

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXI CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**MODELO NUMÉRICO DE SIMULACIÓN Y RASTREO DE LA EVOLUCIÓN TEMPORAL
DE SISTEMAS FLUVIALES: ANÁLISIS DE LA MORFOLOGÍA, TRANSPORTE DE
SEDIMENTOS Y ESTRATIGRAFÍA DEL LECHO.**

CRISTIÁN GODOY B.¹
AARÓN ARIAS A.²
YARKO NIÑO C.³

RESUMEN

Se desarrolla un modelo numérico para la realización de simulaciones de sistemas fluviales, con foco en el análisis de la evolución morfológica y de la estratigrafía del lecho del sistema. El modelo permite modelar un sistema fluvial bajo condiciones de borde impuestas, para el caudal y la tasa de sedimentos proveniente desde aguas arriba. El modelo permite realizar una simulación de alta resolución temporal, con lo que es posible la detección de pequeños cambios locales en la estructura del lecho y que afectan de forma particular la dinámica futura del sistema. Debido a la alta resolución temporal del modelo, la resolución del balance de masa local de sedimentos no puede ser resuelta por medio de metodologías tradicionales basadas en el análisis de fluctuaciones medias del sistema. Por ello, una nueva metodología es propuesta para el tratamiento de los flujos de intercambio de material entre las capas del lecho y la de flujo. El modelo numérico desarrollado es comparado contra un resultado experimental de laboratorio, el cual se extendió por 36 horas. Del experimento se obtuvieron mediciones del transporte de sedimentos y se caracterizó tanto las curvas granulométricas transportadas como la del lecho. La comparación de los resultados del modelo y del experimento, mostró que el modelo numérico realiza una buena representación de la evolución del sistema. Adicionalmente, se presentan casos de forzamientos más extremos del mismo sistema, en cuanto al caudal y gasto sólido proveniente desde aguas arriba, y para los cuales se realiza la caracterización de la evolución del sistema.

¹Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile – mail: cgodoy@ing.uchile.cl

²Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile – mail: aarias@ug.uchile.cl

³Departamento de Ingeniería Civil, Advanced Mining Technology Center, Universidad de Chile – mail: ynino@ing.uchile.cl

1. INTRODUCCIÓN

El estudio de sistemas fluviales ha evolucionado rápidamente, teniéndose en el inicio del estudio de estos sistemas, muchos trabajos que concentraron sus esfuerzos en mejorar la representación de los mecanismos de transporte de distintas mezclas de material sedimentario. Entre ellos destacan los estudios enfocados en la generación de formulaciones para la estimación de las tasas de transporte según las características del material del lecho y de la hidráulica, dentro de los cuales se encuentran los trabajos de Meyer-Peter y Müller (1948), Brownlie (1981), Ackers y White (1973), Parker (1990), Wu-Wang y Jia (2000) y Wilcock y Crowe (2003). Así, una vez que los procesos de transporte fueron caracterizados de buena forma, el interés migró al estudio y comprensión de los procesos de gran escala que se desarrollan en los sistemas fluviales, y que corresponden a una consecuencia del proceso del flujo de las aguas, del transporte de sedimentos asociado, y a la modificación/evolución del lecho como consecuencia de esta última. Con ello, muchos autores han buscado comprender y simular la respuesta de un sistema natural ante forzamientos externos, como lo son los pulsos de sedimentos y agua, o de cuáles son los efectos sobre el lecho de una crecida de características conocidas. Entre estos autores destacan trabajos como los de Parker et al. (2003), Wong and Parker (2006), Madej et al. (2009), Viparelli et al. (2010a) y Pryor et al. (2011), los que fueron desarrollados como experimentos de laboratorio, y otros como los de Spasojevic y Holly (1990), Cui et al. (1996), Jia y Wang (1999) y Viparelli et al. (2010b), que fueron desarrollados en base a simulación numérica de los sistemas. Con ellos, se ha mostrado que las herramientas computacionales son una buena herramienta en el estudio de sistemas fluviales reales, permitiendo realizar caracterizaciones más acabadas de los distintos procesos desarrollados al interior de sistemas fluviales.

El objetivo de este estudio es el desarrollo de un modelo numérico para el estudio de sistemas fluviales, el cual incorpore y acople la resolución de la hidráulica, la estimación del transporte de sedimentos, la estimación de la evolución morfológica y el rastreo de la evolución de la estratigrafía del sistema, en base a un modelo eficiente y de alta resolución temporal. Por ello, el desempeño del modelo es caracterizado mediante la comparación de los resultados obtenidos contra los de un experimento desarrollado en el laboratorio del Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de Chile. El experimento cuenta con lecho móvil y un sistema de alimentación de sedimentos continuo, sin realizar una recirculación del material expulsado del canal.

2. MODELO NUMÉRICO

El modelo numérico utiliza como base para la resolución del flujo, el modelo numérico Mossem desarrollado por González (2006). Un trabajo previo sobre el modelo Mossem fue el desarrollado por Abarca (2008), quién incorporó el concepto de capa activa de Hirano (1971). Los nuevos módulos creados en este estudio permiten resolver la interacción entre las distintas capas del lecho y los flujos entre ellas, realizando un primer análisis general de la distribución granulométrica de cada capa el lecho, y un segundo análisis por cada una de las distintas fracciones existentes, respetando tanto la disponibilidad de material de cada fracción como la dirección del flujo de material.

2.1 RESOLUCIÓN DEL FLUJO

La resolución del flujo es realizada en base al trabajo de González (2006), donde se resuelven las ecuaciones 1D de Saint-Venant bajo el supuesto de aguas poco profundas, utilizando la ecuación de Manning para la ley friccional de paredes y fondo, y en base a la utilización del esquema numérico

propuesto por Ying (2004) para la resolución de las ecuaciones. Debido a que el esquema de resolución requiere de la entrega de las condiciones iniciales de flujo en el canal, el modelo numérico contempla un tiempo de acondicionamiento del flujo, durante el cual el flujo estimado se independice de las condiciones iniciales dadas. Este intervalo de tiempo es fijado por el usuario y en el presente trabajo se utilizó un tiempo de 10 minutos de acondicionamiento. Durante este período de tiempo, tanto la estimación del transporte de sedimentos como el aporte de sedimentos en la cabecera son desconectados.

2.2 LEY FRICCIONAL Y COEFICIENTE DE MANNING PARA FLUJOS MACRORUGOSOS

Dadas las características del canal experimental utilizado en este estudio y de las características del flujo generado, son agregadas al modelo numérico varias ecuaciones para la determinación del coeficiente de Manning en flujos macrorugosos. La ecuación incorporada es la de Parker y Peterson (1980), la cual está basada en los trabajos previos de Keulegan (1938), Limerinos (1970) y Kamphuis (1974), y está dada por:

$$n_{Manning} = \left(R_h^{-1/6} \right) / \left[2.46 \sqrt{g} \ln \left(5.5 R_h / D_{90} \right) \right] \quad (1)$$

donde R_h es el radio hidráulico, g es la aceleración de gravedad y D_{90} es el diámetro característico de la capa activa para el cual el 90% del material es inferior a él. Esta fórmula es aplicada en el modelo cuando se cumple que la altura del flujo es inferior a 10 veces el diámetro D_{90} ($h_f / D_{90} < 10$).

2.3 ESTIMACIÓN DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTO

Las tasas de transporte de sedimentos son estimadas utilizando la formulación de Wilcock y Crowe (2003), en su forma presentada en García (2008), y la cual es funcional para los casos de mezcla de sedimentos no homogéneos. Además de esta formulación, el modelo incorpora las formulaciones de Ackers y White (1973), Ashida y Michiue (1971), Wu, Wang y Jia (2000) y Parker (1990). Junto con lo anterior, dado que las ecuaciones para estimar el transporte de sedimentos utilizan como base las características locales de la curva granulométrica del lecho junto con las características del flujo, sin tomar en cuenta la disponibilidad o existencia del material en la capa expuesta del lecho, y que es el material que puede interactuar con el flujo, se impone una restricción a la máxima cantidad de material posible de ser extraído desde el lecho. Esta restricción está dada por:

$$Gs^i_{j\max} = Gs^i_{j-1} + F^i_j \left[\Delta x L_a \left(1 - \lambda_p \right) \right] / \Delta t \quad (2)$$

donde $Gs^i_{j\max}$ es la máxima tasa de transporte de sedimento por unidad de ancho para la fracción j y que está contenida en el nodo i , Gs^{i-1}_j es la tasa de transporte de sedimento por unidad de ancho para la fracción j y que viene desde el nodo $(i-1)$, F^i_j es el porcentaje de la fracción j que está contenida en la capa activa del nodo i , λ_p es la porosidad del lecho, y Δt es el intervalo de tiempo en el cual se está evaluando la disponibilidad de la fracción, que está dada por $\Delta x L_a$.

2.4 CONSERVACIÓN DE MASA DEL SEDIMENTO Y RESOLUCIÓN DE LA ESTRATIGRAFÍA

En base al concepto de capa activa de Hirano (1971), se utiliza un modelo de 3 capas verticales (Fig.1), compuesto por: sub-capa de transporte de fondo, capa activa y sustrato. La capa activa cuenta con un espesor L_a , y es la capa que interactúa directamente con el transporte de fondo. El sedimento contenido en cada capa es caracterizado por fracciones, donde cada cual cuenta con un diámetro medio representativo y un porcentaje de existencia en la capa. Así, la suma de todas las fracciones por cada capa será igual a 1.

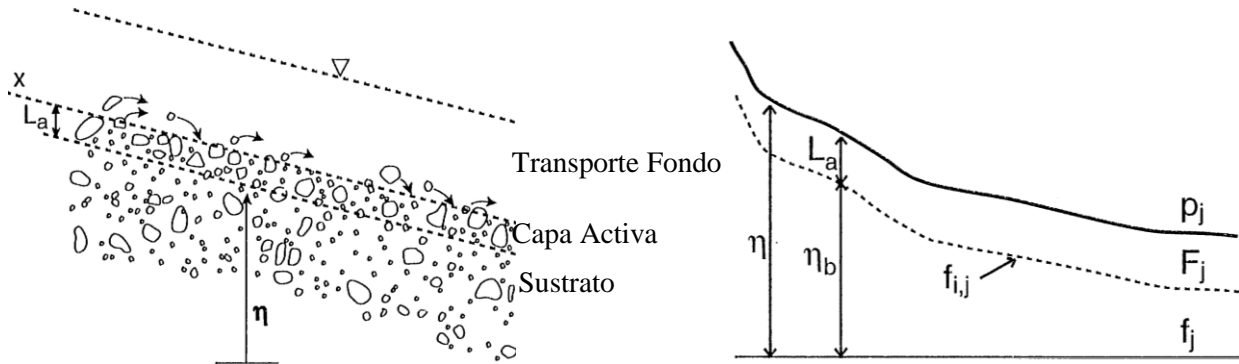


Figura 1. (Izq.) Diagrama del concepto de capa activa (modelo de 3 capas). (Der.) Definición de variables del modelo de 3 capas.

La resolución de la dinámica del sedimento y del balance de masa local, se incorpora mediante la ecuación de Exner, utilizada en su forma propuesta por Parker (1991), y que fue utilizada en el estudio de Viparelli et al. (2010b):

$$\left(1 - \lambda_p\right) \left[f_{i,j} \frac{\partial}{\partial t} (\eta_{\text{intsubs}}) + \frac{\partial (F_j L_a)}{\partial t} \right] = - \frac{\partial (q_s p_j)}{\partial x} \quad (3)$$

donde η_{intsubs} es la elevación local de la interfaz entre la capa activa y el sustrato, denominada “interfaz de sustrato”; L_a es el espesor de la capa activa; f_j es el porcentaje contenido de la fracción j en el sustrato; F_j es el porcentaje contenido de la fracción j en la capa activa; p_j es el porcentaje contenido de la fracción j en la sub-capas de transporte de fondo, y q_s es la tasa volumétrica total de sedimento por unidad de ancho. El espesor de la capa activa es definido como $L_a = n_a D_{90}$, en donde n_a es un parámetro arbitrario (típicamente $n_a = 1$ ó 2). El término $f_{i,j}$ corresponde al porcentaje contenido de la fracción j en los flujos de material entre la capa activa y el sustrato. Este último término ha sido definido por otros autores, como por ejemplo el trabajo de Toro-Escobar (1996), y en base al proceso global de agradación o degradación, sin distinguir entre las diferentes fracciones. Con ello, ese tipo de definición fuerza la creación de flujos de sedimentos no realistas y que no respetan la disponibilidad de las fracciones en las diferentes capas. Es por ello que el presente estudio plantea un esquema iterativo para la resolución de la ecuación de Exner, estimando de forma conjunta los cambios locales de la capa activa y los flujos de sedimento a través de la interface del sustrato. El esquema inicialmente resuelve de forma preliminar la interacción entre la subcapa de transporte de fondo y la

capa activa, para luego evaluar la interacción correspondiente entre la capa activa y las capas del sustrato. Considerando la ecuación de Exner, y reordenando los términos se tiene:

$$f_{i,j} \left[\Delta \left(\eta_{\text{int subs}} \right) / \Delta t \right] + \left(F_j^{t+\Delta t} L_a^{t+\Delta t} - F_j^t L_a^t \right) / \Delta t = -\Delta \left(q_s p_j \right) \left[\Delta x \left(1 - \lambda_p \right) \right]^{-1} \quad (4)$$

En la primera aproximación al resultado, se deja de lado la interacción de las capas del lecho, y se estima un espesor temporal de la capa activa $\hat{L}_a^{t+\Delta t} = (L_a^t + \Delta \eta)$, teniendo para la distribución granulométrica temporal del lecho la Ec.5.

$$\hat{F}_j^{t+\Delta t} = F_j^t \left(L_a / \hat{L}_a^{t+\Delta t} \right) - \left[\Delta_x \left(q_s p_j \right) \Delta t \right] \left[\Delta x \left(1 - \lambda_p \right) \hat{L}_a^{t+\Delta t} \right]^{-1} \quad (5)$$

Esta distribución tiene asociado un diámetro característico temporal igual a $\hat{D}_{90}^{t+\Delta t}$. Así, el espesor temporal de la capa activa, $\hat{L}_a^{t+\Delta t}$, diferirá del valor obtenido por medio de la definición original, $(n_a \cdot \hat{D}_{90}^{t+\Delta t})$, lo cual originará los flujos de sedimento entre la capa activa y la de sustrato. Definamos la variable ζ , que representará la diferencia entre el espesor temporal de la capa activa ($\hat{L}_a^{t+\Delta t}$) y la solución final del espesor ($L_a^{t+\Delta t}$) en el tiempo $t+\Delta t$, según la Figura 2.

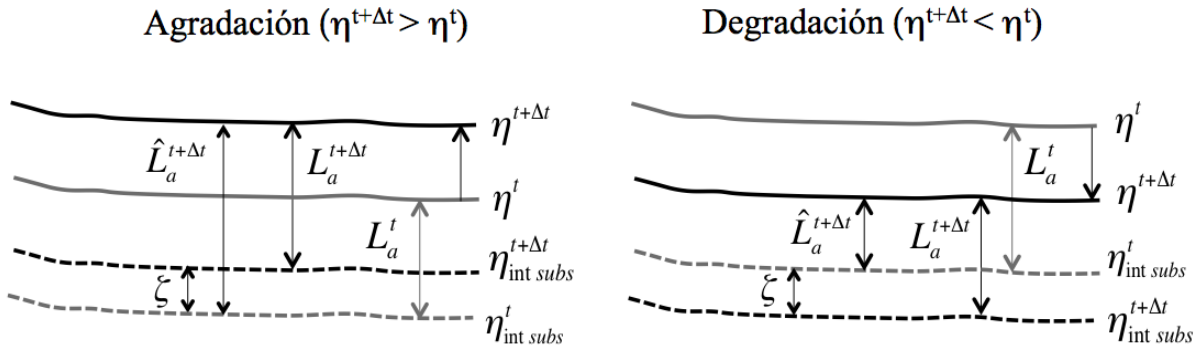


Figura 2. Diagrama de definición de variable ζ para los procesos de agradación y degradación.

Según la definición anterior, existen 2 posibilidades para aplicar ζ , dadas por:

$$\left\{ L_a^{t+\Delta t} = \hat{L}_a^{t+\Delta t} + \zeta, \text{ si } \left(n_a \cdot \hat{D}_{90}^{t+\Delta t} \right) > \hat{L}_a^{t+\Delta t} \right\} \text{ ó } \left\{ L_a^{t+\Delta t} = \hat{L}_a^{t+\Delta t} - \zeta \text{ si } \left(n_a \cdot \hat{D}_{90}^{t+\Delta t} \right) < \hat{L}_a^{t+\Delta t} \right\} \quad (6)$$

Con lo que se cuenta con 2 casos según la comparación entre $(n_a \cdot \hat{D}_{90}^{t+\Delta t})$ y $\hat{L}_a^{t+\Delta t}$. Estos serán:

a. El primer caso corresponde a $(n_a \cdot \hat{D}_{90}^{t+\Delta t}) > \hat{L}_a^{t+\Delta t}$, en donde la capa activa incorporará material desde las capas de sustrato, obteniéndose el valor de ζ , por medio de la solución de la Ec.7:

$$f_i^t(-\zeta) + \left(F_j^{t+\Delta t} L_a^{t+\Delta t} - F_j^t L_a^t \right) = - \left[\Delta_x \left(q_s p_j \right) \Delta t \right] \left[\Delta x \left(1 - \lambda_p \right) \right]^{-1} \quad (7)$$

Reordenando la ecuación de Exner y reemplazando la solución de la Ec.7, se obtiene:

$$F_j^{t+\Delta t} = \left(F_j^t L_a^t \right) \left(L_a^t + D h + z \right)^{-1} + \left(f_j^t z \right) \left(L_a^t + D h + z \right)^{-1} - \left[D_x \left(q_s p_j \right) D t \right] \left[D x \left(1 - \lambda_p \right) \left(L_a^t + D h + z \right) \right]^{-1} \quad (8)$$

b. El segundo caso corresponde a $(n_a \cdot \hat{D}_{90}^{t+\Delta t}) < \hat{L}_a^{t+\Delta t}$, en donde la capa activa temporal liberará material hacia capa de sustrato, sin modificar su distribución granulométrica. Así, el valor de ζ estará dado por la diferencia entre $(n_a \cdot \hat{D}_{90}^{t+\Delta t})$ y $\hat{L}_a^{t+\Delta t}$, obteniéndose que $\zeta = L_a^t + \Delta\eta - n_a D_{90}^{t+\Delta t}$. Reordenando la ecuación de Exner y reemplazando la solución de ζ , se tiene la Ec.9.

$$F_j^{t+\Delta t} = \left(F_j^t L_a^t \right) \left(L_a^t + \Delta\eta \right)^{-1} - \left[\Delta_x \left(q_s p_j \right) \Delta t \right] \left[\Delta_x \left(1 - \lambda_p \right) \left(L_a^t + \Delta\eta \right) \right]^{-1} \quad (9)$$

3. Condiciones experimentales

El experimento de laboratorio fue desarrollado en un canal experimental de 12 metros de largo y de 0.3 metros de ancho, con una pendiente de fondo cercana a 0.85%. La alimentación del caudal es continua y previamente establecida. El sedimento es alimentado en la cabecera del sistema por medio de un sistema continuo y previamente calibrado para la tasa de aporte requerida, que para el experimento de comparación corresponde a un gasto sólido por debajo del gasto sólido de equilibrio esperado para la configuración del experimento. En el extremo de agua abajo, el nivel de agua es controlado por medio de una compuerta vertical. El lecho del experimento es móvil y compuesto por una capa de sedimento de 5 cm de espesor aproximado. En cuanto al muestreo, se realizó una medición de la cantidad de material sedimentario expulsado desde el sistema, correspondiente a la tasa de transporte de fondo de la zona baja del canal. Cada medición fue realizada a intervalos de 30 minutos. Para cada medición, se realizó la caracterización de la distribución granulométrica. La caracterización de la condición final del lecho, se realizó con un muestreo de capas verticales, en 4 puntos a lo largo del canal, ubicados a 2, 5, 8 y 11 metros desde la cabecera. La duración del experimento fue de 36 hr. La configuración del experimento realizado para la comparación se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Condición hidráulica y geometría del experimento.

Exp.	Q_f [lt/s]	G_{SIN} [gr/min]	Pendiente [m/m]	hf_{media} (cm)	b_w (cm)	R_h (cm)	U_{media} (m/s)	Número de Froude
1	7,14	25,30	0,0085	4,15	30	3,25	0,57	0,90

El lecho inicial del experimento se compone de una mezcla única, al igual que la curva granulométrica de entrada. Ambas curvas se muestran en la Figura 3.

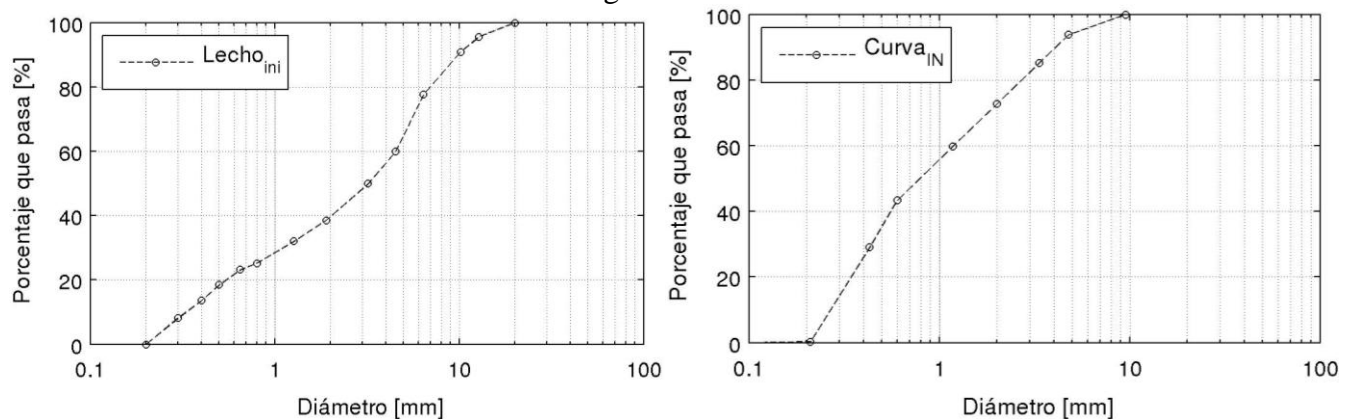


Figura 3. (Izq.) Curva granulométricas inicial del lecho - (Der.) Curva granulométrica del material entrante en la cabecera.

De la Figura 3, se observa que el rango de diámetros utilizados en el experimento va desde los 0.5 mm hasta los 20 mm aproximadamente, con un contenido aproximado de 60% de arenas y un 40% de gravas. Cabe señalar que en el experimento de laboratorio existe un período de puesta en marcha de aproximadamente 45 minutos, durante el cual se lleva al experimento a una condición permanente de las variables. Es durante este período donde se produce un lavado preliminar del lecho, además de evidenciarse un leve asentamiento del lecho, debido a un reordenamiento del material al ser saturado, por lo que existirán diferencias con respecto al comienzo de la simulación.

4. Configuración de casos de forzamiento

Para comprobar el funcionamiento del modelo numérico bajo condiciones más demandantes en el cálculo de la dinámica de los sedimentos, se crean 3 experimentos numéricos basados en la geometría del experimento de comparación. Para la creación de los experimentos, se realiza solamente el cambio de las variables: caudal de entrada y gasto sólido de entrada. Las configuraciones se muestran a continuación:

- Experimento B1: Rápido aumento del caudal por un intervalo corto de tiempo (Figura 4).
- Experimento B2: Rápido aumento del gasto sólido a la entrada del canal, por un intervalo corto de tiempo (Figura 4).
- Experimento B3: Suma de los forzamientos de Experimentos B1 y B2.

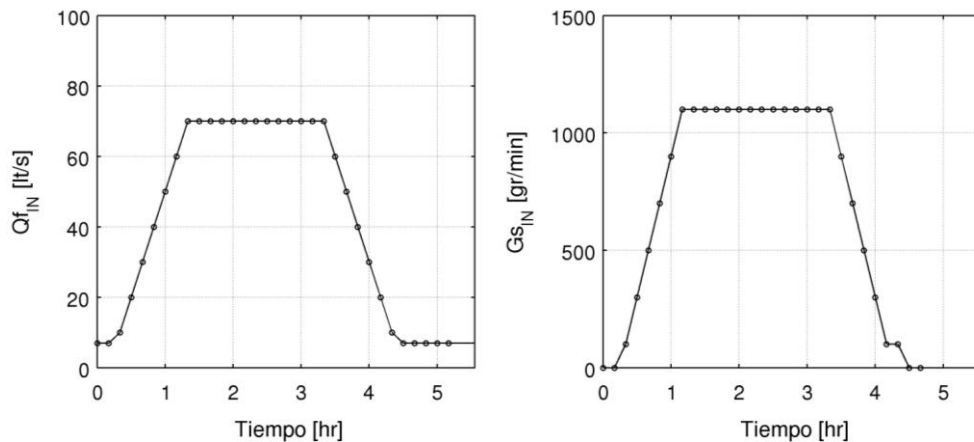


Figura 4. (Izquierda) Evolución del caudal a la entrada para experimento B1. (Derecha) Evolución del gasto sólido a la entrada para experimento B2.

5. Resultados

5.1 Comparación resultados del modelo y simulación

De los resultados entregados por el modelo numérico, se observa que el modelo es capaz de realizar una buena estimación del gasto sólido a la salida del canal (Figura 5), logrando recrear completamente la tendencia del experimento y los valores de las tasas al acercarse al estado de equilibrio. Las diferencias mostradas en el comienzo de la simulación se deben, principalmente, al desconocimiento de las reales condiciones del experimento al inicio de las mediciones y a la utilización de variables forzantes medias. Aún así, se logran representar la magnitud del transporte en la primera etapa del experimento.

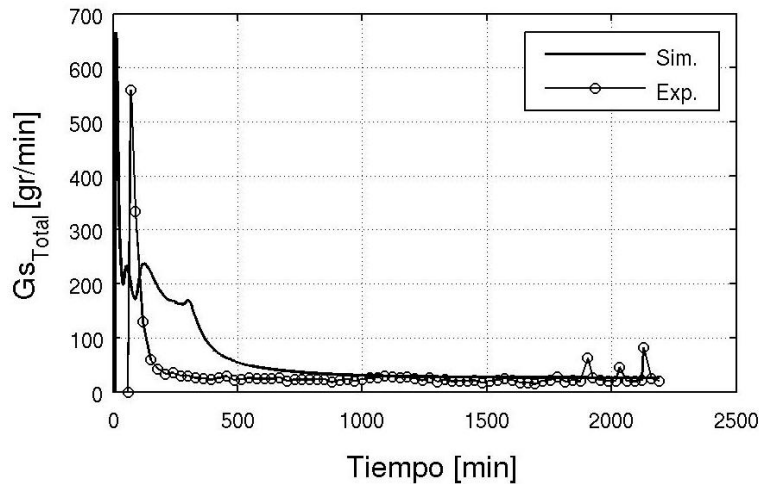


Figura 5. Comparación del transporte de sedimento de fondo a la salida del canal. Se presenta en línea continua con círculo los resultados medidos en el experimento (—○—) y en línea continua los resultados de la simulación (—).

La revisión de las curvas granulométricas del material a la salida del experimento, muestran que el modelo numérico logra transportar una curva levemente más gruesa que la medida en el experimento; aún así, ambas curvas abarcan el mismo rango de tamaños de partículas de la curva granulométrica utilizada en el experimento, comprendido entre 0.2 mm a 7 mm, mostrando una correcta estimación del proceso de transporte.

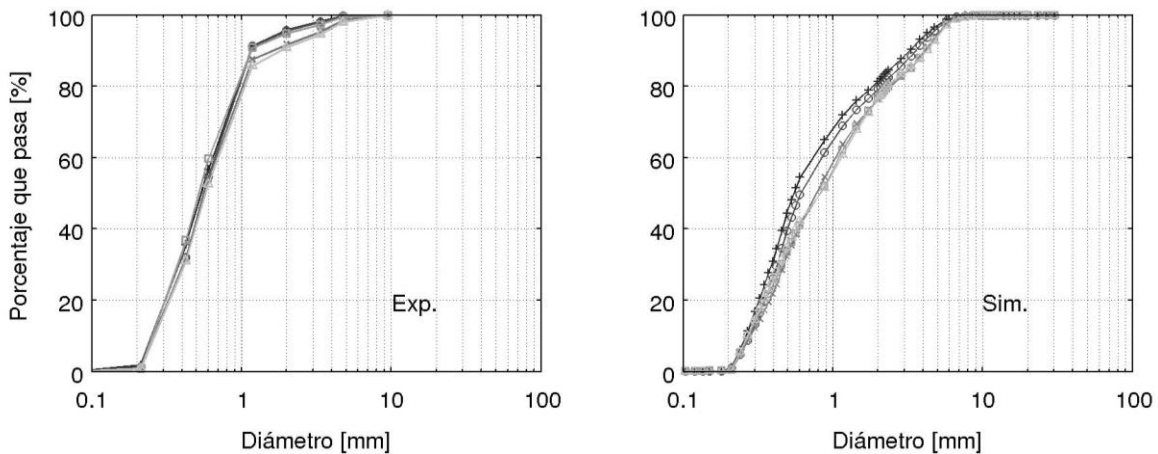


Figura 6. Comparación de curvas granulométricas de salida en los tiempos: 0 horas (□), 9 horas (○), 18 horas (▣), 27 horas (◻) y 36 horas (△). A la izquierda se muestran los resultados del experimento y a la derecha los obtenidos de las simulaciones.

De la Figura 7 es posible observar que la geometría final obtenida del modelo numérico, difiere levemente del resultado experimental en la zona alta del canal, lo cual es atribuido principalmente a lo permanente del forzamiento numérico respecto de la variabilidad existente en la técnica experimental. Considerando las pendientes medias de ambos resultados, se tiene que ambas están cercanas a 0.8% y su diferencia porcentual es sólo de 4,5%.

La comparación de la condición final de la estructura del lecho, es realizada comparando los diámetros característicos de la capa más superficial del lecho. Para ello, el muestreo fue realizado tomando una

capa de espesor aproximado de 2,5 cm de profundidad, lo cual asegura el contener los mayores tamaños de material presentes en el lecho. La comparación utiliza el cálculo de los diámetros característicos: D_{16} , D_{50} , D_{84} y D_{90} , y es mostrada en la Figura 8. De ella es posible notar que existe una buena concordancia en la zona alta y media del canal (8 metros aproximadamente). Para la zona baja se observa que el modelo numérico, en general, presenta diámetros levemente superiores a los reportados en el modelo, lo que se traduce en la presencia de curvas levemente mayores. Estas diferencias provienen de efectos de la condición de borde del experimento de laboratorio, en donde la presencia de la compuerta vertical a la salida, genera leves oscilaciones de la condición de borde y una acumulación temporal de material (en general más fino) antes de la salida.

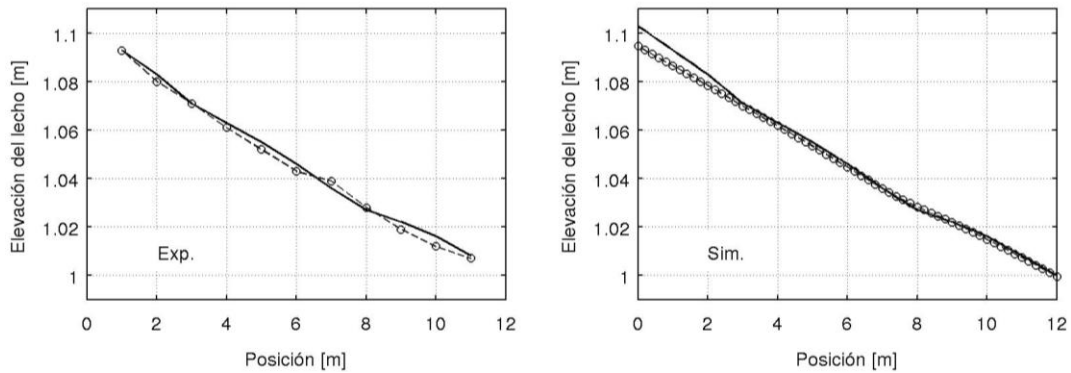


Figura 7. Comparación del nivel del lecho. En línea continua se muestra la condición inicial experimental, y en línea segmentada con círculos se muestra el resultado final del experimento (izquierda) y de la simulación (derecha).

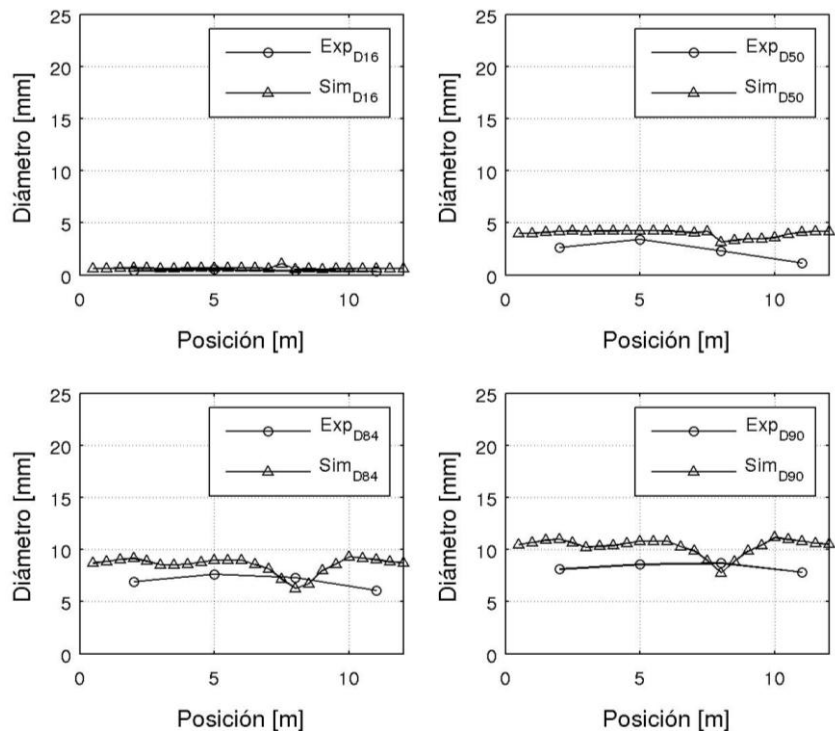


Figura 8. Comparación de los diámetros característicos de la capa superficial del lecho a las 48 horas.

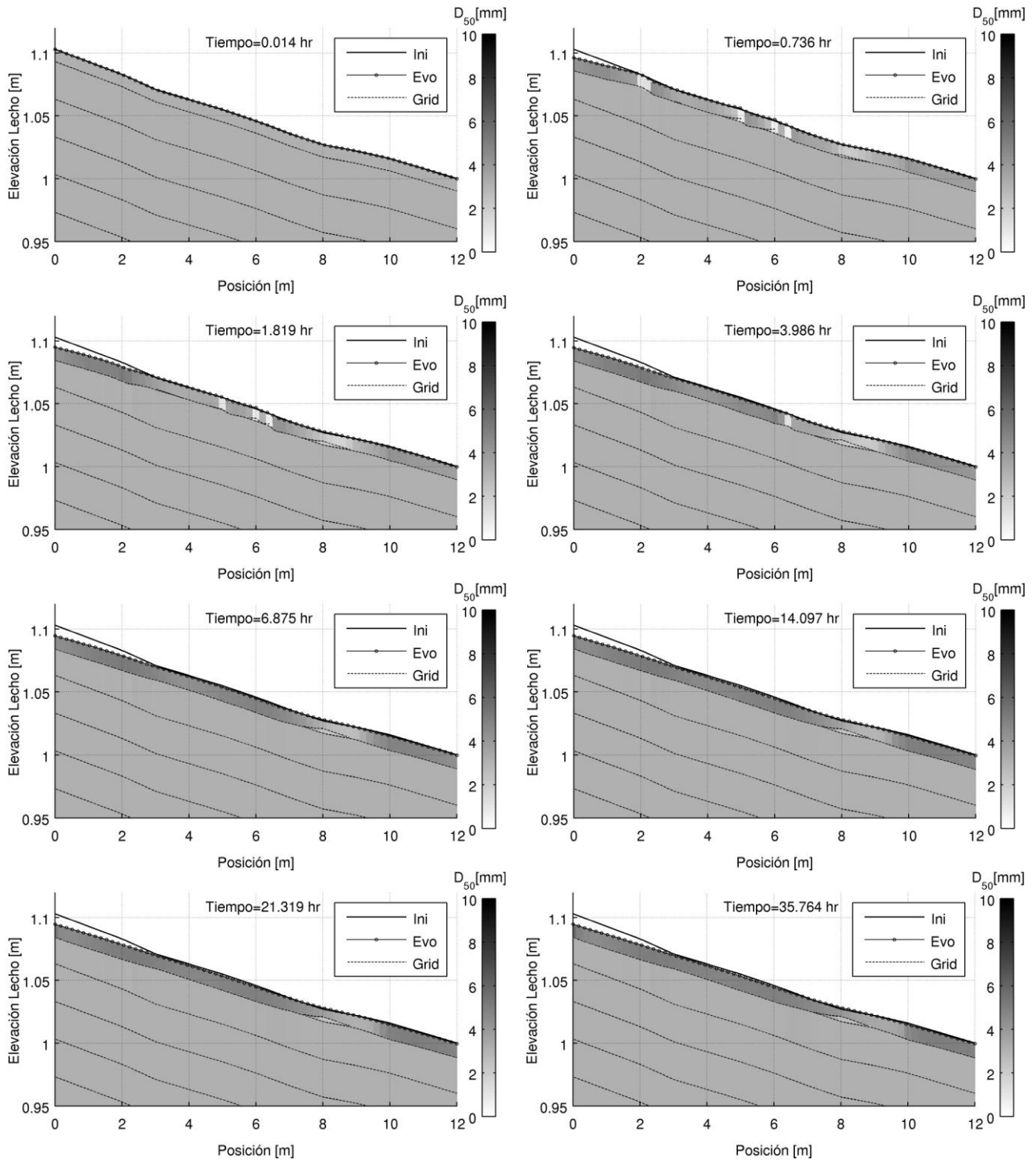


Figura 9. Evolución de la estratigrafía del lecho en el tiempo. En escala de colores se muestra el valor del diámetro característico D_{50} (mm); en línea continua se muestra la condición inicial del lecho (Ini); en línea continua y círculos se muestra la evolución de la superficie (Evo); en línea segmentada se muestran los límites de cada capa del lecho (capa activa o sustrato).

La caracterización de la estratigrafía del lecho, mostrada en la Figura 9, es realizada en base a la gráfica del diámetro característico D_{50} , que corresponde al diámetro medio de la partícula para la cual el 50% del material de la curva granulométrica es de tamaño inferior a ella. El uso de este diámetro se justifica en el hecho de que logra entregar mayor información sobre la dinámica de la curva granulométrica local, en términos de la integración o eliminación de fracciones granulométricas más finas, permitiendo una mejor visualización de la presencia del material fino. Así, los resultados obtenidos de la simulación permiten evidenciar como el proceso de degradación de la zona alta logra influir en la zona media y baja, en términos de su aporte de material más fino y el consecuente refinamiento de la capa superficial de una zona en depresión, ubicada aguas abajo (entre los 8 y 10 metros).

5.2 Simulación de casos de forzamiento

Los resultados obtenidos para los casos de forzamientos B1, B2 y B3, son mostrados utilizando como diámetro característico el D_{50} local, debido a los argumentos indicados anteriormente. En las Figuras 10, 11 y 12, son entregados los resultados de los casos B1, B2 y B3, respectivamente.

La Figura 10 muestra el completo proceso de degradación generado por un aumento considerable del caudal, según lo mostrado en la Figura 4. Es posible observar como durante el inicio del proceso de degradación, los puntos singulares del lecho (puntos altos y zonas de depresión) controlan de cierta forma la dinámica del material transportado. Para la zona alta se observa una continua pérdida de material de tamaños medios y finos, los que generan que durante un período de tiempo, la capa activa de zonas aguas abajo se muestren con un mayor contenido de material fino, es decir, con un D_{50} más fino pero con un D_{90} similar, no tan lejano del valor inicial. Este efecto desaparecerá con el tiempo, debido a la propagación de la onda de degradación o acorazamiento del lecho, proveniente desde aguas arriba. Debido a que el forzamiento impuesto es solamente un pulso de aproximadamente 3 horas, el lecho muestra una leve recuperación de la zona alta en las 2 horas siguientes, debido a la disminución de la pendiente local y la consecuente retención del sedimento base que seguirá entrando al sistema.

En la Figura 11 se observa la respuesta del sistema ante el aumento del sedimento entrante al sistema. Es posible observar la capacidad del modelo para el tratamiento de los rápidos cambios de pendiente local. Junto con ello, se observa el eficiente manejo de la creación y consumo de la capa activa y del sustrato, ante procesos altamente dinámicos. Finalmente, cabe notar como el sistema luego del pulso de sedimentos y de una gran alteración de la geometría en la zona alta, es capaz de realizar la degradación y evacuación del exceso de material que fue acumulado, lo que se debe a que el material acumulado posee una curva granulométrica más fina, similar al material alimentado al sistema.

La Figura 12 muestra el resultado de la superposición de los forzamientos antes indicados. De ella es posible observar que, aún cuando se tenga un gran pulso de entrada de sedimentos, su efecto es amortiguado por el pulso del caudal, observándose un transporte generalizado y similar a lo largo del canal (aumento de las zonas con D_{50} más fino debido al material fino transportado). Aún así, es posible distinguir una acumulación en la zona alta, pero la cual difiere del comportamiento de un sistema que presenta sólo un exceso de sedimentos. Así, la altura del depósito máximo es más pequeña, y se tiene que la forma de la zona de acumulación es más curva, similar a una superposición de las formas obtenidas, en forma separada, de los procesos de degradación y degradación puras.

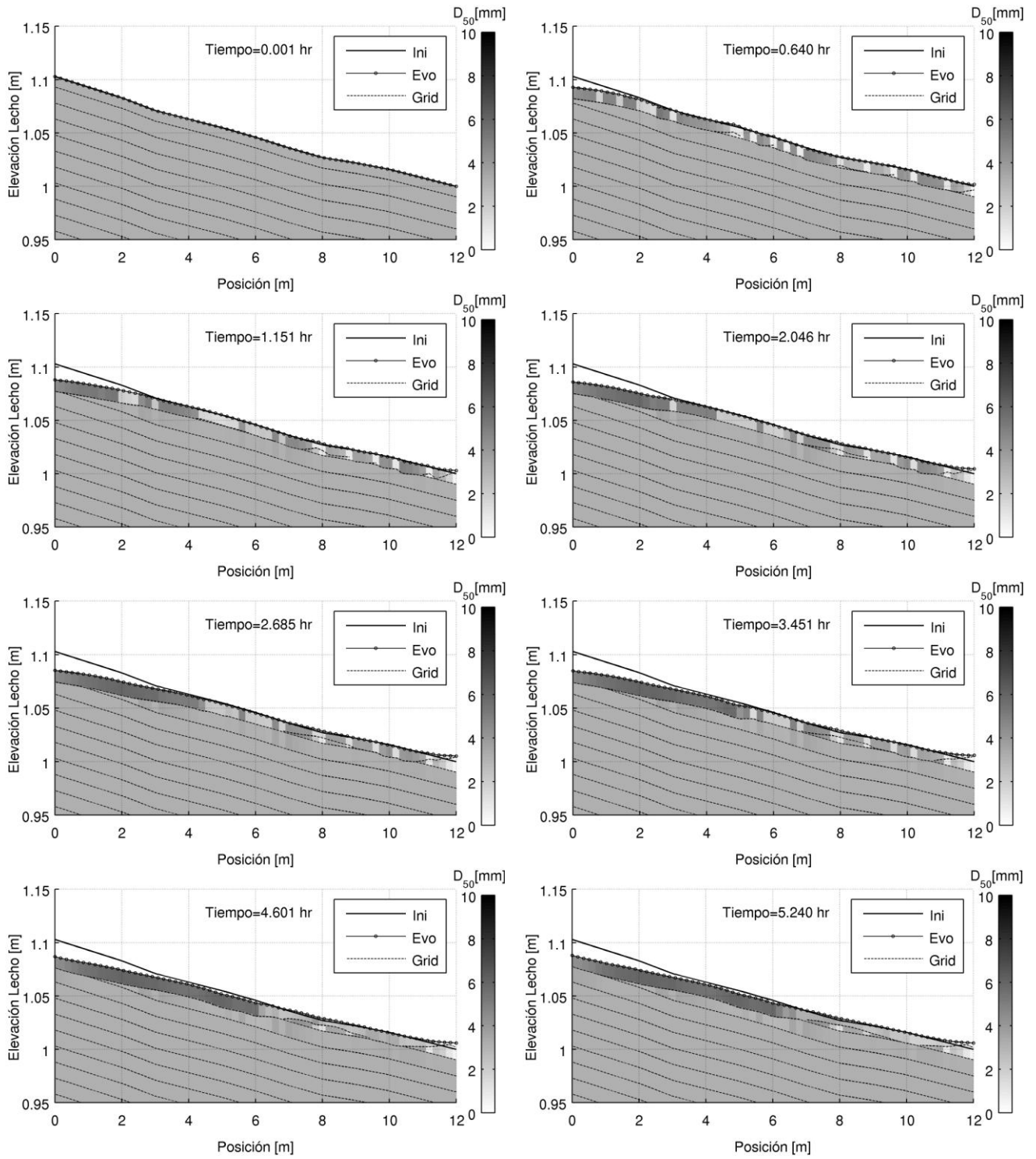


Figura 10. Evolución temporal de la morfología y estratigrafía del experimento B1.

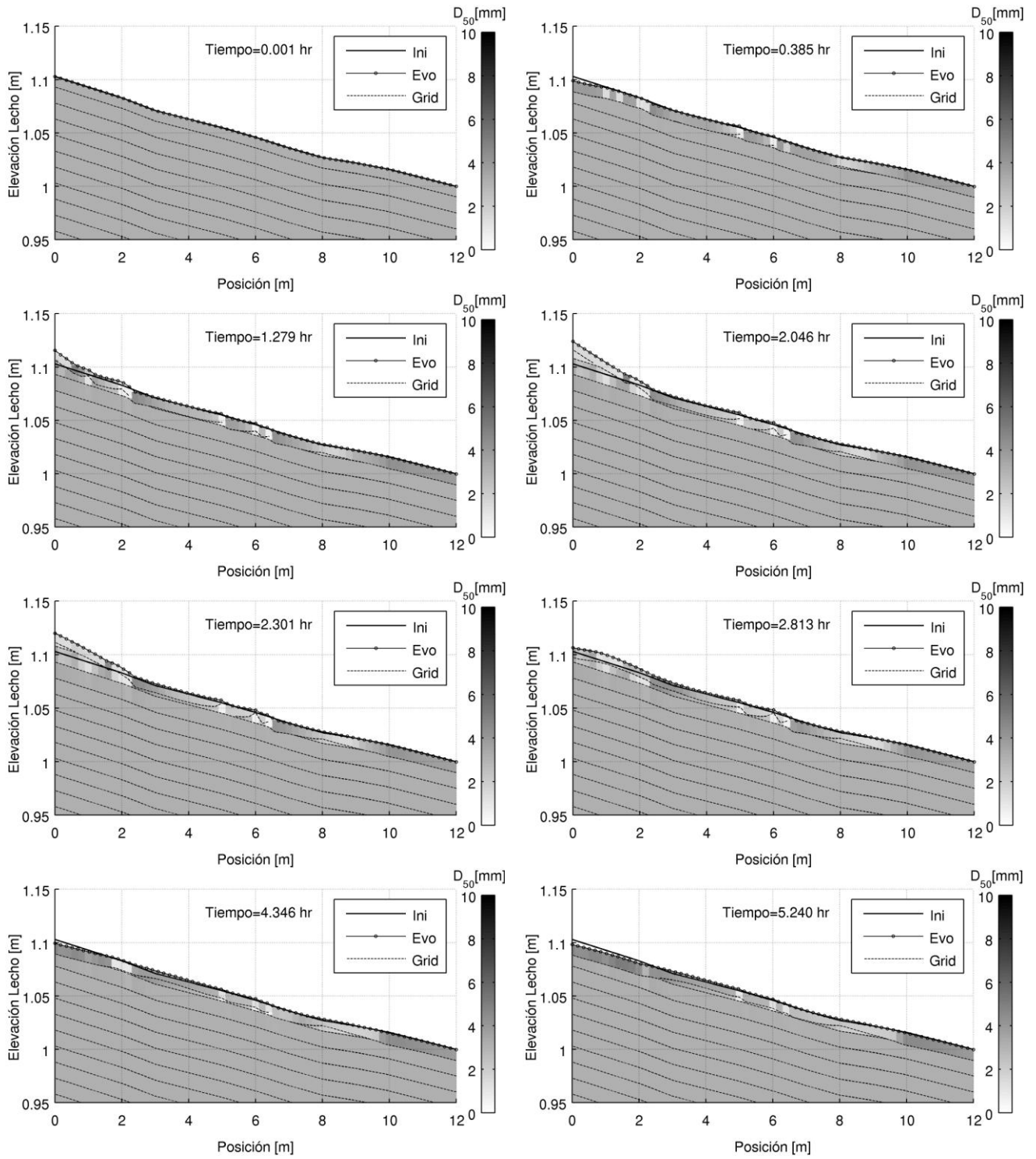


Figura 11. Evolución temporal de la morfología y estratigrafía del experimento B2.

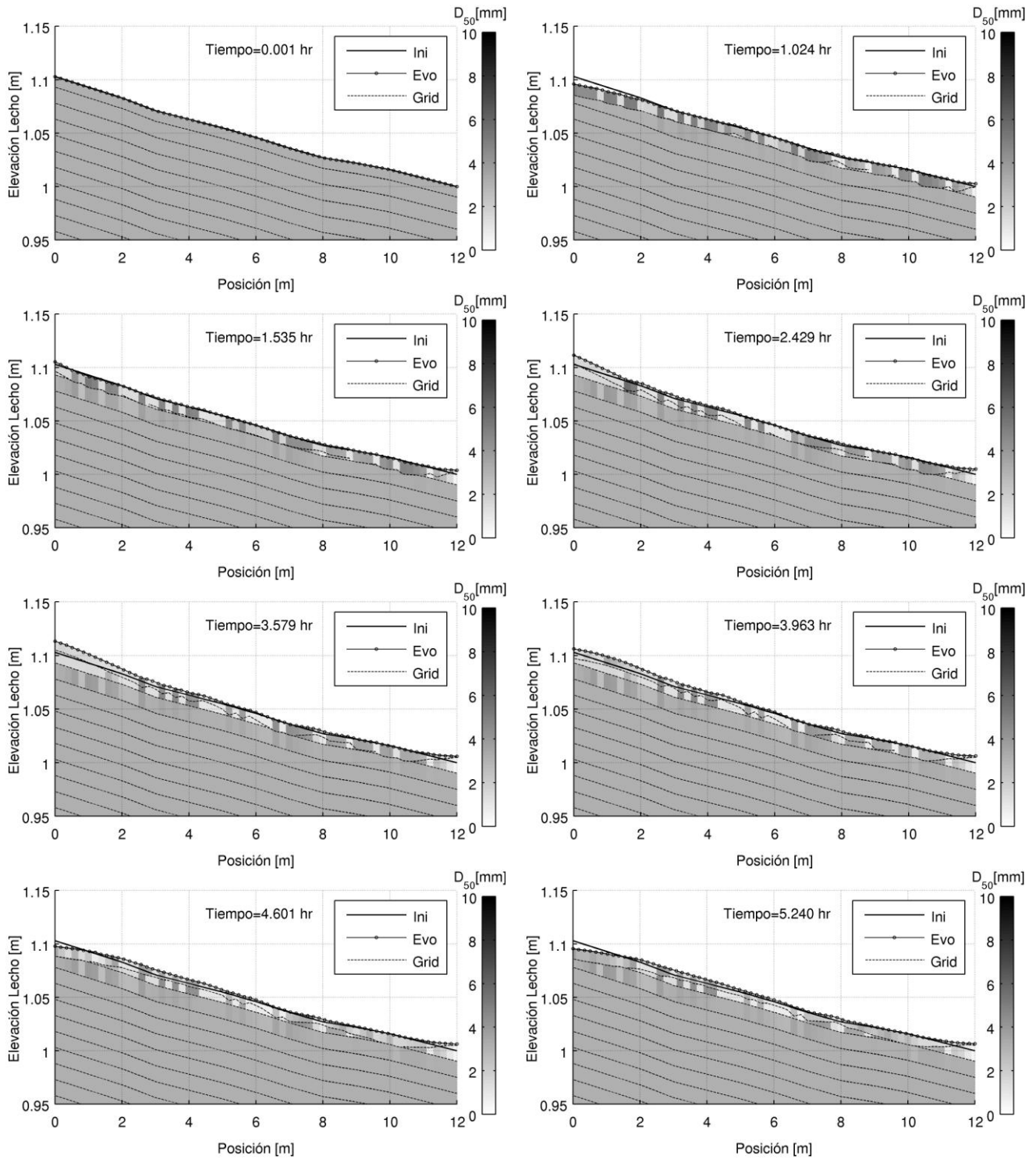


Figura 12. Evolución temporal de la morfología y estratigrafía del experimento B3.

Los resultados antes mostrados, junto con otros gráficos descriptivos de los procesos de evolución de la estratigrafía, se encuentran publicados en el repositorio de resultados “Sochid 2013” en la dirección <http://cgodoyba.wix.com/resultadospapers>.

6. Conclusiones

La comparación realizada entre el modelo y el experimento de laboratorio mostró un buen comportamiento del modelo numérico, logrando representar tanto los procesos de transporte de sedimentos y de evolución del lecho, durante un período de tiempo considerable. Además, el modelo mostró poder alcanzar una condición de equilibrio, similar a la lograda en el experimento, en donde el gasto de salida se mantiene en un valor constante, y de forma similar, la geometría del lecho se estabiliza. Lo anterior nos muestra que el esquema propuesto para el tratamiento de la dinámica y balance de masa de sedimentos, permite resolver de manera eficiente tanto condiciones de alta dinámica, como lo es el inicio del proceso de agradación o degradación, como condiciones permanentes o cercanas a un equilibrio.

Por otra parte, el seguimiento de la estratigrafía del sistema permite realizar un rastreo de la estructura del lecho durante los procesos de agradación y degradación, entregando vasta información de procesos particulares en la dinámica del sedimento, como por ejemplo, la influencia de los puntos bajos y altos en la evolución de la granulometría de zonas aguas abajo de ellos; o la formación de lentes y zonas de captura de material más fino.

Finalmente, la realización de experimentos numéricos para condiciones de forzamientos del sistema modelado, mostró la gran capacidad del modelo a la hora de evaluar procesos altamente dinámicos y que se desarrollan en escalas de tiempo pequeñas; además de entregar información valiosa sobre el desarrollo de los procesos generales de agradación y degradación.

7. Referencias

- Abarca, D. (2008) "Adaptation and implementation of a mathematical numerical model for the analysis of riverbed evolution". Undergraduate thesis, Department of Civil Engineering, Universidad de Chile.
- Ackers, P., and White, W. R. (1973). "Sediment transport: new approach and analysis." *J. Hydraul. Div., Am. Soc. Civ. Eng.*, 99(11) 2041–2060.
- Ashida, K., and Michue, M. (1971) "An investigation of river bed degradation downstream of a dam". *Proceedings of 14th International association of hydraulic research congress, Wallingford, U.K.*, Vol. 3, pp.247-255.
- Brownlie, W. R. (1981) "Prediction of flow depth and sediment discharge in open channels". Report No. KH-R-43A, W. M. Keck Laboratory of Hydraulics and Water Resources, California Institute of Technology, Pasadena, California, USA, 232 p.
- García, M.H. (Ed.) (2008) "Sedimentation Engineering: Processes, Measurements, Modeling, and Practice". *ASCE Manuals Rep. Eng. Pract.*, 110, 1150 pp.
- González, J. (2006) "Reservoir sedimentation considering the effect of turbidity currents. Development of a mathematical numerical model". Master of Science Thesis, Department of Civil Engineering, Universidad de Chile.
- Hirano, M. (1971) "River bed degradation with armoring". *Proceedings of Japan Society of Civil Engineers*, No. 195, pp.55-65.
- Jia, Y. and Wang, S. (1999) "Numerical Model for Channel Flow and Morphological Change Studies". *Journal of hydraulic engineering*, Vol.125, No. 9, pp. 924–933.
- Kamphuis, J.W. (1974) "Determination of sand roughness for fixed beds". *Journal of hydraulic research*, No. 12, Vol. 2, pp.193-200.

- Keulegan, G. (1938) "Laws of turbulent flow in open channels". National Bureau of Standards, Research Paper 1151 (U.S.), Vol. 21, No. 6, pp.707-741.
- Limerinos, J. (1970) "Determination of the Manning coefficient from measured bed roughness in natural channels". Geological Survey Water-Supply Paper 1898-B.
- Madej, M.A. et al. (2009) "Channel responses to varying sediment input: A flume experiment modeled after Redwood Creek, California". *Geomorphology*, Vol. 103, pp.507-519.
- Meyer-Peter, E. and Müller, R. (1948) "Formulas for bedload transport." Proc., 2nd IAHR Congress, Stockholm, Sweden.
- Parker, G. and Peterson, A.W. (1980) "Bar resistance of gravel-bed streams". *Journal of the hydraulics division, ASCE*, Vol. 106, No. HY10, pp.1559-1575.
- Parker, G. (1990) "Surface-based bedload transport relation for gravel rivers". *Journal of hydraulic research*, Vol. 28, No. 4, pp. 417-436.
- Parker, G., Toro-Escobar, C., Ramey, M., and Beck, S. (2003). "Effect of floodwater extraction on mountain stream morphology". *Journal of hydraulic engineering* 129(11): 885-895.
- Pryor, B. S., Lisle, T., Montoya, D. S. and Hilton, S. (2011) "Transport and storage of bed material in a gravel-bed channel during episodes of aggradation and degradation: a field and flume study". *Earth Surf. Process. Landforms*, 36: 2028–2041. doi: 10.1002/esp.2224
- Spasojevic, M. and Holly, F.M. (1990) "2D bed evolution in natural watercourses – New simulation approach". *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering*, Vo. 116, No. 4, pp.425-443.
- Toro-Escobar, C, Parker, G. & Paola, C. (1996) "Transfer function for the deposition of poorly sorted gravel in response to streambed aggradation". *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 34, No. 1, pp.35–53.
- Viparelli, E., Haydel, R., Salvaro, M., Wilcock, P.R. & Parker, G. (2010a) "River morphodynamics with creation/consumption of grain size stratigraphy 1: laboratory experiments". *Journal of hydraulic research*, No. 48, Vol. 6, pp.715-726.
- Viparelli, E., Haydel, R., Salvaro, M., Wilcock, P.R. & Parker, G. (2010b) "River morphodynamics with creation/consumption of grain size stratigraphy 2: numerical model", *Journal of hydraulic research*, No. 48, Vol. 6, pp.727-741.
- Wilcock, P.R. & Crowe, J.C. (2003) "Surface-based transport model for mixed-size sediment", *Journal of hydraulic engineering, ASCE*, No. 129, Vol. 2., pp.120-128.
- Wong, M., and Parker, G. (2006) "One-dimensional modeling of bed evolution in a gravel bed river subject to a cycled flood hydrograph". *Journal of geophysical research*, Vol. 111, F03018, doi:10.1029/2006JF000478.
- Wu, W., Wang, S. and Jia, Y. (2000) "Non-uniform sediment transport in alluvial rivers". *Journal of hydraulic research*, Vol. 38, No. 6, pp.427-434.
- Ying, X., Khan, A.A., Wang, S.S. (2004) "Upwind Conservative Scheme for the Saint-Venant Equations". *Journal of hydraulic engineering, ASCE*, Vol. 130, No. 4, pp.967-987.