

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXIII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

MODELOS DE FLUJO, TRANSPORTE DE SEDIMENTOS Y MORFODINÁMICA EN RÍOS*

CRISTIÁN ESCAURIAZA M.¹

RESUMEN

Los modelos numéricos se han convertido en herramientas fundamentales para avanzar en la comprensión científica de sistemas fluviales para un amplio rango de escalas espaciales y temporales. A pesar de los recientes avances en la capacidad computacional y el desarrollo de métodos numéricos avanzados, predecir interacciones entre el flujo, el transporte de sedimentos y la morfodinámica sigue siendo un gran desafío para la investigación basada en el desarrollo de modelos. La amplia gama de enfoques para modelar la dinámica de ríos, plantea la pregunta de cómo elegir la mejor representación. Comportamientos de sistemas dinámicos como la independencia de escalas, indican que la dinámica de sistemas fluviales para grandes escalas puede no ser sensible a los detalles de la dinámica subyacente, lo que motiva la utilización de modelos muy simples, conocidos como modelos de complejidad reducida. En el otro extremo están los casos mediados por la dinámica de estructuras coherentes en flujos turbulentos, que presentan interacciones a pequeña escala cerca del lecho, y por lo tanto son difíciles de capturar en modelos simplificados. Además de presentar este espectro de modelos, en este trabajo sugerimos que en el futuro podremos desarrollar nuevas formas de acoplar estos enfoques para entender mejor la naturaleza.

¹Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile—cescauri@ing.puc.cl

* Este artículo es un resumen del capítulo de libro: Escauriaza, C., Paola, C., and Voller, V. R. (2017). “Computational models of flow, sediment transport and morphodynamics in rivers.” Gravel Bed Rivers: Processes and Disasters, D. Tsutsumi and J. Laronne, eds., Wiley.

1. INTRODUCCIÓN

Modelos numéricos han sido herramientas esenciales para investigar la dinámica de sistemas fluviales, proporcionando conocimientos fundamentales sobre las interacciones entre los flujos turbulentos, el transporte de sedimentos y la evolución morfodinámica de los ríos, en un amplio rango de escalas en el tiempo y espacio. Desde un punto de vista científico, los modelos pueden ayudarnos efectivamente a entender la naturaleza e investigar la respuesta de ríos sujetos a forzamientos ambientales y antropogénicos.

Los modelos son representaciones simplificadas de leyes fundamentales de conservación, expresadas a través de ecuaciones o reglas, con variables que describen el estado del sistema y contienen, implícita o explícitamente, una definición de las escalas que caracterizan la dinámica del problema. Más allá de las predicciones que proporcionan, el desarrollo de modelos es un portal creativo en el avance de la comprensión científica y la explicación de procesos fundamentales. Los modelos deben en general ser validados con mediciones, que muchas veces también pueden contener errores, por lo que el proceso es iterativo, y requiere adaptar las ecuaciones y los métodos de solución, así como los protocolos de medición, de manera que ambas partes del proceso aporten a nuestra comprensión.

A pesar de los avances recientes en la capacidad computacional y el desarrollo de métodos numéricos, la predicción de los flujos de los ríos y la dinámica de los sedimentos plantean un gran desafío para los modelos. La gran variedad y complejidad de las simulaciones disponibles, no significa necesariamente que nuestra comprensión de los procesos esenciales que explican la dinámica de los ríos haya también avanzado al mismo ritmo. Los principales problemas provienen de la complejidad intrínseca del flujo turbulento, especialmente bajo condiciones variables en el tiempo y sobre condiciones de borde complejas, además de la intratabilidad del cálculo del transporte de sedimentos. Además nos interesa en este artículo discutir un problema que ha recibido menor atención: La selección del modelo más apropiado para una determinada pregunta científica. En sistemas complejos como los ríos, algunas preguntas pueden ser contestadas con métodos muy simples, pero quizás no convencionales, mientras que otros problemas requieren todos los detalles y resolución que podamos emplear.

El artículo está organizado de la siguiente manera: En la sección 2 proporcionamos una breve revisión de los modelos más comunes y describimos ejemplos de aplicaciones en flujos de ríos. En la sección 3 discutimos el razonamiento detrás de la selección del modelo apropiado, y sugerimos pautas para elegir el mejor enfoque en cada caso. En la sección 4 nos centramos en los desafíos futuros, especialmente en las perspectivas de utilizar modelos más detallados e intensivos desde el punto de vista computacional para informar a modelos simples que puedan abarcar grandes escalas de tiempo/espacio y/o ser ejecutados varias veces. La sección 5 contiene un resumen de ideas y preguntas para avanzar hacia la síntesis de modelos que puedan contribuir a la comprensión de los procesos fluviales.

2. RESUMEN DE MODELOS EXISTENTES

En un sentido amplio, los enfoques de los modelos pueden considerarse en un espectro. En un extremo se encuentran modelos altamente simplificados, que incluyen por ejemplo modelos descriptivos, balances generalizados (Lane 1955), o modelos de autómatas celulares (Wolfram 2002). En el otro extremo del espectro están los modelos de alta fidelidad. Los más detallados realizan simulaciones numéricas directas (DNS) que capturan todas las escalas relevantes,

resolviendo hasta la escala de menor longitud en el sistema -la microescala de Kolmogorov, en la que la viscosidad disipa la energía cinética- o partículas de sedimento individuales. La Figura 1 muestra ejemplos producidos por enfoques que están cerca de los extremos del espectro: Desde modelos basados en reglas para caracterizar la red de drenaje, hasta simulaciones de turbulencia a pequeña escala, acopladas a la dinámica de partículas individuales para captar los detalles del transporte de sedimentos.

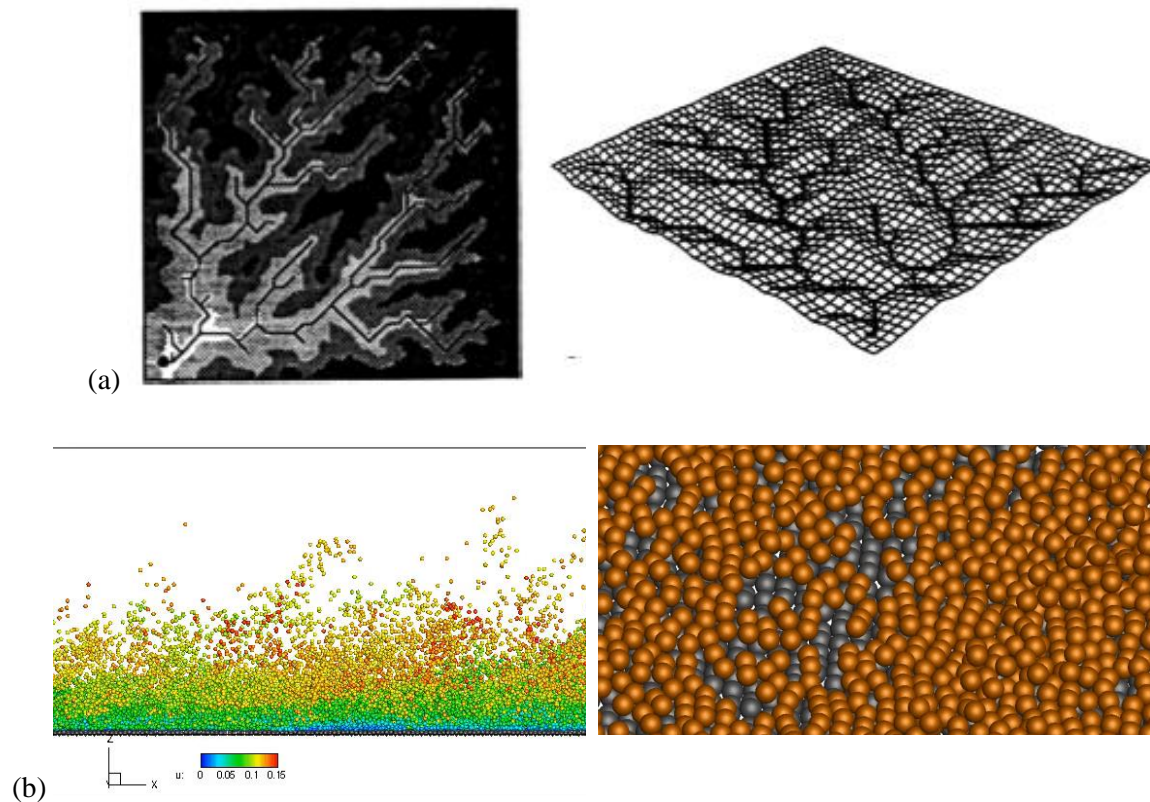


Figura 1. Modelos van desde aproximaciones simplificadas de leyes de conservación hasta simulaciones detalladas de flujos turbulentos. (a) Modelo simple de la red de drenaje (Willgoose et al. 1991); y (b) DNS de la capa límite turbulenta acoplada con un modelo Lagrangiano de transporte de sedimentos. Las partículas son modeladas como elementos puntuales cuya dinámica se calcula a partir del flujo instantáneo (González et al., 2017).

Nivel 0: Modelos de Complejidad Reducida (RCM)

Estos son los modelos más simples basado en reglas aplicadas a una malla discreta en un plano bidimensional, cuyo objetivo no es predecir casos morfodinámicos específicos, sino más bien explorar comportamientos generales, enfatizando la formación de patrones en el flujo. Una hipótesis subyacente, que no siempre se expresa explícitamente, es que la dinámica en las escalas de interés es suficientemente independiente de los detalles de escala fina (Werner 1999). No hay formalismo para desarrollar RCMs, sino que se basan en formas discretas de las ecuaciones de conservación. Por lo general las únicas leyes de conservación que se aplican estrictamente son

las de masa (volumen) de agua y sedimentos, y versiones simplificadas de la conservación de cantidad de movimiento.

A partir de estos modelos han logrado capturar importantes dinámicas emergentes a grandes escalas espaciales en ríos trenzados, deltas, y en la evolución de la red de drenaje (e.g. Murray & Paola 1994, 1997, Seybold 2007, Liang et al. 2015a), sin embargo han recibido también críticas sobre sus predicciones y utilización (véase Doeschel-Wilson y Ashmore 2005, Nicholas 2010).

Nivel 1: Modelos de Difusión

Procesos sedimentarios a escala de cuenca pueden representarse por ecuaciones de difusión derivadas a partir de las ecuaciones de conservación de la masa y cantidad de movimiento, y se aplican rutinariamente para observar la evolución del terreno (por ejemplo, Martin & Church, 1997, Whipple & Tucker 2002, Tucker y Hancock 2010), especialmente cuando acoplan procesos superficiales a la tectónica. Los modelos de difusión también han sido capaces de describir procesos que producen cambios de granulometría en la estratigrafía de cuencas aluviales (Paola et al., 1992). La derivación formal de la aproximación de difusión proviene de las ecuaciones de aguas someras, que se describen en la siguiente sección, con otros supuestos adicionales:

1. Escala de longitud del problema $L \gg L_{bw}$ donde L_{bw} es la longitud característica de la variación del eje hidráulico, definida como la razón entre la profundidad del agua h y la pendiente S ($L_{bw} = h / S$). Esto significa que los términos de aceleración y gradiente de presión pueden ser despreciados, calculando el esfuerzo de corte como el producto de la profundidad, la pendiente y el peso específico del agua.
2. La variabilidad de la descarga puede representarse considerando un caudal característico constante, en vez de un hidrograma.
3. El transporte de sedimentos puede representarse a partir de fórmulas clásicas (por ejemplo, Engelund & Hansen 1972) sin complicaciones de acorazamiento, topografía, etc. Los efectos de estructuras sedimentarias se pueden representar mediante un coeficiente de fricción constante.

Nivel 2: Ecuaciones de St. Venant o de Aguas Someras

Los modelos numéricos en ríos usan comúnmente las ecuaciones de St. Venant para representar la hidrodinámica de flujo en una (1D) o dos dimensiones (2D). Las ecuaciones consideran la conservación de la masa y cantidad de movimiento, y se obtienen integrando verticalmente las ecuaciones de Reynolds sobre la profundidad del flujo, con los siguientes supuestos: (1) la distribución de presión es hidrostática; (2) las escalas espaciales horizontales son significativamente más grandes que las escalas verticales; (3) los esfuerzos viscosos y las aceleraciones de Coriolis son insignificantes; y (4) Los esfuerzos en el lecho pueden ser representados por ecuaciones algebraicas, derivadas originalmente para flujos uniformes.

Las soluciones numéricas de estos modelos se acoplan a fórmulas de transporte de sedimentos, y a la ecuación de Exner (Paola y Voller 2005), para predecir la morfodinámica en procesos de largo plazo que van desde meses a años. Para los procesos que ocurren a escalas espaciales y temporales mayores, los modelos morfodinámicos han despreciado los términos inerciales para representar la evolución del lecho, asumiendo un flujo constante, gradualmente variado o incluso un flujo uniforme local en formulaciones 1D. Estos modelos se han utilizado en la progradación de deltas y de conos aluviales (por ejemplo, Parker et al, 1998, Kostic & Parker 2003a, Papanicolaou et al., 2004, y Contreras et al. 2015), la evolución de un río después de la remoción de una presa (Cui et al 2005, 2006), la morfodinámica de los ríos (Cui et al., 1996, Verhaar et al.,

2008, Viparelli et al., 2010, Stecca et al., 2014), y recientemente para simular la evolución de meandros (Asahi et al., 2013). Como señalan Ferguson (2003) y Ferguson & Church (2009), la principal deficiencia de los modelos 1D son los errores en la estimación del flujo de transporte de sedimentos, especialmente porque no permiten distribuir correctamente el esfuerzo de corte en la sección transversal en geometrías complejas, o en los casos en que el esfuerzo de corte no es uniforme, o es cercano a la condición crítica. También se han utilizado modelos 2D para simular procesos de transporte de sedimentos, calculando un vector de flujo de sedimentos tangencial a la superficie del lecho. El sedimento en suspensión se considera acoplando el flujo a ecuaciones de advección-difusión para la concentración, que requieren una distribución de velocidad vertical para estimar los esfuerzos de corte en el lecho.

Las ecuaciones de St. Venant también se han empleado para simular eventos de inundación rápidos y extremos, tales como propagación de tsunamis, inundaciones fluviales y rompimiento de presas (Figura 2). Estas condiciones requieren la inclusión de la variación del tiempo, y de esquemas numéricos que puedan capturar discontinuidades como ondas de choque o interfaces resolviendo el problema de Riemann en los elementos de la discretización (Toro 2001).

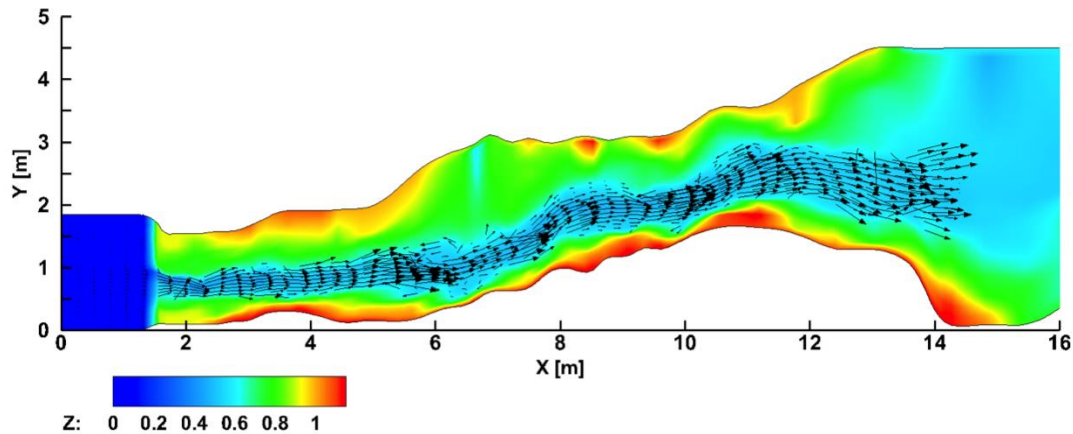


Figura 2. Imagen instantánea de la velocidad en la propagación de un flujo de ruptura de presa sobre una batimetría compleja usando el modelo de Guerra et al. (2014). El modelo 2D captura el área inundada y las velocidades instantáneas promediadas en profundidad.

Nivel 3: URANS

Las ecuaciones no-permanentes de Reynolds y Navier-Stokes (URANS por su sigla en inglés) representan el flujo turbulento tridimensional (3D) para representar la influencia de la turbulencia en los procesos que se están analizando, y el impacto del flujo sobre la morfodinámica y el transporte de sedimentos. La turbulencia es el fenómeno colectivo que se produce en flujos impermanentes con altos números de Reynolds, caracterizados por su irregularidad, alta mezcla, y vórtices de un amplio rango de escalas. Las componentes de velocidad, la presión y otras variables del flujo fluctúan irregularmente en el espacio y el tiempo, transfiriendo rápida y efectivamente cantidad de movimiento, masa, y calor. Como se discute en este artículo, la simulación de todas las escalas en flujos turbulentos podría no sólo ser computacionalmente muy costosa pero poco práctica. En la mayoría de los casos, los flujos turbulentos se analizan mediante ecuaciones que resuelven explícitamente los promedios de

velocidad y presión, mientras que los efectos de las fluctuaciones producidas por la dinámica local de pequeños vórtices en el flujo se representan a través de modelos estadísticos.

La mayoría de las descripciones matemáticas de flujos turbulentos se basan en las hipótesis de similitud de Kolmogorov (Pope 2000), que nos permiten representar la transferencia no lineal de energía cinética o cascada de energía de grandes a pequeñas escalas como un régimen estadísticamente universal. Se supone que las pequeñas escalas son homogéneas e isotrópicas, y que la energía se disipa continuamente por la viscosidad, hacia las escalas más pequeñas. Una descripción estadística común de los flujos turbulentos se basa en un procedimiento conocido como descomposición de Reynolds, en el que separamos las partes medias y fluctuantes de las componentes de velocidad y presión:

$$u_i = U_i + u'_i$$

$$p = P + p'$$

donde las letras mayúsculas y las letras minúsculas con una prima corresponden al promedio y a las fluctuaciones de media cero, respectivamente.

Cuando se aplica esta descomposición a las ecuaciones de conservación de la masa y de cantidad de movimiento, y se promedian para un conjunto de realizaciones, se obtienen las ecuaciones URANS:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \langle u'_i u'_j \rangle$$

donde Re es el número de Reynolds, definido en términos de las escalas características de velocidad y longitud del problema y de la viscosidad del fluido, y los corchetes angulares indican el promedio del conjunto. En estas ecuaciones, los efectos de las fluctuaciones en el flujo medio aparecen como derivadas de momentos estadísticos de segundo orden de las fluctuaciones de velocidad. Estos son los esfuerzos de Reynolds $\langle u'_i u'_j \rangle$, que típicamente se representan a partir de una viscosidad turbulenta ν_t , usando la difusión del gradiente de velocidad del flujo medio.

Investigaciones recientes han demostrado que los modelos URANS pueden predecir razonablemente la velocidad media y las distribuciones de energía cinética turbulenta en el espacio con costos computacionales moderados, proporcionando información del flujo medio 3D en ríos para números de Reynolds reales (Lane et al., 1999; Ge et al., 2005 y Sandbach et al., 2012). Las escalas espaciales típicas de las simulaciones van desde experimentos de laboratorio (10^0 m), a grandes flujos de río usando mallas gruesas (10^3 m), y las escalas de tiempo varían de segundos a horas para representar las características relevantes del flujo 3D. Incluyendo flujos alrededor de estructuras hidráulicas con geometrías complejas tales como pilares de puente (Ge et al., 2005) y socavación (Nagata et al., 2005, Roulund et al., 2005, y Duc y Rodi, 2008).

Sin embargo, estos modelos tienen también limitaciones importantes. Por ejemplo, los esfuerzos turbulentos calculados con la viscosidad turbulenta afectan directamente a la solución numérica para el flujo medio, porque cada modelo de turbulencia específico seleccionado para realizar las simulaciones puede cambiar la capacidad predictiva del modelo URANS. Los modelos de turbulencia isotrópica se eligen generalmente por su simplicidad en la implementación y robustez de sus soluciones numéricas, pero añaden una considerable disipación viscosa al flujo. Como

resultado, los modelos de turbulencia URANS producen en muchos casos soluciones excesivamente suaves, que no pueden resolver la dinámica de los vórtices que caracterizan los flujos a altos números de Reynolds. Los problemas más complicados surgen en casos de separación, recirculaciones, flujos helicoidales, o flujos secundarios inducidos por curvatura. En todas estas situaciones, muy comunes en los ríos, existe una importante anisotropía de turbulencia generada por estructuras coherentes. En consecuencia, los modelos URANS que asumen la turbulencia isotrópica son difíciles de aplicar y propensos a errores. Las ecuaciones de transporte de esfuerzos de Reynolds, modelos algebraicos o no-lineales de turbulencia pueden mejorar la solución en algunos casos, pero requieren resolver ecuaciones más complejas en mallas más finas, lo que aumenta el costo de las simulaciones, e introducir además una gran disipación turbulenta.

Nivel 4: LES

La simulación de grandes escalas (LES) es un enfoque para modelar flujos turbulentos complejos dominados por estructuras coherentes. Los modelos LES proporcionan descripciones precisas del flujo, entregando soluciones detalladas y resolviendo directamente todas las escalas turbulentas más grandes que el tamaño de la malla computacional. En LES un filtro espacial se aplica al flujo instantáneo en las ecuaciones de Navier-Stokes, y derivan ecuaciones para las variables filtradas. El efecto del flujo residual, de menor tamaño que el de la discretización, se representa a través de un modelo de submalla (subgrid-SGS). El modelo SGS seleccionado representa la transferencia de energía y la disipación entre el flujo resuelto y las escalas más pequeñas.

La simulación de los flujos cercanos a la pared es un gran desafío en LES, ya que resolver la dinámica detallada en las escalas finas cerca de la pared puede ser muy costoso a números de Reynolds altos. Los detalles de las estructuras coherente de la capa límite son importantes sólo para el transporte de partículas cerca del lecho, y para el desarrollo de formas de fondo en lechos de arena, entonces muchas veces se utilizan funciones de pared, o modelos de turbulencia híbridos URANS/LES. Estos modelos híbridos se han propuesto para disminuir los costos computacionales de LES, superando las limitaciones de las simulaciones URANS para flujos a altos números de Reynolds en geometrías complejas. La idea básica es usar un modelo de turbulencia URANS para regiones cerca de bordes sólidos, mientras que LES se usa en el resto del dominio.

Modelos LES y URANS/LES han demostrado ser muy efectivos para capturar la dinámica compleja de la turbulencia y entender procesos fundamentales de flujos en cauces naturales (Kang et al., 2011) y alrededor de estructuras hidráulicas complejas (McCoy et al., 2008; Escauriaza & Sotiropoulos 2011c; Stoesser 2014) (Fig. 3).

Nivel 5: DNS

Las simulaciones numéricas directas (DNS) resuelven todas las escalas de la turbulencia, usando una resolución de la malla del mismo orden de magnitud que la escala de Kolmogorov. Este enfoque proporciona el máximo detalle y resolución espacio-temporal del flujo, pero es limitado, ya que tiene un costo computacional extremadamente grande, incluso en números de Reynolds bajos. Los dominios computacionales normalmente representan una sección muy pequeña del

flujo y las condiciones de borde necesitan ser aproximadas, lo que puede implicar asumir condiciones periódicas no físicas en las direcciones transversal y longitudinal.

Este alto nivel de descripción de todo el espectro de las escalas turbulentas es necesario sólo cuando la estructura fina del flujo es importante, o en los casos en que creemos que las aproximaciones requeridas para uno de los métodos anteriores conducen a errores. Para problemas con el transporte de sedimentos, realizar un DNS verdadero también requeriría resolver cada grano y su campo de flujo circundante - un requerimiento computacional gigantesco si el menor diámetro de grano es menor que la escala de Kolmogorov. El enfoque de DNS se ha utilizado principalmente en modelos muy detallados de transporte de sedimentos, tales como modelos Lagrangianos de partículas que integran la dinámica de los granos de sedimentos individuales y la capa límite.

Soldati y Marchioli (2012) analizaron las ventajas y limitaciones de los modelos de transporte de partículas en DNS comparándolo a LES. La influencia de la inercia de las partículas y la concentración vertical de los sedimentos lleva a diferentes requerimientos para que los modelos describan adecuadamente las interacciones entre las partículas y las estructuras turbulentas y coherentes cercanas a la pared. Un enfoque similar se empleó en el reciente trabajo de Kidanemariam & Uhlmann (2014), Ji et al. (2014), y González et al. (2017), que representan las colisiones entre partículas y las fuerzas hidrodinámicas con diferentes grados de detalle en un DNS, identificando mecanismos de transporte de sedimentos a bajo número de Reynolds en configuraciones de dominios simplificados a escalas de pequeña longitud.

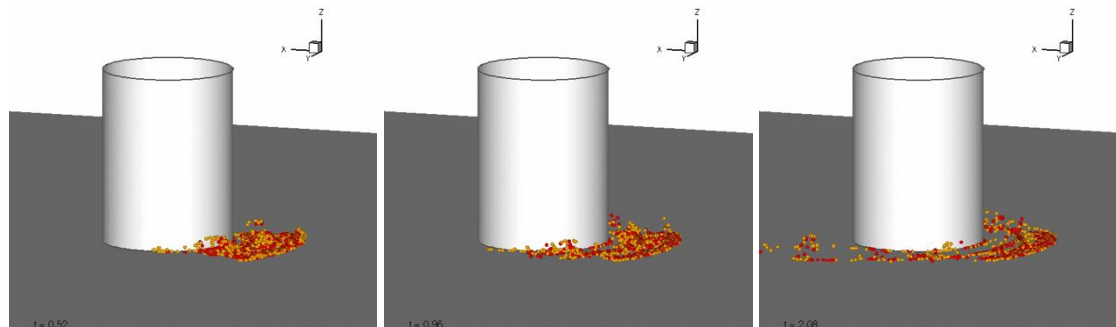


Figura 3. Imagen instantánea del transporte de partículas, producido por el vórtice de herradura usando un modelo híbrido de turbulencia (Escala & Sotiropoulos 2011b). El modelo reproduce la intermitencia del transporte de fondo cerca del umbral de movimiento, controlado por las estructuras coherentes del flujo.

3. ELECCIÓN DEL MEJOR MODELO

La respuesta a la pregunta "¿qué modelo es mejor?" depende del problema específico, ya que modelos muy realistas y complejos no son necesariamente mejores desde un punto de vista científico más amplio. Aquí discutimos la capacidad de los modelos para avanzar en el conocimiento y también ofrecemos algunas estrategias para seleccionar el mejor enfoque, dependiendo de los procesos que controlan la dinámica.

Modelos como herramientas de investigación

En investigación, el propósito principal de los modelos numéricos es obtener información sobre los procesos físicos mediante la resolución de un conjunto de ecuaciones ideadas para predecir la evolución de las variables y describir la dinámica del sistema. Los parámetros adimensionales de las ecuaciones (Reynolds, Froude, Shields, Richardson, etc.) caracterizan el sistema físico incorporando los factores esenciales que rigen el problema y ayudando a identificar la importancia de las variables dinámicas en el modelo. El conocimiento de las relaciones entre estos parámetros puede ayudar a simplificar las ecuaciones o seleccionar el marco apropiado para problemas específicos.

Una vez establecido, un modelo puede ayudar a predecir la evolución de las variables para fines prácticos, explorar las causas y consecuencias de los diferentes mecanismos que controlan el flujo, y ayudar a plantear nuevas preguntas de investigación y diseñar nuevos experimentos. Por lo tanto, los modelos no sólo pueden responder a las preguntas aplicadas que implican la predicción y la evaluación de posibles escenarios, sino que pueden proporcionar conocimientos cuantitativos para comprender aspectos de la dinámica del sistema, por ejemplo:

- a. Pueden revelar patrones y auto-organización. Los modelos pueden descubrir complejas interacciones de procesos que ocurren en un sistema de jerárquico de escalas. Aunque los modelos de alta fidelidad también pueden revelar formas características de auto-organización (por ejemplo, estructuras coherentes en la turbulencia y el desarrollo de formas de fondo), la auto-organización y formación de patrones son objetivos de RCM.
- b. A través de modelos numéricos podemos identificar umbrales de parámetros adimensionales que caracterizan transiciones en la dinámica del sistema.
- c. Podemos reconocer mecanismos de transporte y estructuras coherentes predominantes. Usando simulaciones podemos entender los mecanismos de control del transporte y la mezcla en el flujo que dan forma a los patrones a gran escala.
- d. Los modelos proporcionan información sobre las interacciones del flujo con los bordes físicos y el transporte de sedimentos en lechos móviles.
- e. Las simulaciones numéricas producen información diferente en comparación con los experimentos. Una vez validados, y dependiendo de las variables y la resolución del modelo, pueden ser utilizados para investigar partes del sistema o procesos que son experimentalmente inaccesibles o que no pueden medirse directamente.

La filosofía global de este trabajo es entonces la siguiente: más no es mejor, es decir, los modelos numéricos muy detallados y complejos no son necesariamente mejores para todas las situaciones. La base más pragmática para decidir cómo representar un sistema real es decidir si el costo y la cantidad significativa de datos adicionales que son necesarios para implementar un modelo más detallado realmente proporcionarán nuevos conocimientos. En un nivel más fundamental, podemos preguntar si hay valor en el uso de un modelo más simple, incluso si los costos computacionales no son una limitación. La motivación para hacerlo se vuelve más clara si preguntamos "¿hay valor en identificar y comprender cuál es el conjunto mínimo de procesos necesarios que hay que considerar para producir un fenómeno dado?".

Selección del modelo

En la actualidad no existe un método sistemático para definir el modelo apropiado para un fenómeno específico en la naturaleza. En la práctica, uno se basa en la intuición y la experiencia y en ensayo y error. Por otra parte, siempre parece más seguro incluir más detalles - hay un "principio de precaución" en el que incluir detalles innecesarios no hace daño, mientras que dejar de lado algo esencial claramente lo hace. Como se mencionó anteriormente, uno de nuestros objetivos principales en este artículo es resistir esta suposición. En nuestra opinión, hacer un modelo más complejo de lo necesario para el problema en cuestión no sólo hace más lento los cálculos, sino que también detiene el avance del conocimiento.

Werner (1999) propuso algunas pautas generales para cuando los RCMs son viables, y argumentó que en muchos sistemas morfodinámicos el comportamiento en las escalas en las que se desarrollan patrones como barras y formas de fondo está ampliamente dissociado de los detalles de la dinámica subyacente. Los modelos recientes de Escauriaza & Sotiropoulos (2011a) y Khosronejad & Sotiropoulos (2014) muestran, por otro lado, que si uno está interesado en los detalles de la formación de estas formas de fondo, se requiere un alto nivel de resolución de turbulencia. Si bien hay espacio para el debate sobre la medida en que la dinámica de nivel superior es independiente de los detalles de la dinámica de nivel inferior a través de los sistemas morfodinámicos, pensamos que hacer la pregunta es una buena manera de empezar a pensar si un sistema dado es susceptible al enfoque de RCM.

Para grandes escalas espaciales y temporales, el uso de una formulación uniforme local 1D representada sólo por una intermitencia simple del caudal permite resolver muchos problemas complejos, aunque los términos advectivos pueden llegar a ser importantes. Los modelos 1D proporcionan una técnica rápida y poco costosa para obtener una buena aproximación de la dinámica de la superficie libre, cuando no se ve afectada por las características de flujo 3D. Como señala Keylock et al. (2005), los problemas que dependen de cantidades gruesas, como el efecto caudal máximo en el riesgo de inundación, no se benefician de tener un campo turbulento resuelto con LES, o un enfoque similarmente detallado. En algunos problemas a gran escala, sin embargo, puede ser útil comprender los procesos a pequeña escala, como se analiza en la siguiente sección.

A medida que avanzamos hacia modelos morfodinámicos de mayor fidelidad, el aspecto más importante se convierte en la influencia de la turbulencia en el problema en cuestión. Si los detalles de la dinámica del flujo turbulento, especialmente características como estructuras coherentes, controlan los procesos de interés, necesitamos modelos capaces de capturar las principales características del flujo. Los modelos URANS con turbulencia isotrópica son aproximaciones simples para representar campos de flujo 3D en ríos, y métodos más complejos pueden ser incorporados cuando la anisotropía de turbulencia es significativa. Los casos en que la anisotropía es grande incluyen importantes fenómenos fluviales tales como flujos secundarios y separación. La disipación introducida por los modelos de turbulencia URANS dificulta la solución numérica a medida que aumentamos la resolución de la malla.

Cuando las fluctuaciones instantáneas de la turbulencia a escalas más pequeñas juegan un papel significativo en la dinámica del flujo, la mejor alternativa es emplear formulaciones LES o híbridas. Sin embargo, estas simulaciones pueden resultar computacionalmente caras, ya que se

requieren mallas muy finas en altos números de Reynolds. Es importante señalar que las condiciones de borde en estos modelos 3D también pueden introducir errores adicionales a las soluciones numéricas.

Proponemos entonces las siguientes sugerencias para seleccionar un modelo:

- a. El enfoque RCM se aplica mejor a los estudios de auto-organización y formación de patrones en condiciones en que la dinámica esencial del proceso no es sensible a los detalles de la mecánica subyacente. El enfoque RCM es especialmente adecuado para estudios exploratorios donde el objetivo es averiguar si un determinado conjunto de procesos puede incluso capturar cualitativamente el fenómeno en cuestión.
- b. Si el foco está en grandes escalas de espacio y tiempo, donde el caudal, pendiente, distribución diámetros de sedimentos, etc. dominan la morfología del sistema fluvial, entonces formulaciones simples pueden proporcionar una buena cantidad de información (RCM y modelos de difusión). Para la propagación de inundaciones, las ecuaciones de St. Venant constituyen una buena aproximación.
- c. Cuando los efectos 3D de los bordes o condiciones iniciales influyen en la dinámica del sistema, y especialmente cuando la hipótesis de la presión hidrostática falla, el problema requiere una formulación 3D para el flujo.
- d. URANS es la alternativa más conveniente para los flujos 3D, excepto cuando los vórtices producen flujos altamente anisotrópicos (por ejemplo en capas de corte, separación, curvatura, etc.). En estos casos, LES o URANS/LES serían las mejores opciones para resolver el flujo.
- e. LES o DNS son sólo necesarios cuando la estructura fina de la turbulencia es el mecanismo fundamental para explicar el fenómeno de interés, es decir, en el transporte de partículas individuales o en la formación de formas de fondo en lechos de arena.

4. SÍNTESIS DE MODELOS

Si tuviéramos gran capacidad de cálculo, utilizar modelos muy detallados es muy poco práctico sobre escalas planetarias de tiempo y espacio, o para ejecutar miles de realizaciones de modelos en estudios tipo Monte Carlo para posibles escenarios futuros. Encontrar la forma más simple de representar la dinámica de un flujo no sólo ayuda en el avance del conocimiento, sino que tiene también una gran recompensa de satisfacción intelectual, al entender procesos fundamentales de la dinámica fluvial en la naturaleza.

Una idea interesante es evaluar cómo los modelos de diferentes complejidades pueden ser utilizados en conjunto para mejorar las predicciones. Una alternativa, partiendo de un paradigma de modelado clásico de integración, es utilizar el método de "refinamiento progresivo". En esencia, esto implica comenzar con un modelo de complejidad reducida y luego, basado en sus predicciones, agregar sistemáticamente refinamientos del modelo (complejidad) hasta el punto en que se resuelven los problemas de interés. En este contexto, el refinamiento del modelo implica pasar de parámetros constantes a variables, sustituyendo el transporte de difusión por el transporte advectivo-difusivo, o mejorando la resolución del modelo de turbulencia.

Nuestro punto de vista para la construcción y el uso de modelos también debe incluir la posibilidad de revertir el procedimiento de refinamiento para permitir el aumento progresivo.

Aquí nuestra visión es que el punto de partida es un modelo de alta fidelidad que proporciona una reproducción detallada de la física. La comprensión de los mecanismos físicos que subyacen a este fenómeno obtienen al deconstruir sistemáticamente la complejidad. Esto se podría hacer para generar reglas en RCMs. En cada paso, el nivel de complejidad anterior informa a los elementos clave del modelo de orden inferior resultante.

5. PREGUNTAS PARA CONCLUIR

Quisiéramos cerrar este artículo con dos preguntas que esperamos ayuden a mejorar el desarrollo futuro de modelos:

1. ¿Pueden aplicarse las lecciones aprendidas de las aproximaciones sucesivas desarrolladas a lo largo de los años en la investigación de la turbulencia al enfoque de RCM? ¿Es la turbulencia una buena metáfora para los métodos que permiten incorporar la dinámica de pequeña escala en los modelos a gran escala?

Creemos que los mismos conceptos fundamentales utilizados en los modelos de turbulencia pueden ayudar a mejorar los modelos desarrollados para sistemas morfodinámicos no lineales complejos. Desarrollos iniciales han avanzado con éxito en la comprensión de los efectos de pequeña escala en la dinámica de escalas más grandes. El modelo de evolución del terreno de Passalacqua et al. (2006), por ejemplo, incorporó una parametrización de la escala de submalla morfodinámica, considerando los efectos de las fluctuaciones sobre la erosión, en analogía con las formulaciones LES. Paola (1996) consideró la variabilidad inherente de las escalas espaciales no resueltas para estimar los cambios estocásticos del esfuerzo de corte y mejorar la descripción de la descarga de sedimentos y las características morfológicas de ríos trenzados.

Para describir la dinámica a gran escala de la superficie terrestre que usen ideas similares a los modelos de turbulencia, los temas importantes necesitarán ser tratados son los siguientes:

a. Auto-similaridad: Los sistemas de la superficie terrestre presentan invarianza para un amplio rango de escalas espaciales en muchas variables observables o momentos estadísticos que describen estos sistemas. Similar a la transferencia de energía cinética a vórtices más pequeños más pequeños y más isotrópicos, necesitaremos entender las conexiones entre las escalas en estos otros sistemas, y formular hipótesis de los mecanismos de transferencia (análogos a la cascada de energía en turbulencia).

b. Espacio de parámetros: También es importante identificar los parámetros adimensionales que se pueden utilizar para caracterizar las transiciones y la dinámica de estos sistemas. Los modelos pueden ser utilizados para llevar a cabo estudios sistemáticos y explorar la importancia de diferentes efectos sobre la dinámica, variando las escalas y también las magnitudes de los parámetros. En analogía con el número de Reynolds en los flujos turbulentos, parámetros tales como la relación de ancho a profundidad en los ríos trenzados, Shields, número de Rouse o granularidad (Paola et al., 2009) han demostrado que pueden usarse para caracterizar la invarianza de escalas. Sería interesante explorar estas condiciones son universales, y cómo se pueden emplear para mejorar los modelos de evolución del terreno o de ríos.

2. ¿Podemos desarrollar métodos sistemáticos para el uso de modelos de alta fidelidad que informen a RCMs?

Esta sería la mejor manera de resolver la mayor debilidad de los RCMs, pero requeriría nuevos niveles de cooperación entre áreas dispares, y nuevas formas de formular problemas para poder determinar cómo se beneficiarían los modelos más sintéticos. Del mismo modo, un modelo simple bien formulado podría proporcionar información para evaluar las condiciones críticas en las que se necesita el esfuerzo de un modelo de alta fidelidad

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido apoyado por los proyectos Fondecyt 1130940 y CONICYT/FONDAP 15110017.

REFERENCIAS

Asahi, K, Shimizu, Y, Nelson, J & Parker, G 2013, 'Numerical simulation of river meandering with self-evolving banks'. *J. Geophys. Res.* 118, 2208-2229.

Contreras, MT, Müllendorff, D, Pastén, P, Pizarro, GE, Paola C & Escauriaza, C 2015, 'Potential accumulation of contaminated sediments in a reservoir of a high-Andean watershed: Morphodynamic connections with geochemical processes'. *Water Resour. Res.* 51, 3181-3192.

Cui, Y, Parker, G & Paola, C 1996, 'Numerical simulation of aggradation and downstream fining'. *J. Hydraul. Res.*, 34, 185-204.

Cui, Y, Parker, G, Braudrick, C, Dietrich, WE & Cluer, B 2006, 'Dam Removal Express Assessment Models (DREAM). Part 1: Model development and validation'. *J. Hydraul. Res.* 44, 291-307.

Cui, Y, Braudrick, C, Dietrich, WE, Cluer, B & Parker G 2006, 'Dam Removal Express Assessment Models (DREAM). Part 2: Sample runs/sensitivity tests'. *J. Hydraul. Res.* 44, 308-323.

Doeschel-Wilson, AB & Ashmore, PE 2005, 'Assessing a numerical cellular braided stream model with a physical model'. *Earth Surf. Process. Landf.* 30, 519-540.

Duc, BM & Rodi, W 2008, 'Numerical simulation of contraction scour in an open laboratory channel'. *J. Hydraul. Eng.*, 134, 367-377.

Engelund, F & Hansen, E 1972, *A Monograph on Sediment Transport*, Copenhagen: Teknik Forlaget, Denmark.

Escauriaza, C & Sotiropoulos, F 2011b, 'Lagrangian model of bed-load transport in turbulent junction flows', *J. Fluid Mech.* 666, 36-76.

Escauriaza, C & Sotiropoulos, F 2011c, 'Reynolds number effects on the coherent dynamics of the turbulent horseshoe vortex system', *Flow Turbul. Combust.* 86, 231-262.

Ferguson, R I 2003, 'The missing dimension: Effects of lateral variation on 1-D calculations of fluvial bedload transport', *Geomorphology*, 56, 1-14.

Ferguson, RI & Church, M 2009, 'A critical perspective on 1-D modeling of river processes: Gravel load and aggradation in lower Fraser River', *Water Resour. Res.*, 45, W11424.

Ge, L, Lee, SO, Sotiropoulos, F & Sturm, TW 2005, '3D Unsteady RANS modeling of complex hydraulic engineering flows. Part II: Model Validation and Flow Physics'. *J. Hydraul. Eng.*, 131, 809-820.

González, C, Richter, DH, Bolster, D, Bateman, S, Calantoni J & Escauriaza, C. 2017 'Characterization of bedload intermittency near the threshold of motion using a Lagrangian sediment transport model'. *Environ. Fluid Mech.*, 17, 111-137.

Guerra, M, Cienfuegos, R, Escauriaza, C, Marche, F & Galaz, J 2014, 'Modeling Rapid Flood Propagation over Natural Terrains using a Well-Balanced Scheme'. *J. Hydraul. Eng.* 140, 04014026.

Ji, C, Munjiza, A, Avital, E, Ma, J & Williams, JJR 2013 'Direct numerical simulation of sediment entrainment in turbulent channel flow'. *Phys. Fluids* 25, 056601.

Kang, S, Lightbody, A, Hill, C & Sotiropoulos, F 2011, 'High-resolution numerical simulation of turbulence in natural waterways'. *Adv. Water Res.* 34, 98-113.

Keylock, CJ, Hardy, RJ, Parsons, DR, Ferguson, RI, Lane, SN & Richards, KS 2005, 'The theoretical foundation and potential for large-eddy simulation (LES) in fluvial geomorphic and sedimentological research'. *Earth-Sci. Rev.* 71, 271-304.

Kidanemariam, AG & Uhlmann, M 2014, 'Direct numerical simulation of pattern formation in subaqueous sediment'. *J. Fluid Mech.* 750, 1-13.

Khosronejad, A & Sotiropoulos, F 2014, 'Numerical simulation of sand waves in a turbulent open channel flow'. *J. Fluid Mech.* 753, 150-216.

Kostic, S & Parker G 2003a, 'Progradational sand-mud deltas in lakes and reservoirs. Part 1. Theory and numerical modeling', *J. Hydraul. Res.*, 41, 127-140.

Kostic, S & G. Parker G 2003b, 'Progradational sand-mud deltas in lakes and reservoirs. Part 2. Experiment and numerical simulation'. *J. Hydraul. Res.*, 41, 141-152.

Lane, EW 1955. 'Design of stable channels'. *Trans. ASCE* 120, 1234-1279.

- Lane, SN, Bradbrook, KF, Richards, KS, Biron, PA & Roy, AG 1999, 'The application of computational fluid dynamics to natural river channels: three-dimensional versus two-dimensional approaches'. *Geomorphology* 29, 1-20.
- Liang, M, Voller, VR & Paola, C 2015a, 'A reduced-complexity model for river delta formation – Part 1: Modeling deltas with channel dynamics'. *Earth Surf. Dynam.* 3, 67-86.
- Martin, Y, Church, M 1997, 'Diffusion in landscape development models: On the nature of basic transport relations'. *Earth Surf. Proc. Land.* 22, 273-279.
- McCoy, A, Constantinescu, G, Weber, LJ 2008, 'Numerical investigation of flow hydrodynamics in a channel with a series of groynes'. *J. Hydraul. Eng.* 134, 157-172.
- Murray, AB & Paola, C 1994, 'A cellular model of braided rivers'. *Nature*, 371, 54-57.
- Murray, AB & Paola, C 1997, 'Properties of a cellular braided-stream model'. *Earth Surf. Proc. Land.*, 22, 1001-1025.
- Nagata, N, Hosoda, T, Nakato, T & Muramoto, Y 2005, 'Three-dimensional numerical model for flow and bed deformation around river hydraulic structures'. *J. Hydraul. Eng.*, 131, 1074-1087.
- Nicholas, AP 2010, 'Reduced-complexity modeling of free bar morphodynamics in alluvial channels'. *J. Geophys. Res.*, 115, F04021.
- Paola, C, Heller, PL & Angevine, CL 1992, 'The large-scale dynamics of grain-size variation in alluvial basins 1: Theory'. *Basin Res.*, 4, 73-90.
- Paola, C 1996, 'Incoherent structure: turbulence as a metaphor for stream braiding', in *Coherent Flow Structures in Open Channels*, eds. P Ashworth, SJ Bennett, JL Best & SJ McLelland, pp. 705-723, John Wiley & Sons, Chichester.
- Paola, C & Voller, VR 2005, 'A generalized Exner equation for sediment mass balance'. *J. Geophys. Res.*, 110, F04014.
- Paola, C, Straub, K, Mohrig, D & Reinhardt, L 2009, 'The "unreasonable effectiveness" of stratigraphic and geomorphic experiments'. *Earth-Sci. Rev.* 97, 1-43.
- Papanicolaou, AN, Bdour, A & Wicklein, E 2004, 'One-dimensional hydrodynamic/sediment transport model applicable to steep mountain streams'. *J. Hydraul. Res.*, 42, 357-375.
- Parker, G, Paola, C, Whipple, KX & Mohrig D 1998, 'Alluvial fans formed by channelized fluvial and sheet flow. I: Theory'. *J. Hydraul. Eng.* 124, 985-995.
- Passalacqua, P, Porté-Agel, F, Foufoula-Georgiou, E & Paola, C 2006, 'Application of dynamic subgrid-scale concepts from large-eddy simulation to modeling landscape evolution'. *Water Resour. Res.* 42, W06D11.

Pope, SB 2000 *Turbulent Flows*. Cambridge University Press.

Roulund, A, Sumer, BM, Fredsøe F & Michelsen, J 2005, 'Numerical and experimental investigation of flow and scour around a circular pile'. *J. Fluid Mech.*, 534, 351-401.

Sandbach, SD, Lane, SN, Hardy, RJ, Amsler, ML, Ashworth, PJ, Best, JL, Nicholas, AP, Orfeo, O, Parsons, DR, Reesink, AJH & Szupiany, RN 2012, 'Application of a roughness-length representation to parameterize energy loss in 3D numerical simulations of large rivers'. *Water Resour. Res.* 48, W12501.

Seybold, H, Andrade, JS & Herrmann HJ 2007, 'Modeling river delta formation'. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 104, 16804-16809.

Soldati, A & Marchioli, C 2012, 'Sediment transport in steady turbulent boundary layers: Potentials, limitations, and perspectives for Lagrangian tracking in DNS and LES'. *Adv. Water Res.* 48, 18-30.

Stecca, G, Siviglia, A & Blom, A 2014, 'Mathematical analysis of the Saint-Venant-Hirano model for mixed-sediment morphodynamics'. *Water Resour. Res.* 50, 2014WR015251.

Stoesser, T. (2014), Large-eddy simulation in hydraulics: Quo Vadis? *J. Hydraul. Res.*, 52, 441-452.

Toro, EF 2001, *Shock-Capturing Methods for Free-Surface Shallow Flow*. John Wiley and Sons, UK.

Tucker, GE & Hancock, GR 2010, 'Modeling landscape evolution'. *Earth Surf. Proc. Land.* 35, 28-50.

Verhaar, PM, Biron, PM, Ferguson, RI & Hoey, TB 2008, 'A modified morphodynamic model for investigating the response of rivers to short-term climate change'. *Geomorphology*, 101, 674-682.

Viparelli, E, Sequeiros, O, Cantelli, A, Wilcock, PR & Parker, G 2010, 'Modeling of river morphodynamics with creation/consumption of grain size stratigraphy. Part 2: Numerical model'. *J. Hydraul. Res.*, 48, 727-741.

Werner BT 1999, 'Complexity in natural landform patterns'. *Science*, 284, 102-104.

Whipple K & Tucker G 2002, 'Implications of sediment-flux dependent river incision models for landscape evolution'. *J. Geophys. Res.* 107, B2, 2039.

Willgoose, G, Bras, RL & Rodríguez-Iturbe, I 1991, 'A coupled channel network growth and hillslope evolution model: 1. Theory'. *Water Resour. Res.*, 27, 1671-1684.

Wolfram, S 2002, A New Kind of Science. Wolfram Media Inc., Champaign IL.