

Modelización numérica de inundaciones fluviales

Numerical modelling of river inundations

Bladé, E.^{a1}, Cea, L.^b y Corestein, G.^{a2}

^{a1}Instituto Flumen (Universitat Politècnica de Catalunya – Centro Internacional de Métodos Numéricos para la Ingeniería), Jordi Girona 1-3, D1, 08034 Barcelona. E-mail: ^{a1}ernest.blade@upc.edu, ^{a2}georgina.corestein@upc.edu

^bGrupo de Ingeniería del agua y del Medio Ambiente (EGAMA), Departamento de Métodos Matemáticos y de Representación, Universidade da Coruña. E-mail: luis.ce@udc.es

Recibido: 26/06/2014

Aceptado: 24/07/2014

Publicado: 28/07/2014

RESUMEN

La modelización numérica del flujo de agua en ríos es una herramienta que ayuda a dar respuesta a la legislación vigente europea y española referida a riesgo de inundación. Los modelos numéricos disponibles actualmente se encuentran en constante evolución. Mientras hace una década la modelización unidimensional era prácticamente la única alternativa, en el presente se han generalizado los modelos bidimensionales y se empiezan a utilizar los tridimensionales. Gracias a las actuales herramientas SIG, los resultados de la modelización numérica se pueden combinar con datos georreferenciados para realizar una cuantificación sistemática del riesgo de inundación. En este proceso existen aún una serie de desafíos como la consideración de los caudales sólidos y sus efectos en la morfología del cauce, una correcta descripción del flujo en puentes y estructuras, la integración de modelos hidrológicos con los modelos hidráulicos para una mejor consideración de las condiciones de contorno, y finalmente la optimización de las herramientas para disminuir los tiempos de cálculo actuales.

Palabras clave | Inundaciones fluviales; riesgo de inundación; modelización numérica; ríos; modelos bidimensionales; transporte de sedimentos.

ABSTRACT

At the present time there is a strong demand from policy makers for reliable predictions of the effects of climate and land use changes on inundation risk, in order to meet the targets specified in the EU Water Framework Directive. Numerical models are a valuable predictive tool to support decision-making related to the implementation of water and flood risk management strategies. While a decade ago one-dimensional modelling was the most commonly used tool in inundation studies, at the present time the application of two-dimensional models to river inundation modelling is generalized. Combined with GIS tools, the water depth and velocity results of a 2D model can be efficiently combined with land use data in order to quantify the potential damages caused by a certain inundation. Nevertheless, in order to improve the reliability of the numerical predictions, a number of challenges should be addressed in current models, as: modelling the interaction between hydrodynamics, solid loads, and morphologic changes during extreme flood events; a correct characterisation of head losses and flow through bridges with complex geometries; the integration of hydrological and hydraulic models for a better consideration of boundary conditions; and the implementation of efficient parallelization techniques in order to reduce the computational time and increase the scale of the problems which can be addressed with 2D and 3D models.

Key words | River inundation; numerical modelling; river flow; two-dimensional modelling; sediment transport; fluvial habitat.

INTRODUCCIÓN

La publicación de la directiva europea 2007/60/CE de evaluación y gestión de los riesgos de inundación supuso un estímulo considerable para el desarrollo de nuevos métodos y herramientas de modelización numérica de las inundaciones fluviales. En dicha directiva se establecen unos horizontes temporales para la evaluación y elaboración de los mapas de peligrosidad y riesgo, pero también unas obligaciones de actualización de los mencionados resultados. La directiva se transpuso al ordenamiento español a través, principalmente, del Real Decreto 903/2010. El objetivo fundamental de estas normativas es reducir las consecuencias de las inundaciones sobre la salud humana, el medio ambiente, el patrimonio cultural y la actividad económica. En Europa y España, y también en gran parte de otros territorios, las inundaciones constituyen, aun hoy día, uno de los riesgos naturales que producen mayores daños, tanto en términos económicos o de daños materiales, como de pérdida de vidas humanas.

Para satisfacer la legislación vigente relativa a la evaluación de los riesgos potenciales y poder luchar contra los efectos de las inundaciones mediante medidas estructurales, sistemas de alerta, planes de protección civil, o con actuaciones globales como la ordenación del territorio o la modificación hidrológica-forestal de las cuencas, se requiere de una aproximación multidisciplinar y en muchos casos la búsqueda de soluciones dinámicas o evolutivas para ir adaptándose a las condiciones cambiantes que se producen. La modelización numérica es una de las herramientas a utilizar en este tipo de estudios.

En este artículo se presenta una descripción de las principales metodologías de modelización numérica del flujo de agua en ríos para el análisis de zonas inundables. Sin embargo, antes de empezar, es conveniente hacer una reflexión. En primer lugar, conviene recordar que la modelización numérica no es la única metodología para abordar el problema, y así queda recogido en la misma Directiva Europea o el Real Decreto antes mencionado. En ambos se recoge la necesidad de una evaluación preliminar utilizando principalmente datos o registros históricos, y cualquier otra información que permita deducir el impacto a largo plazo a poder ser considerando el efecto del cambio climático. También se menciona en el Real Decreto la necesidad de incorporar toda la información geomorfológica posible, como se plasma en publicaciones posteriores del Ministerio del Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (MARM, 2011). Por otro lado, respecto de la modelización numérica, hay que destacar el peligro que puede suponer si se utiliza sin unos conocimientos básicos bien asentados, principalmente de hidráulica básica, del flujo en lámina libre y de dinámica fluvial. Estos riesgos vienen asociados a la facilidad de uso de los actuales paquetes de cálculo, ya sean comerciales o no. La gestión del riesgo de inundación y los estudios eco-hidrodinámicos y geomorfológicos han sufrido una considerable transformación en los últimos años precisamente debido a las potentes herramientas numéricas (Knight 2013). Sin embargo no se puede olvidar, como puntualiza Cunge (2014), que hoy más que nunca lo que debería prevalecer es el conocimiento de la física del fenómeno y una clara definición del objetivo ingenieril frente al modelo, que es una herramienta. Él mismo avisa del riesgo que existente en este momento, cuando lo que algunos ingenieros civiles destacan de sí mismos es su capacidad como “operadores de software”, tendiendo a obviar algunos aspectos fundamentales en toda modelización numérica como saber discernir si el problema está bien planteado o no, la validez de las hipótesis de las ecuaciones básicas, o la necesidad o no de calibración para cada caso. Esta invitación a ser rigurosos en el uso de la modelización numérica no debe conducirnos al extremo opuesto: a pesar de la falta de adecuación de las ecuaciones, de los errores siempre presentes en la geometría o parámetros del modelo, o incluso de problemas asociados con la operatividad del propio modelo, la modelización numérica es de gran utilidad a la hora de resolver un problema de ingeniería o emitir un diagnóstico, siempre y cuando se tenga el criterio suficiente para interpretar los resultados en su justa medida.

MODELIZACIÓN NUMÉRICA DE LA HIDRODINÁMICA DE RÍOS

La modelización numérica de la hidrodinámica de ríos precisa del uso de teoría hidráulica del flujo en lámina libre y de los métodos numéricos para resolver las ecuaciones de conservación, el conjunto se ha definido recientemente como hidrodinámica. El continuo desarrollo de la arquitectura de los ordenadores en las últimas décadas, con máquinas cada vez más rápidas y potentes, ha propiciado también el desarrollo de nuevas técnicas numéricas. Aunque el campo de la investigación siempre va por delante de las herramientas a disposición de la comunidad técnica para su uso en la práctica diaria, estas diferencias se han ido acortando en los últimos años debido a interfaces más sencillas en los programas informáticos, y a que cada vez es más rápida la implementación de los últimos desarrollos numéricos en herramientas de uso generalizado. A continuación se presenta una breve descripción del

estado actual de desarrollo de herramientas para la simulación numérica del flujo de agua en ríos orientadas hacia la modelización de inundaciones.

Discretización espacial

Cualquier modelo numérico es una representación simplificada de la realidad. Un aspecto fundamental de los modelos de flujo en ríos es la representación de la topografía del cauce y llanuras de inundación. Existen herramientas de modelización numérica que permiten realizar simulaciones con una aproximación unidimensional (1D), bidimensional (2D) o tridimensional (3D). Como ya se ha mencionado en la introducción, conviene discernir entre la mejor opción en cada caso. Contrariamente a lo que se supone muchas veces, la modelización en un mayor número de dimensiones (2D contra 1D, o 3D contra 2D) no implica necesariamente mejores resultados, pudiendo ser en algún caso contraproducente (Knight, 2013). En cualquier caso, 1D, 2D o 3D, los resultados van a depender principalmente de las ecuaciones que se resuelvan (y por tanto de sus hipótesis básicas), del esquema numérico utilizado para resolverlas, de la discretización espacial que se realice de la geometría, de las condiciones de contorno utilizadas y, como principal parámetro, de la rugosidad del terreno. Ningún resultado de ninguna modelización numérica debería aceptarse sin una adecuada reflexión y conocimiento acerca de estos cinco aspectos.

En la modelización numérica debería tenderse a incluir explícitamente cada proceso que sea relevante en el modelo, y los que no sean relevantes no considerarlos. Sin embargo, en la práctica a veces algunos procesos que sí son relevantes se obvian, y se pretende considerar su efecto a través de un único parámetro. Esto ocurre a menudo con la rugosidad, cuando ésta se modela con la ecuación de Manning, es decir, con un único parámetro n : la rugosidad pierde el significado primitivo que tiene en mecánica de fluidos de pura disipación de energía por fricción con las paredes, para convertirse en una manera de modelizar las pérdidas de energía debidas a todos los procesos que se no se consideran explícitamente en el modelo, como turbulencia, fuerzas de arrastre, fenómenos locales, etc (Morvan *et al.*, 2008) y pasa a convertirse un parámetro de calibración del modelo.

Modelos unidimensionales

Los modelos unidimensionales han sido y son los más utilizados desde que la modelización numérica del flujo en ríos empezó a utilizarse a partir de mediados del s. XX. En una dimensión lo habitual es considerar el río como una línea, con una serie de puntos de cálculo que son las secciones transversales, de manera que la geometría del cauce es una propiedad de cada punto de cálculo o sección (Figura 1, izquierda). En este caso las hipótesis básicas que más influyen los resultados del modelo son: 1) el flujo de agua se produce en el sentido del eje del río y es perpendicular a cada sección transversal; 2) la cota de agua es constante en cada sección; 3) la velocidad del agua es constante en cada sección. Si bien existen correcciones para relajar esta última simplificación, dichas correcciones se basan en parametrizaciones teóricas de la distribución de velocidad en una sección transversal que a menudo no se cumplen en la realidad, especialmente en geometrías complejas o cuando la curvatura del cauce es relevante.

Un problema típico de los modelos 1D es la definición de las secciones transversales cuando existen llanuras de inundación importantes y el cauce principal tiene cierta curvatura. En estos casos es difícil definir las secciones de forma que se cumpla la primera hipótesis (flujo perpendicular a la sección) y sin que las secciones transversales se superpongan entre sí (Figura 1, izquierda). Todavía más crítico en estos casos es el hecho de que la velocidad del agua es muy variable dentro de cada sección, siendo habitual la existencia de zonas muertas difíciles de definir *a priori*, y pudiendo incluso existir zonas de recirculación, con formación de vórtices. Algunos modelos 1D incluyen parámetros para considerar de forma aproximada estos efectos, que no dejan de ser simplificaciones muy difíciles de evaluar *a priori*.

Los modelos 1D comportan una considerable facilidad en cuanto a creación y ejecución del modelo cuando se compara con otras opciones, sobre todo en régimen permanente. En este caso, sin duda el programa de referencia es HEC-RAS, del Hydrologic Engineering Center del U.S. Army Corps of Engineers, que no requiere presentación. El programa es gratuito y puede descargarse de la web del HEC, permite realizar cálculos en régimen permanente (usa el método paso a paso), en régimen variable (en este caso utiliza el esquema de Preissmann y por consiguiente tiene limitaciones para cambios de régimen y régimen rápido) tanto en dominios puramente unidimensionales como cuasi-bidimensionales. Otra herramienta de simulación 1D de uso relativamente

extendido ha sido el programa Mike-11, del Danish Hydraulic Institute, que tuvo su mayor auge antes que HEC-RAS incorporara la opción de régimen variable

Modelos Cuasi-2D

Con el objetivo de incorporar la llanura de inundación de una manera simplificada pero efectiva, en la década de los 70 se desarrolló un método para considerar las áreas anexas al cauce principal como una serie de celdas o depósitos conectados entre sí (Figura 1, derecha). El flujo de agua entre estos depósitos se calcula con ecuaciones simplificadas (Cunge, 1975; Hunter *et al.*, 2006). Esta simplificación resulta efectiva cuando en la zona de llanura no se requiere el detalle del campo de velocidades, sino que el objetivo es conocer únicamente los niveles de la lámina de agua y consideraren el cálculo la laminación generada por las llanuras de inundación.

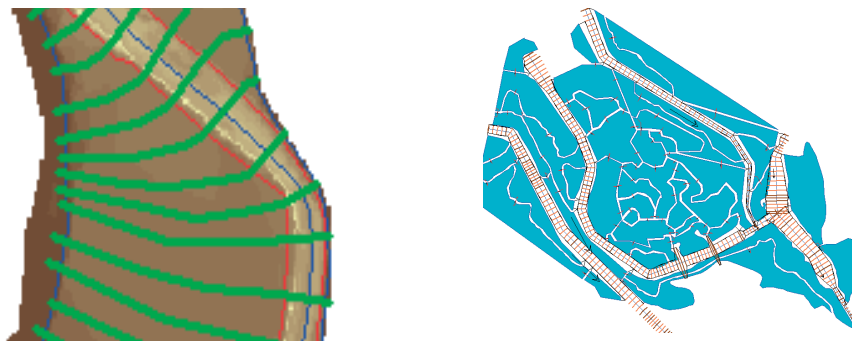


Figura 1| Aproximación 1D (izquierda) y Cuasi-2D (derecha)

Modelos bidimensionales

En dos dimensiones el río ya no se discretiza como una línea con una serie de secciones transversales, sino como una malla formada por una serie de celdas poligonales que representan la topografía del cauce y llanuras de inundación. Dicha malla puede ser regular o irregular, estructurada o no estructurada. La mayor flexibilidad para una buena representación de la geometría y contornos se suele conseguir con una malla irregular. Lo habitual es que las mallas estén formadas por triángulos o cuadriláteros (Figura 2, izquierda).

En ocasiones ha resultado útil la combinación de esquemas 1D y esquemas 2D para aprovechar en cada zona del dominio las ventajas más relevantes de cada uno de ellos: menor tiempo computacional en 1D pero mayor precisión en 2D. En este caso existen distintas maneras de realizar la conexión entre el dominio 1D y 2D (Verwey, 2001), Finaud-Guyot *et al.*, 2011), Bladé *et al.*, 2012), Morales-Hernández *et al.*, 2013). Existen modelos comerciales que permiten dicha aproximación mixta (Mike-Flood, SOBEK) pero requieren un trabajo laborioso por parte del usuario para realizar la conexión entre dominios, por lo que en la práctica se suele optar por una u otra aproximación íntegramente en todo el dominio. En la modelización en dos dimensiones, habitualmente el proceso que requiere de una mayor carga de trabajo es precisamente la generación de una buena malla de cálculo adaptada al caso de estudio.

Actualmente los modelos 2D están teniendo una gran aceptación. Los desarrollos en arquitectura de ordenadores de los recientes años permiten que ahora se pueda abordar en dos dimensiones estudios de unas dimensiones y complejidad inviables hace pocos años. Este desarrollo incesante provoca también que las herramientas disponibles estén en constante evolución. Continuamente surgen nuevos programas, o mejoran los existentes, por los que en pocos años el panorama puede alterarse significativamente. En cambio, para grandes extensiones los modelos 3D son por un lado aún muy costosos computacionalmente, y por otro tienen ciertas

limitaciones que condicionan su aplicabilidad. En cuanto modelos 2D, los pioneros fueron Mike-21 (del DHI) y Sobek (de Delft-Hydraulics, ahora Deltares). Ambos utilizaban esquemas en diferencias finitas de direcciones alternadas, muy parecidos entre sí, aunque desde hace unos años Mike-21 incorpora también un módulo en volúmenes finitos.

Como modelos en elementos finitos destacarían al principio los distintos módulos de cálculo del modelo americano SMS (RMA2 y HIVEL2D) y el modelo Telemac (Hervouet, 2000) desarrollado en el Laboratoire National d'Hydraulique, un departamento de Electricité de France. Éste último es ahora de código abierto, e incorpora asimismo módulos para simulaciones 3D.

Como se ha dicho, la técnica de los volúmenes finitos ha permitido que en las últimas décadas se desarrollaran esquemas numéricos robustos, fiables, conservativos que representan unas herramientas de utilidad para problemas de dinámica fluvial y evaluación de zonas inundables. Así como hace 10 años no existían programas mínimamente amigables que utilizaran esta técnica, hoy hay un gran número de ellos disponibles, ya sean comerciales, o de uso público. Iber (Bladé *et al.*, 2014) es un modelo numérico bidimensional de simulación de flujo turbulento en lámina libre en régimen no-permanente y de procesos medioambientales en hidráulica fluvial, que se distribuye gratuitamente a través de la página www.iberaula.es. El rango de aplicación de Iber abarca la hidrodinámica fluvial, la simulación de rotura de presas, la evaluación de zonas inundables, el cálculo de transporte de sedimentos y el flujo de marea en estuarios. Iber se desarrolló en colaboración por el Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, GEAMA (Universidad de A Coruña, UDC) y el Instituto FLUMEN (Universitat Politècnica de Catalunya, UPC, y Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, CIMNE). El modelo Iber surgió como respuesta al interés mostrado por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX en disponer de una herramienta flexible y adaptable que facilitara la aplicación de la legislación sectorial vigente en materia de aguas.

Otro programa europeo que utiliza volúmenes finitos es Infoworks 2D, que fue inicialmente desarrollado por H.R. Wallingford pero hoy es comercializado por la empresa Innowyze. La tendencia que había en Estados Unidos hacia los esquemas en elementos finitos se ha visto alterada también a favor de los volúmenes finitos con la aparición de FLO-2D.

Modelos tridimensionales

La utilización de modelos tridimensionales para el cálculo de zonas inundables es mucho menos común que la de los modelos 1D y 2D, debido a que la extensión espacial del modelo requeriría la utilización de mallas de cálculo de varios millones de elementos, con un coste computacional muy elevado. Los modelos 3D aplicados a hidráulica fluvial se suelen restringir al estudio del flujo local en meandros o en torno a estructuras hidráulicas como pilas de puentes, vertederos o compuertas.

Los modelos 3D utilizan distintos tipos de discretización espacial, la cual suele estar relacionada con el método utilizado para el tratamiento de la lámina libre. Una posibilidad muy extendida es la utilización de capas sigma (Phillips, 1957) para generar la discretización vertical. Este tipo de discretización consiste en una malla 2D horizontal a partir de la cual se generan un número determinado de capas en la dirección vertical. Dichas capas tienen un espesor variable y se distribuyen entre el fondo y la lámina libre. El espesor de todas las capas varía durante el cálculo de forma que el contorno de la capa superior coincide en cada momento con la lámina libre. Este tipo de discretización es la utilizada por el modelo Delft3D, uno de los más extendidos en aplicaciones medioambientales en hidráulica fluvial y costera, y tiene la ventaja de poder capturar de forma precisa la forma de la lámina de agua con un número pequeño de capas (Cea *et al.*, 2009; Stelling y Zijlema, 2003). Sin embargo, para poder definir de forma precisa la variación del campo de velocidades en profundidad es necesario utilizar normalmente del orden de 25 capas.

Otra posible discretización utilizada en modelos 3D es utilizar de una malla tridimensional fija (ya sea estructurada o no estructurada), y definir la posición de la lámina de agua a partir del valor de una variable definida en cada elemento de la malla. Un método de este tipo es el Volume-of-Fluid (VOF), desarrollado originalmente por Hirt and Nichols (1981) para mallas estructuradas Cartesianas y adaptado posteriormente por un gran número de investigadores a otro tipo de mallas. Este tipo de discretización tiene la ventaja de poder capturar formas de la lámina de agua muy complejas, y el inconveniente de que es necesario utilizar mallas relativamente finas para definir de forma precisa la posición de la lámina de agua, lo cual puede incrementar de forma importante el número de elementos de la malla y el tiempo de cálculo. Este método es el utilizado en el modelo Flow3D, el cual ha sido utilizado en un gran número de aplicaciones de ingeniería hidráulica, fluvial y medioambiental, incluido el cálculo de zonas inundables (www.flow3d.com).

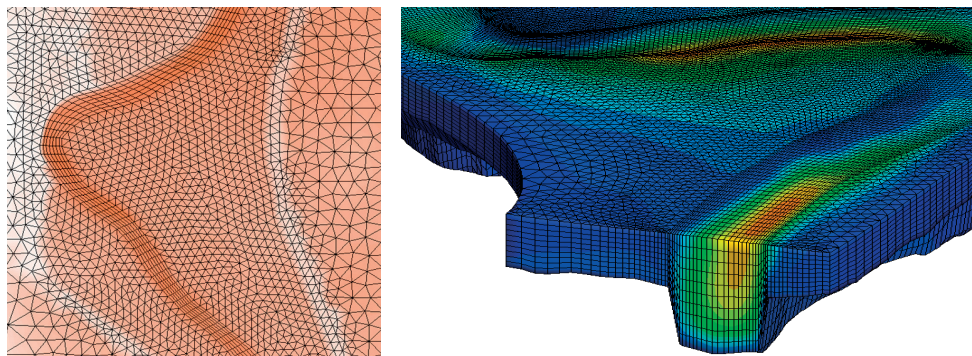


Figura 2| Malla 2D estructurada en el cauce y no estructurada en llanuras (izquierda) y 3D (derecha).

Ecuaciones y esquemas numéricos

Para resolver numéricamente el flujo en lámina libre en ríos se deben resolver las ecuaciones de conservación de la masa y de la cantidad de movimiento del agua. En función de la aproximación espacial, estas ecuaciones se particularizan de distintas maneras. La simplificación a una dimensión resulta en las ecuaciones de Saint Venant unidimensionales, que suelen deducirse de considerar conservación de la masa y conservación de la cantidad de movimiento entre dos secciones contiguas del río. En dos dimensiones las ecuaciones de Saint Venant bidimensionales se obtienen generalmente de las ecuaciones de Navier-Stokes, realizando primero un promedio temporal (ecuaciones de Reynolds) y luego promediando en la profundidad (Chaudhry, 2008). En 3D se suelen resolver directamente las ecuaciones de Reynolds.

En 1D es importante también la aproximación temporal que se realice. Si se opta por régimen permanente, lo más sencillo es resolver la ecuación del régimen gradualmente variado con el método *paso a paso* o similar, como se detalla por ejemplo en el Manual de Referencia Hidráulico de Hec-Ras, mientras que en régimen variable es necesario resolver las ecuaciones generales del flujo variable en lámina libre o ecuaciones de Saint Venant. Lo segundo representa un reto numérico considerable comparado con lo primero, y en muchas ocasiones requiere de simplificaciones o métodos numéricos que pueden implicar resultados menos precisos en zonas con cambios de régimen, o bien para hidrogramas puntiagudos. Por ejemplo, el clásico esquema de Preissmann, utilizado por el software Hec-Ras en su módulo de régimen variable, presenta inestabilidades en los cambios de régimen y para régimen rápido. Por ello son necesarias técnicas de estabilización (HEC-RAS utiliza el método de la Local Partial Inertia) que consiguen que el programa calcule, pero a cambio de sacrificar la precisión en las zonas problemáticas.

Para resolver las ecuaciones de Saint Venant (en 1D o 2D) y las de Reynolds (en 3D) se han usado tradicionalmente distintas familias de métodos numéricos: diferencias finitas, volúmenes finitos o elementos finitos (Chaudhry, 2008). La técnica de diferencias finitas, más simple pero que requiere de una discretización espacial más rígida, fue la primera en emplearse. Más tarde, para conseguir esta mayor flexibilidad, se desarrollaron métodos de elementos finitos, que se siguen utilizando con buenos resultados en 2D y 3D, aunque la tendencia actual se decanta hacia los métodos en volúmenes finitos (Toro, 2001). El uso con éxito del método de los volúmenes finitos para la resolución de las ecuaciones del flujo en lámina libre en régimen rápidamente variado y en geometrías irregulares se produjo a finales de la década de los 90 (Vázquez-Cendón, 1999). Las principales ventajas del método son que utiliza una discretización muy intuitiva, que es un método conservativo y por lo tanto muy adecuado a las ecuaciones que se están resolviendo (conservación de la masa y de la cantidad de movimiento). Además existen varios esquemas numéricos de tipo volúmenes finitos capaces de capturar discontinuidades como resaltos hidráulicos y frentes de onda sin ningún tratamiento especial de las ecuaciones en la zona donde se producen (esquemas tipo *shock capturing*).

La modelización como herramienta para la evaluación y gestión del riesgo

La directiva europea de inundación estableció por primera vez en Europa un marco de referencia sobre lo que se entiende por *peligrosidad (hazard)*, *vulnerabilidad (vulnerability)*, y *riesgo (risk)*, estableciendo que el riesgo debe incluir de alguna manera la evaluación de las consecuencias. En la descripción de cómo deben de presentarse los trabajos de elaboración de mapas de peligrosidad y riesgo la directiva no es concreta, por lo que a partir de la misma surgieron en los distintos estados y regiones de la UE un sinnúmero de metodologías. Por ejemplo, el Real Decreto 903/2010 impone la delimitación del Dominio Público Hidráulico, la Zona de Flujo preferente y una zonificación de la inundabilidad (MARM, 2011). Para dar satisfacción a la Directiva Europea en cuanto a mapas de riesgo, el Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables plantea que en los mapas se mostrará el número de habitantes, el tipo de actividad económica y las instalaciones de prevención y control afectadas por las avenidas de distinto periodo de retorno (10, 100 y 500 años)(MAGRAMA-Inclam, 2014). Esta es una posible forma de cumplir con la Directiva, sin embargo en distintos proyectos de investigación de la UE (Floodsite, 2009) se proponen otro tipo de metodologías para cuantificar el riesgo de inundación para una avenida de probabilidad determinada, considerando tanto los posibles bienes como personas afectadas, su vulnerabilidad, su exposición y alguna propuesta de curvas de daño en función de la peligrosidad. En general se suele emplear como base para la evaluación de los daños materiales la metodología de la Federal Emergency Management Agency (FEMA, 2001) aunque con curvas de daños específicos para otras zonas (PATRICOVA, 2002). Para daños a personas la referencia es la propuesta del *Department for Environment, Food and Rural Affairs* del Reino Unido (DEFRA, 2008; Tapsell, S.M., Priest, S.J., Wilson, T., 2009; Lumbroso y Mauro, 2008).

De forma muy simplificada, los pasos necesarios para la evaluación del riesgo de inundación considerando daños materiales y sobre personas son:

- Generación de mapas de peligrosidad para distintos periodos de retorno. Estos mapas de peligrosidad pueden mostrar resultados de calado, velocidad, caudal específico o algún índice deducido a partir de los valores de una o varias de estas variables.
- Inventario y valoración de los bienes, infraestructuras y equipos existentes que se pueden ver afectados. El inventario se puede realizar a partir de los usos del suelo. En la valoración se considerará el grado de afección, que puede incluir la exposición y la vulnerabilidad. Por ejemplo, en edificios de 4 plantas puede estar expuesta solamente la planta baja, en cuyo caso la exposición sería del 25%.
- Obtención de curvas de daños que permitan conocer el porcentaje de pérdidas respecto a los bienes afectados que supone una peligrosidad determinada.
- Evaluación, para cada periodo de retorno, de los mapas de daños, cruzando los mapas de peligrosidad con las curvas de daños.

Con esta metodología se obtendrá un daño esperado para cada periodo de retorno expresado en un valor por unidad de superficie, o bien un valor total en la zona. Se puede realizar un proceso similar para evaluar los daños sobre personas, con resultados expresados en número de afectados o víctimas (totales o por unidad de área), o incluso transformarlos a una valoración económica.

Tanto para daños materiales como para personas, teniendo en cuenta que el periodo de retorno expresado en años es el inverso de la probabilidad anual de que se exceda un determinado nivel de inundación, se pueden combinar los distintos periodos de retorno y obtener un resultado global de Daño Anual Esperable (*Expected Annual Damage*) calculando el área que queda por debajo del gráfico de daños en función de la probabilidad (Figura 3).

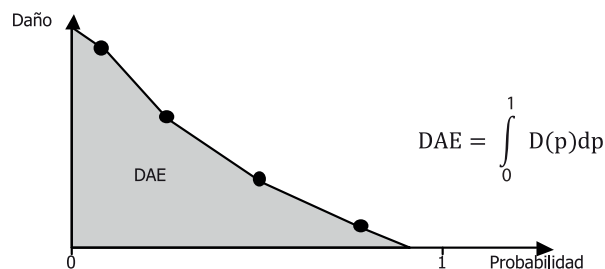


Figura 3 | Obtención del Daño Anual Esperable.

La evaluación del DAE será más precisa cuantos más periodos de retorno se hayan considerado. Si la evaluación de los daños se ha realizado en valor por unidad de área, se dispone de esta manera de un mapa de riesgo que indica, en cada zona, las pérdidas por metro cuadrado y por año que se pueden esperar, en promedio, debido a las inundaciones. Integrando en superficie, es decir, trabajando en daños totales, el valor del DAE representa el promedio en un año del valor total de pérdidas en la zona de estudio.

LOS RETOS ACTUALES

Con las herramientas existentes actualmente la modelización numérica aplicada a inundaciones fluviales en 1D o 2D está al alcance de cualquier empresa de ingeniería, administración, centro docente o de investigación, pero no supone en absoluto un tema resuelto o cerrado. Precisamente esta popularización provoca que los distintos grupos de usuarios estén llevando las herramientas a sus límites de aplicabilidad y poniendo de manifiesto sus limitaciones. A continuación se enumeran algunos temas de interés presente y futuro para mejorar en precisión, aplicabilidad o amigabilidad de estas herramientas.

Transporte de sedimentos

La fuerza ejercida por el agua sobre el terreno durante una avenida es muy superior a la ejercida en condiciones normales. En ríos aluviales ello genera un movimiento generalizado del sedimento del lecho tanto por transporte de fondo como por transporte en suspensión, pudiendo incluso ponerse en movimiento partículas de varios decímetros de diámetro. Ello provoca pérdidas de energía adicionales para las cuales no existe una formulación generalmente aceptada. Asimismo, la alta capacidad erosiva del agua durante una avenida puede generar cambios significativos en la forma de la sección que repercuten en su capacidad de desagüe. En dichas condiciones las ecuaciones existentes para el cálculo de la capacidad de arrastre de sedimentos producen resultados poco contrastados y con un gran nivel de incertidumbre. Si además la cantidad de partículas finas es importante, la concentración de sólidos en suspensión puede llegar a varios gramos por litro y el agua dejar de comportarse como un fluido newtoniano. Por todo ello es necesario seguir mejorando las formulaciones existentes para el cálculo acoplado de la hidrodinámica y erosión durante avenidas, ya que todavía no existe un consenso generalizado sobre las ecuaciones que se deben utilizar para su adecuada modelización (Soares-Frazão *et al.*, 2012).

Muchos de los modelos vistos incorporan una ecuación de continuidad del sedimento más las correspondientes ecuaciones de capacidad de transporte, y también una ecuación de convección-difusión para el sedimento en suspensión con sus términos de deposición/erosión, pero en la mayoría esto se hace para un sedimento caracterizado por un único diámetro. En la naturaleza el sedimento nunca es uniforme, y la granulometría del mismo provoca fenómenos complejos de ocultamiento y acorazamiento. Existen en la literatura expresiones para considerar estos efectos a nivel analítico (Parker, 2008), y su incorporación a un modelo hidrodinámico es también factible y existen pautas sobre cómo hacerlo. El reto en este campo está en la optimización y en su aplicabilidad. Respecto del primero, el uso de una granulometría extendida implica su discretización en clases, por lo que habrá que calcular por separado el movimiento de cada clase, la interacción entre ellas, y a su vez almacenar en memoria los resultados. Para una zona de dimensiones considerables puede llegar a colapsar el procesador y memoria de un ordenador actual estándar. En cuanto a la aplicabilidad el reto es aún mayor: la validación de los resultados debe hacerse con ensayos en laboratorio o redes de campo que contemplen granulometría extendida, variaciones temporales de geometría del río, y mediciones de caudales líquidos y sólidos.

Flujo a través de puentes y estructuras

Hasta ahora se ha planteado la modelización numérica como la resolución de las ecuaciones del flujo de agua en lámina libre en una geometría fija, pero esto representa una gran simplificación. En primer lugar, en las zonas inundables suele haber estructuras y construcciones que no puedan representarse correctamente con estas ecuaciones. Para ellas la mayoría de herramientas incluyen herramientas para poder incorporarlas. Por ejemplo, las obras de drenaje transversales se pueden incluir como una alcantarilla calculando el caudal entre dos puntos a partir de la diferencia de cotas entre sus extremos con una fórmula como la de Manning,

pero probablemente las estructuras más significativas que pueden encontrarse son los puentes. Es habitual en los estudios de zonas inundables que existan uno o varios puentes en el tramo de río a estudiar que pueden generar pérdidas de carga locales y variaciones en la lámina de agua muy importantes. Con caudales de avenida la lámina de agua puede llegar a tocar el tablero del puente e incluso pasar por encima, anegando completamente el puente. El flujo a través del puente en estas condiciones es muy complejo por varias razones: el flujo es completamente tridimensional, las presiones dinámicas son muy importantes, los niveles de turbulencia son muy elevados, existen cambios bruscos entre flujo en presión y en lámina libre. Concretamente las condiciones de flujo tridimensional y de flujo en presión invalidan la aplicación de las ecuaciones de flujo en lámina libre 1D o 2D resueltas por la mayor parte de modelos de inundación actualmente. Para solventar el problema se suele recurrir a la aplicación de ecuaciones clásicas de descarga en la sección del puente que relacionan el caudal a través del puente con la pérdida de carga generada en función de un coeficiente de descarga que depende de la geometría del puente. Esta aproximación puede ser adecuada en puentes con geometrías sencillas (tablero recto y horizontal), pero es difícil de aplicar en puentes con secciones complejas (como puentes romanos o medievales), que precisamente son los que más problemas generan al paso de la avenida. Asimismo, la definición del coeficiente de descarga no es trivial, y si bien existen valores medios recomendados en la literatura científica, su correcta identificación requiere calibración con datos de campo en condiciones de avenida, lo cual no suele ser posible en la mayoría de los casos. Una posible alternativa es el cálculo integrado con modelos 2D y 3D, utilizando el modelo 2D para el cálculo de la extensión de la inundación en la mayor parte del dominio, y el modelo 3D para el cálculo del flujo a través del puente. Este tipo de enfoque ha sido explorado recientemente por usuarios del modelo Flow3D, aunque es una metodología que aún por desarrollar y validar.

Modelización integrada hidráulico-hidrológica

Existe la posibilidad de integrar en la modelización hidráulica otro tipo de procesos de carácter hidrológico. Lo más elemental es incorporar en el método la entrada de agua a partir de datos de precipitación. Esto es algo que la mayoría de modelos ya admiten y que abre las puertas a realizar una modelización conjunta de la hidrología y de la hidráulica de una cuenca. Actualmente el proceso habitual en un estudio de inundación es realizar un cálculo hidrológico de toda la cuenca vertiente para obtener los caudales o hidrogramas de avenida, y con ellos un estudio hidráulico para determinar calados y velocidades en el tramo de estudio. Con la modelización hidráulica-hidrológica integrada se puede discretizar una cuenca con una malla irregular que utilice elementos de gran tamaño en la mayor parte de la cuenca, y elementos más finos en la zona del cauce y llanuras (Figura 4). Alimentando el modelo con lluvias de proyecto se pueden obtener los mapas de peligrosidad con una única herramienta que trabaje en las zonas de aportación como un modelo hidrológico distribuido, y en el cauce como un modelo hidráulico bidimensional que resuelve las ecuaciones completas de la onda dinámica. Actualmente en México se están realizando los mapas de peligro para el atlas nacional de riegos por inundaciones, y se está abordando con esta filosofía de modelización integrada (Fuentes *et al.*, 2013). Este tipo de modelización se debe complementar añadiendo otros procesos hidrológicos como las pérdidas por infiltración y por evapotranspiración, o incluso la recarga de acuíferos y su posterior aporte al cauce para simulaciones hidrológicas continuas a largo plazo.

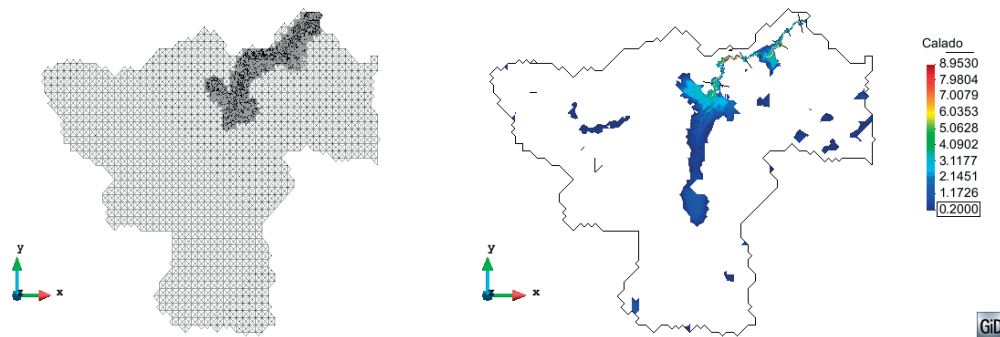


Figura 4 | Malla de cálculo (izquierda) y mapa de inundabilidad (derecha) para la cuenca de cabecera del río Fluvità realizado mediante modelización integrada hidráulico-hidrológica.

Las ventajas de la simulación integrada hidráulica-hidrológica no residen solamente en la simplicidad al utilizar un único modelo, sino que permite una mejor aproximación en algunos aspectos clave como pueden ser las condiciones de contorno. Con una aproximación clásica, en la que el estudio hidrológico se realiza a partir de una división en subcuencas, se obtiene un hidrograma de caudal a la salida de cada una de las subcuencas, hidrograma puntual que debe introducirse como condición de contorno en un tramo de río, por lo que en el río los caudales acaban teniendo una distribución escalonada por tramos. Además, si en este proceso se introduce el hidrograma justo en el punto de cálculo, el caudal en el tramo de río inmediatamente superior estará subestimado, ya que el caudal real probablemente aumentará de forma continuada por el aporte de las cuencas laterales de tamaño inferior. Por otro lado, si el hidrograma calculado a la salida de una cuenca se introduce en todo el cauce que la cruza, se estarán sobreestimando los caudales. Estas incertidumbres no se producen mediante la modelización integrada.

Optimización y paralelización

Gracias a los avances en técnicas de adquisición de datos que ha habido en los últimos años y a la generalización del uso de herramientas GIS, cada vez se están abordando estudios de inundabilidad y evaluación del riesgo en zonas de mayor extensión, lo que está poniendo a prueba las capacidades de cálculo de los programas existentes. Actualmente uno de los factores limitantes es su coste computacional. Por otro lado, en los últimos años también ha habido una gran evolución en la arquitectura de los ordenadores que abre nuevas perspectivas de paralelización de los códigos de cálculo utilizando las tarjetas gráficas de los ordenadores, algunas con varios miles de procesadores, para el cálculo (*GPU computing*), o utilizando la estrategia HPC (*High Performance Computing*) de Intel con su línea de productos con arquitectura MIC (*Many Integrated Cores*). Los cambios en el hardware han ido acompañados también por una evolución de los lenguajes de programación que facilitan la migración de programas existentes. Concretamente, para los lenguajes más comunes de programación como Fortran y C existen unas directivas de aceleración que permiten implementar distintas opciones de paralelización del código sin grandes cambios en la estructura del programa. Este es un campo que está siendo explorado actualmente y en el que existen distintas alternativas que pueden acelerar el cálculo varios órdenes de magnitud.

Una disminución drástica de los tiempos de cálculo no sólo permitirá realizar estudios de inundabilidad en tiempos menores, pero abre nuevas posibilidades como puede ser el uso de modelos numéricos que resuelven las ecuaciones completas para sistemas de alerta temprana, el análisis de sensibilidad a los parámetros mediante la realización de múltiples simulaciones y por lo tanto la reducción de la incertidumbre, o la simulación a partir de previsiones climáticas para estudios probabilísticos del efecto del cambio climático, etc.

CONCLUSIONES

En el presente conviven distintas metodologías para la modelización numérica de inundaciones fluviales. Frente a la ya consolidada aproximación unidimensional, se ha generalizado el uso de herramientas bidimensionales, y empiezan a utilizarse herramientas para abordar simulaciones en tres dimensiones. Las distintas aproximaciones son complementarias y presentan ventajas o inconvenientes en función de la disponibilidad de datos, las particularidades del caso, los resultados esperados o la experiencia del modelador.

La modelización numérica del flujo en ríos es una herramienta fundamental para la evaluación del riesgo de inundación tal como lo requiere la normativa vigente, la cual entiende como riesgo la combinación de la peligrosidad pero necesariamente también de sus consecuencias. La combinación de los resultados de los modelos hidrodinámicos con datos georreferenciados de usos del suelo, valores del mismo y de los bienes u actividades, junto con la consideración de la exposición y la vulnerabilidad conducen a la obtención de mapas de riesgo.

En el proceso de evaluación de la peligrosidad existen algunos aspectos pendientes o mejorables en cuanto a representación del flujo en sí mismo, o a la mejora de las herramientas existentes, como puede ser la inclusión en las simulaciones de los fenómenos de transporte sólido, una mejor representación de las estructuras y sus efectos, la integración de la modelización hidrológica en la modelización hidráulica, y la optimización de los códigos actuales, principalmente mediante técnicas de paralelización, para la reducción de los tiempos de cálculo sin penalizar la precisión de los resultados.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Laboratorio de Hidráulica del CEDEX por el soporte en el desarrollo de herramientas de modelización del flujo en ríos.

REFERENCIAS

- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., Dolz, J., Coll, A. 2014. Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, CIMNE (Universitat Politècnica de Catalunya), 30(1), 1-10.
- Bladé, E., Gómez-Valentín, M., Dolz, J., Aragón-Hernández, J.L., Corestein, G., Sánchez-Juny, M. 2012. Integration of 1D and 2D Finite Volume Schemes for Computations of Water Flow in Natural Channels. *Advances in Water Resources*, 42, 17-29. doi:10.1016/j.advwatres.2012.03.021
- Cea, L., Stelling, G., Zijlema, M. 2009. Non-hydrostatic 3D free surface layer-structured finite volume model for short wave propagation. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 61(4), 382-410. doi:10.1002/flid.1961
- Chaudhry, M.H. 2008. *Open-Channel Flow. Systems Engineering*, Springer, 523.
- Cunge, J.A. 1975. Two-dimensional modelling of flood plains. *Unsteady Flow in Open Channels*, K. Mahmood and V. Yevjevich, eds., W.P.R., Fort Collins.
- Cunge, J.A. 2014. Discussion on “River hydraulics – a view from midstream.” *Journal of Hydraulic Research*, 52(1), 137-138. doi:10.1080/00221686.2013.855269
- DEFRA. 2008. *Assessing and Valuing the Risk to Life from Flooding for Use in Appraisal of Risk Management Measures*. Department for Environment, Food and Rural Affairs.
- FEMA. 2001. *Understanding Your Risks. Identifying hazards and estimating losses*. F.E.M. Agency, ed., Federal Emergency Management Agency.
- Finaud-Guyot, P., Delenne, C., Guinot, V., Llovel, C. 2011. 1D–2D coupling for river flow modeling. *Comptes Rendus Mécanique*, 339(4), 226-234. doi:10.1016/j.crme.2011.02.001
- Floodsite. 2009. Flood risk assessment and flood risk management. An introduction and guidance based on experiences and findings of FLOODsite. <http://www.floodsite.net>
- Fuentes, O.A., Franco, V., Aragón-Hernández, J.L., De Luna, F., Vélez, L., Sánchez, J.A., Hernández, G.B., Ramos, J.G. 2013. *Estudio de inundaciones fluviales y mapas de peligro para el atlas nacional de riegos por inundaciones*. Organismo de cuenca VI. Cuencas centrales del norte. Sabinas. Instituto de Ingeniería, UNAM, México
- Hervouet, J.M. 2000. TELEMAC modelling system: an overview. *Hydrological Processes*, 14(13), 2209-2210. doi:10.1002/1099-1085(200009)14:13<2209::AID-HYP23>3.3.CO;2-Y
- Hirt, C., Nichols, B. 1981. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics*, 39(1), 201-225. doi:10.1016/0021-9991(81)90145-5
- Hunter, N.M., Bates, P.D., Horritt, M.S., Wilson, M.D. 2006. Improved simulation of flood flows using storage cell models. *Proceedings of the ICE - Water Management*, 159(1), 9-18. doi:10.1680/wama.2006.159.1.9
- Knight, D.W. 2013. River hydraulics – a view from midstream. *Journal of Hydraulic Research*, 51(1), 2-18. doi:10.1080/00221686.2012.749431

- Lumbroso, D., Mauro, M. di. 2008. Recent developments in loss of life modelling for flood event management in the UK. *Flood Recovery, innovation and response*, Proverbs and E. P.-R. D., C.A. Brebbia, eds., WIT Press, Southampton. UK. doi:10.2495/FRIAR080251
- MAGRAMA-Inclam. 2014. *Sistema nacional de cartografía de zonas inundables. Demarcación Hidrográfica del Segura. Mapas de Peligrosidad y Riesgo de Inundación*. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.
- MARM. 2011. *Guía Metodológica para el desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables*. (Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino, ed.), 349.
- Morales-Hernández, M., García-Navarro, P., Burguete, J., Brufau, P. 2013. A conservative strategy to couple 1D and 2D models for shallow water flow simulation. *Computers & Fluids*, 81, 26-44. doi:10.1016/j.compfluid.2013.04.001
- Morvan, H., Knight, D., Wright, N., Tang, X., Crossley, A. 2008. The concept of roughness in fluvial hydraulics and its formulation in 1D, 2D and 3D numerical simulation models. *Journal of Hydraulic Research*, 46(2), 191-208. doi:10.1080/00221686.2008.9521855
- Parker, G. 2008. Transport of Gravels and Sediment Mixtures. *Sedimentation Engineering. Processes, Measurements, Modeling, and Practice*, M. H. García, ed., ASCE. doi:10.1061/9780784408148.ch03
- PATRICOVA. 2002. Plan de acción territorial de carácter sectorial sobre prevención del riesgo de inundación en la Comunidad Valenciana. Generalitat Valenciana.
- Phillips, N. A. 1957. A Coordinate System Having Some Special Advantages For Numerical Forecasting. *Journal of Meteorology*, 14(2), 184-185. doi:10.1175/1520-0469(1957)014<0184:ACSHSS>2.0.CO;2
- Soares-Frazão, S., Canelas, R., Cao, Z., Cea, L., Chaudhry, H.M., Die Moran, A., El Kadi, K., Ferreira, R., Cadorniga, I.F., González-Ramírez, N., Greco, M., Huang, W., Imran, J., Le Coz, J., Marsooli, R., Paquier, A., Pender, G., Pontillo, M., Puertas, J., Spinewine, B., Swartenbroekx, C., Tsubaki, R., Villaret, C., Wu, W., Yue, Z., Zech, Y. 2012. Dam-break flows over mobile beds: experiments and benchmark tests for numerical models. *Journal of Hydraulic Research*, 50(4), 364-375. doi:10.1080/00221686.2012.689682
- Stelling, G., Zijlema, M. 2003. An accurate and efficient finite-difference algorithm for non-hydrostatic free-surface flow with application to wave propagation. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 43(1), 1-23. doi:10.1002/fld.595
- Tapsell, S.M., Priest, S.J., Wilson, T., C.V. & E.C. P.-R. 2009. A new model to estimate risk to life for European flood events. *Flood risk Management, research and practice*, W. Alsop, J. Harrop, P. Samuels, S. Huntington, ed., London, UK.
- Toro, E.F. 2001. *Shock-Capturing Methods for Free-Surface Shallow Flows*. John Wiley & Sons, Hoboken, N.J., USA, 309 pp.
- Vázquez-Cendón, M.E. 1999. Improved Treatment of Source Terms in Upwind Schemes for the Shallow Water Equations in Channels with Irregular Geometry. *Journal of Computational Physics*, 148(2), 497-526. doi:10.1006/jcph.1998.6127
- Verwey, A. 2001. Latest developments in floodplain modelling-1D/2D integration. *6th Conference on Hydraulics in Civil Engineering: The State of Hydraulics; Proceedings*, Institution of Engineers, Australia, 13.