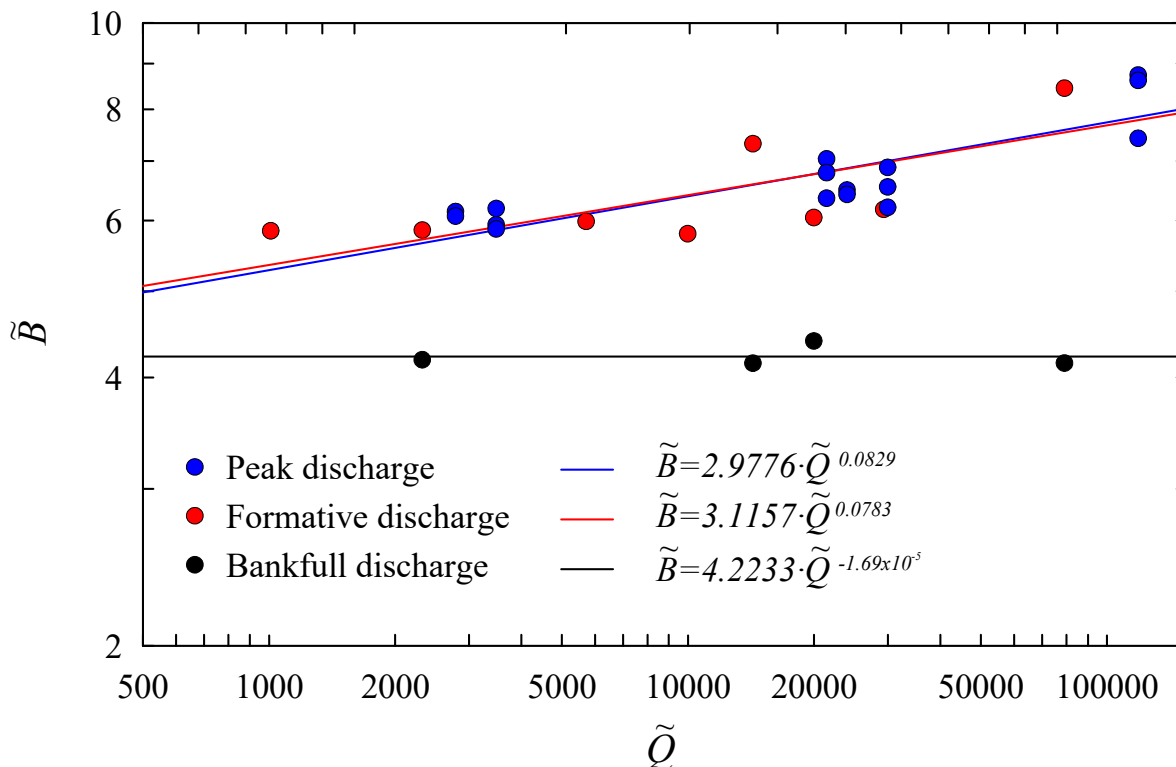
Los resultados de esta investigación experimental fueron presentados en la forma adoptada por Parker et al. (2007) con el fin de comparar lo observado en este estudio con el análisis de información de campo presentado por estos autores. Para este propósito definimos el ancho del canal adimensional como:

$$\tilde{B} = (g^{1/5} B) / Q^{2/5} \quad [2]$$

Asumiendo que el tamaño mediano del sedimento en la superficie del lecho de los canales es equivalente al tamaño medio de las muestras de sedimento empleadas en nuestros experimentos ( $D_{s50}=D_{50}$ ), el caudal adimensional se define como:

$$\tilde{Q} = Q / (\sqrt{gD_{50}} D_{50}^2) \quad [3]$$

La Figura 4 presenta los resultados obtenidos en esta investigación en la forma de caudal adimensional vs. ancho adimensional.



**Figura 4.-** Caudal adimensional vs ancho adimensional. Datos en color negro: ancho vs caudal de banca llena. Datos en color rojo: ancho vs caudal formativo. Datos en color azul: ancho de equilibrio vs caudal pico.



## CONCLUSIONES

Considerando que tanto el caudal como los sedimentos son factores de importancia en la formación de cauces naturales, en este trabajo se desarrolló una serie de experimentos de laboratorio para estudiar el efecto de la variabilidad del caudal y de las propiedades de los sedimentos en la evolución del ancho del canal. Los mayores anchos de canal se obtienen cuando se combinan arenas uniformes y secuencias relativamente frecuentes de caudales altos y bajos. El mínimo ensanchamiento se obtuvo con arenas bien gradadas y caudales constantes. Las frecuencias más altas de caudales pico produjeron los canales más anchos, pero en general se observó que la intensidad de los caudales pico es la característica que más influencia la formación del ancho del canal.

Los resultados de nuestros experimentos también muestran que el caudal de banca llena es mucho más grande que el caudal formativo y, por lo tanto, produce anchos de canal mayores que los observados. Considerando la similitud de los resultados presentados en este trabajo con datos de campo, puede establecerse que, en ríos de un solo curso con lecho de grava y expuestos a un régimen de caudales variable, el caudal formativo está mejor representado por el caudal pico de mayor frecuencia, en lugar del caudal de banca llena, como se considera actualmente. Estos hallazgos permiten evidenciar la importancia de diferenciar el caudal formativo del caudal de banca llena, ampliamente utilizado en la práctica para realizar estudios morfológicos.

## REFERENCIAS

- Asahi, K., Y. Shimizu, J. Nelson, and G. Parker** (2013), “Numerical simulation of river meandering with self-evolving banks”, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 118, pp. 1-22.
- Byishimo, P.** (1997). Effects of variable discharge on width formation and cross-sectional shape of sinuous rivers. Master Thesis, UNESCO-IHE, Institute for Water Education, Delft, The Netherlands.
- Vargas-Luna, A., A. Crosato, P. Byishimo, and W. S. J. Uijtewaal** (2018). “Impact of flow variability and sediment characteristics on channel width evolution in laboratory streams”. *Journal of Hydraulic Research*, In press.
- Lane, S.N., K.S. Richards and J.H. Chandler** (1996). “Discharge and sediment supply controls on erosion and deposition in a dynamic alluvial channel”. *Geomorphology*, Vol. 15, No. 1, pp. 1-15.
- Parker, G., P.R. Wilcock, C. Paola, W.E. Dietrich and J. Pitlick** (2007). “Physical basis for quasi-universal relations describing bankfull hydraulic geometry of single-thread gravel bed rivers”. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, Vol. 112, No. F4.
- Surian, N., L. Mao, M. Giacomini, and L. Ziliani** (2009). “Morphological effects of different channel forming discharges in a gravel-bed river”. *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 34, No. 8, pp. 1093–1107.

Mayor Información