

Caracterización de la estructura 3D del flujo en tramos meandriformes en condiciones de inundación mediante modelo numérico. Interacción cauce-llanura e influencia de la rugosidad

Bruño Fraga Bugallo

Enrique Peña González

Luis Cea Gómez

*GEAMA, Grupo de Enxeñería da Auga e do Medio Ambiente
ETSE Camiños, Canais e Portos, Universidade de A Coruña*

b.fraga@udc.es

1 Introducción

Los eventos de inundación en ríos han sido siempre objeto de preocupación y estudio, pero su impacto se ha visto incrementado en los últimos años por efecto del cambio climático. Los períodos de retorno se han visto alterados en gran parte de las cuencas, tendiendo generalmente a una mayor frecuencia y duración de las inundaciones. El alto coste social, medioambiental y económico de estos eventos obliga al diseño cuidadoso de actuaciones y estrategias que permitan lidiar con él. Éstas deben basarse en el conocimiento del comportamiento del flujo de agua en estos ríos.

Las zonas meandriformes del curso bajo de los ríos son especialmente sensibles a las crecidas y, generalmente, las más pobladas y por tanto más sensibles. Los patrones de comportamiento del flujo en estas zonas son muy complejos debido a la irregularidad del fondo, a la variación en las rugosidades del lecho, la curvatura del canal, el carácter fuertemente turbulento del flujo y la interacción (en condiciones de inundación) del caudal que avanza por las llanuras con el del cauce.

El flujo en el cauce de un tramo meandriforme se caracteriza por la presencia de una célula de recirculación transversal generada por las fuerzas centrípetas y los gradientes transversales de presión. El agua se desplaza hacia el margen externo del río, donde es proyectada hacia el lecho, siendo este proceso el principal responsable de la erosión en los márgenes y lechos y, en consecuencia, de la formación de meandros. El flujo pierde energía por el rozamiento con el fondo según avanza hacia la parte interior de la curva, donde sube hacia la superficie. Esta célula es deformada en sentido longitudinal por la corriente principal, generando una estructura helicoidal que desaparece y vuelve a crearse girando en sentido contrario entre un meandro y el siguiente. Sin embargo, en condiciones de inundación, el flujo del cauce se ve afectado por la interacción con el agua que viaja por las llanuras. Como consecuencia se produce un segundo flujo secundario que actúa en sentido contrario a la previamente descrita, reforzándola pero también restringiendo su extensión. Esta interacción será mayor cuanto más grande sea el caudal de inundación y la diferencia entre las direcciones del flujo dentro y fuera del cauce (Figura 1).

En resumen, la hidrodinámica de cauces naturales meandriformes con llanuras de inundación es un fenómeno de gran importancia ingenieril pero altamente complejo, aunque bien estudiado. La descripción que se ha hecho en los párrafos previos del comportamiento del flujo en estas situaciones proviene del estudio experimental. Pocos son los trabajos que realizan un estudio de detalle de los procesos descritos a través de la simulación numérica. Ello se debe a que el compromiso entre el alto nivel de detalle requerido (flujo 3D, no hidrostático, simulación rigurosa de la turbulencia, definición de dominios complejos e irregulares...) y el coste computacional asumible para una aplicación práctica en un dominio extenso (al menos decenas de metros) es muy difícil de alcanzar. Ciertos fenómenos no pueden ser descritos con exactitud por los modelos que asumen una distribución hidrostática de presiones, pues son los gradientes de presiones dinámicas generados por las fuerzas centrípetas o

la interacción entre flujos que avanzan en diferentes direcciones a lo largo de un perfil vertical los que los generan. Sin embargo, resulta evidente que los estudios experimentales son costosos y su aplicación restringida, por lo que modelos computacionales que aúnen precisión y aplicabilidad práctica son necesarios para el estudio y la toma de decisiones.

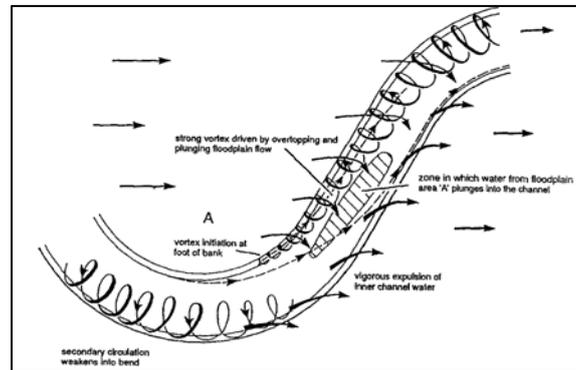


Figura 1 Representación esquemática de la estructura del flujo en un canal compuesto meandriforme con un caudal de inundación elevado.

En este trabajo se presentan dos elementos que pretenden ser innovadores: por un lado un código numérico no hidrostático desarrollado en el seno del grupo de investigación diseñado para la descripción detallada del flujo en tramos fluviales, y por otro una aplicación práctica del mismo en un caso real con relevancia a nivel ingenieril, medioambiental, social y económico: el estudio de un tramo meandriforme inundable del río Mero, en A Coruña. Dicho estudio numérico se ha realizado para estudiar la hidrodinámica del curso en condiciones de inundación y ciertos resultados son ciertamente interesantes por su coincidencia con el modelo teórico previamente descrito a partir de estudios experimentales y de campo. Además, próximamente se obtendrán datos experimentales en un modelo físico a escala 1:20 del tramo de estudio, lo cual permitirá realizar una calibración y validación de detalle del modelo numérico. Este trabajo está, por tanto, en proceso de elaboración, y lo que se muestra a continuación son algunos resultados preliminares que se juzgan interesantes, a raíz de la escasa cantidad de trabajos que abordan la simulación de detalle en 3D de flujo en tramos fluviales naturales.

2 Material y métodos

2.1 Modelo matemático

2.1.1 Ecuaciones fundamentales

El modelo matemático usado son las ecuaciones de Navier-Stokes para flujo incompresible con el promedio temporal de Reynolds (RANS 3D). No se elimina ni asume ninguna hipótesis sobre alguna de las componentes espaciales, y la distribución de presiones es no hidrostática. El sistema resultante consiste en una ecuación de continuidad de materia y tres ecuaciones de conservación del *momentum*, tal y como se describe en (1).

$$\text{div } \vec{u} = 0$$

$$\rho_0 \left[\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \vec{\nabla}) \vec{u} \right] + \nabla p - \frac{1}{\text{Re}} \Delta \vec{u} = \rho_0 \vec{f} \quad (1)$$

A menudo el término de la derivada temporal es omitido de las ecuaciones cuando los estudios se realizan en régimen estacionario. Como el objetivo del modelo es captar estructuras 3D complejas y de naturaleza en muchos casos transitoria, el presente modelo retiene la variación temporal, por lo que muchos autores las encuadrarían dentro de la categoría U-RANS (*Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations*).

2.1.2 Modelo de turbulencia

Para cerrar el sistema de ecuaciones es necesario resolver el tensor de esfuerzos turbulentos de Reynolds. Se asume la hipótesis de Boussinesq según la cual la turbulencia se manifiesta en forma de una viscosidad ficticia, y se calcula dicha viscosidad a partir de un modelo $k-\varepsilon$ isotrópico, que describe la evolución de la energía cinética turbulenta y la tasa de disipación (2).

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \nu_t \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + g_i \beta \frac{\nu_t}{\sigma_\theta} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_i} - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (2)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\varepsilon}{k} \left(c_{\varepsilon 1} \nu_t \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + c_{\varepsilon 1} g_i \frac{\nu_t}{\sigma_\theta} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_i} - c_{\varepsilon 2} \varepsilon \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right]$$

2.2 Código numérico

El modelo empleado para el estudio (*FreeFlow 3D*) ha sido desarrollado en el lenguaje de programación FORTRAN por Luis Cea y se encuentra en proceso de desarrollo de nuevas funcionalidades en la actualidad en el seno del grupo de investigación.

El código resuelve las ecuaciones RANS 3D e incorpora diversos modelos de turbulencia. Como se ha explicado en el apartado anterior, en el presente caso se ha utilizado el modelo $k-\varepsilon$. Para acoplar el cálculo de presión y velocidades se emplea el algoritmo SIMPLE.

La discretización en espacio se realiza mediante la técnica de volúmenes finitos, muy popular en la simulación numérica de fluidos. La malla de volúmenes finitos es pseudo-estructurada: la malla tridimensional se genera a partir de una malla 2D no estructurada a la que se le van añadiendo capas en la dirección vertical. La orientación de dichas capas puede ser horizontal o paralela al fondo, a elección del usuario.

El usuario también puede escoger la discretización temporal que mejor se ajuste a su caso. Se puede emplear una discretización implícita, que da lugar a simulaciones más lentas y estables. La formulación implícita es más veloz pero puede generar problemas de estabilidad cuando el flujo es fuertemente no estacionario. Por último, se puede utilizar un esquema de Crank-Nicholson.

Este código ha sido evaluado y validado en diversos casos test. Ha mostrado una gran exactitud en la predicción de velocidades (incluyendo velocidades transversales) y en la representación de las estructuras 3D características de flujos en canales curvos.

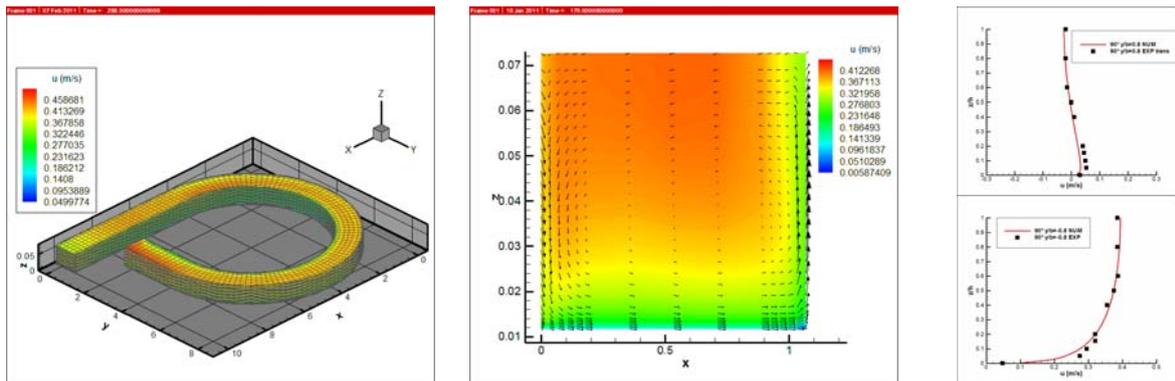


Figura 2 Caso de contraste con *FreeFlow3D*. Izquierda: geometría de un canal de aguas someras con fuerte curvatura. Centro: ejemplo de sección transversal a 90° con la célula de recirculación típica de los flujos con curvatura. Derecha: perfiles de velocidad para la validación con datos numérico-experimental (línea roja vs cuadrados negros). Arriba: velocidades transversales (flujo secundario); abajo: velocidades longitudinales. Datos experimentales: Steffler, 1984.

2.3 Caso de estudio

El río Mero se encuentra en Galicia, provincia de A Coruña, Noroeste de la Península Ibérica. Posee una cuenca de 350 km² y se encuentra regulado por la presa de Cecebre, que abastece de agua al área metropolitana de A Coruña. Las repetidas inundaciones en los tramos meandriiformes de su curso bajo causan múltiples problemas a las numerosas viviendas e infraestructuras de su entorno (Figura 2).

El objeto del presente estudio es un tramo especialmente problemático por la fuerte curvatura del meandro, la proximidad de viviendas e infraestructuras y la presencia de un puente que restringe el flujo en la entrada. El gran grado de curvatura y la facilidad para desbordarse hacen de este tramo una zona de estudio especialmente interesante desde el punto de vista hidrodinámico.



Figura 3 Vista aérea del tramo de estudio.

2.3.1 Geometría y características del modelo físico

Un modelo físico a escala fue construido en las instalaciones del Centro de Innovación Tecnológica en Edificación e Ingeniería Civil, de la Universidad de A Coruña para llevar a cabo el estudio en modelo reducido de las condiciones hidrodinámicas del tramo de estudio (Figura 3). Para su construcción se ha contado con una topografía muy detallada de los meandros, que fue replanteada en el laboratorio empleando una estación total láser.

El modelo reproduce a escala 1:20 el tramo de estudio hasta las motas laterales y cumple la semejanza de Froude. Las dimensiones del modelo son aproximadamente 11 y 6 m en sus ejes mayores. Existe una distorsión en la vertical de un 11% con respecto a la escala horizontal. Para representar la rugosidad en el tramo en estudio del río Mero se ha simplificado la complejidad de la resistencia al flujo en el prototipo por medio de tres materiales distintos en el modelo. En el fondo del cauce se supone una textura irregular tal que el coeficiente de rugosidad de Manning sea del orden de $n \approx 0.025$. La rugosidad correspondiente del modelo es 0.015, que se obtiene con el acabado común del mortero (sin enlucir). La vegetación herbácea de los prados del cauce de avenidas tendría un coeficiente $n \approx 0.035$ que por semejanza equivale a 0.021 en el modelo. Esto se consigue adhiriendo en la superficie del cauce de avenidas piedras de tamaño medio 8 mm. Por razones prácticas, las piedras realmente utilizadas para dar rugosidad al modelo han sido de tamaño medio 12 mm, generando un coeficiente de rugosidad de 0.023 ($n = 0.037$ en el tramo real).



Figura 4 Modelo físico a escala 1:20 del tramo de estudio.

Dicho modelo ha sido diseñado para realizar mediciones con de precisión de calados y velocidades. Para ello se dispone de un velocímetro ADV (*Acoustic Doppler Velocimeter*), sensores de calado de conductividad, un caudalímetro electromagnético ABB y un posicionador cartesiano que permite seleccionar con gran precisión los puntos de medida. En la actualidad se está llevando a cabo una campaña de medida de velocidades en el modelo físico empleando un perfilador acústico de velocidades (*DOP 2000*), que permite el registro simultáneo de velocidades en diferentes puntos de una vertical con una resolución de 2 mm.

Las simulaciones han sido realizadas por tanto conforme a la geometría del modelo reducido, no del tramo real. De ese modo la validación y calibración del modelo numérico puede llevarse a cabo de forma casi directa a partir de los datos de ensayo de laboratorio.

2.3.2 Parámetros de la simulación

2.3.2.1. Malla computacional

Una de las grandes dificultades de la simulación numérica en tramos fluviales es el alto coste computacional. Hallar el compromiso entre la exactitud del cálculo y el tiempo de simulación requiere sucesivas pruebas y análisis. La malla empleada en este caso consta de un total de 144501 volúmenes finitos (6881 en horizontal y 21 capas verticales). La resolución es mayor en el eje vertical para conseguir una buena caracterización de zonas clave como las próximas al fondo o la interfaz entre el cauce y la llanura. La malla del cauce es estructurada, con elementos rectangulares. En las llanuras la malla es no estructurada y los elementos son triángulos.

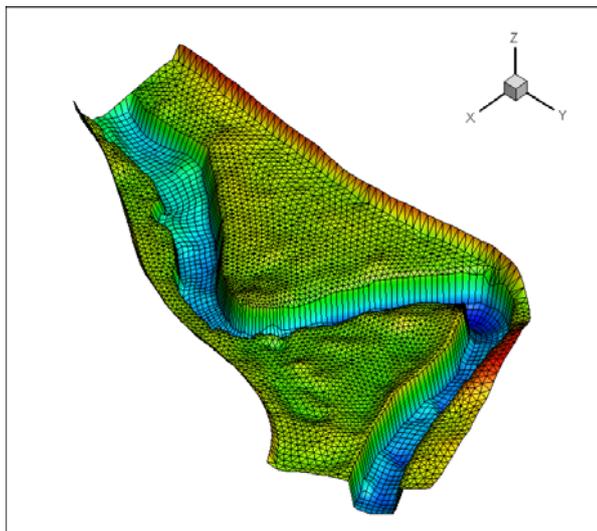


Figura 5 Malla bidimensional del modelo.

2.3.2.2. Condiciones iniciales y de contorno

- **Condición inicial:** fluido en reposo.
- **Condición de entrada:** caudal de inundación. $Q = 98 \text{ L/s}$. La velocidad de entrada no es uniforme, restringiéndose a la zona del cauce, tal y como ocurre en el modelo y en la realidad por la presencia del puente.
- **Condición de salida:** $h = 32.4 \text{ cm}$. Medida basada en datos experimentales.
- **Fondo:** rugosidad de fondo calculada mediante la fórmula de Manning. Los valores empleados fueron 0.023 en las llanuras y 0.015 en el cauce, acorde con lo comentado en la descripción del modelo.
- **Superficie libre:** condición de simetría. Tras comprobar en diversas simulaciones y ensayos que la lámina era prácticamente horizontal, se fijó una capa rígida acorde con el calado en la salida.

3 Resultados y discusión

El principal objetivo de las simulaciones es captar aquellos fenómenos que no son reproducibles en un modelo hidrostático, como los vórtices de recirculación en los meandros y la multidireccionalidad del flujo entre el cauce y el caudal de llanura.

3.1 Estructuras 3D del flujo

La Figura 1 mostraba la estructura clásica del flujo en canales meandriiformes en condiciones de inundación de manera simplificada. En la Figura 6 se observa una vista superior del dominio computacional donde el campo de velocidades verticales señala la presencia de las zonas en que el agua de avenida se “zambulle” en el cauce y es “expulsada” del mismo. Es en estos puntos donde encontraremos las células de recirculación interactuando con este fenómeno.

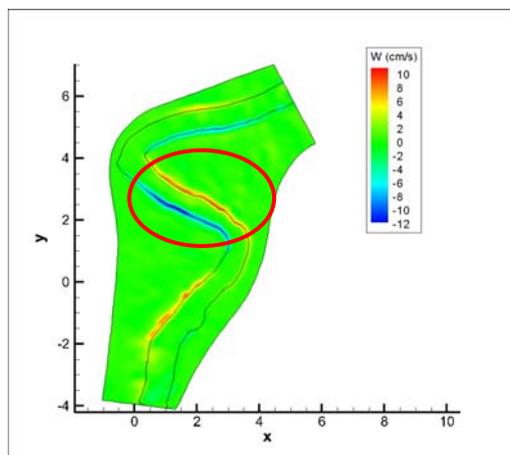


Figura 6 La distribución de velocidades verticales en planta donde se aprecia la presencia de zonas de “zambullida” y “expulsión” como las referidas en la Figura 1. Detalle en el círculo rojo.

Las células de recirculación se caracterizan por la presencia de flujos secundarios en la dirección transversal al cauce que operan del modo descrito en la introducción. Pero también existe un desplazamiento longitudinal en la dirección principal del cauce que tiende a elongar dichas células de forma helicoidal. Es por eso que en estas zonas de interacción entre cauce y llanura podemos encontrar un brusco cambio de dirección entre el agua de las capas más bajas, que avanza en la dirección del cauce, y la de las capas superiores, que es arrastrada por el caudal de avenida. Este efecto se refleja en la Figura 7. En caudales de inundación importantes, como es el caso, el flujo de las llanuras se hace dominante una vez que entra en el cauce, quedando la zona de recirculación y de

avance en la dirección del cauce restringida un área “protegida” por la pendiente de la orilla, tal y como se observa en la Figura 1.

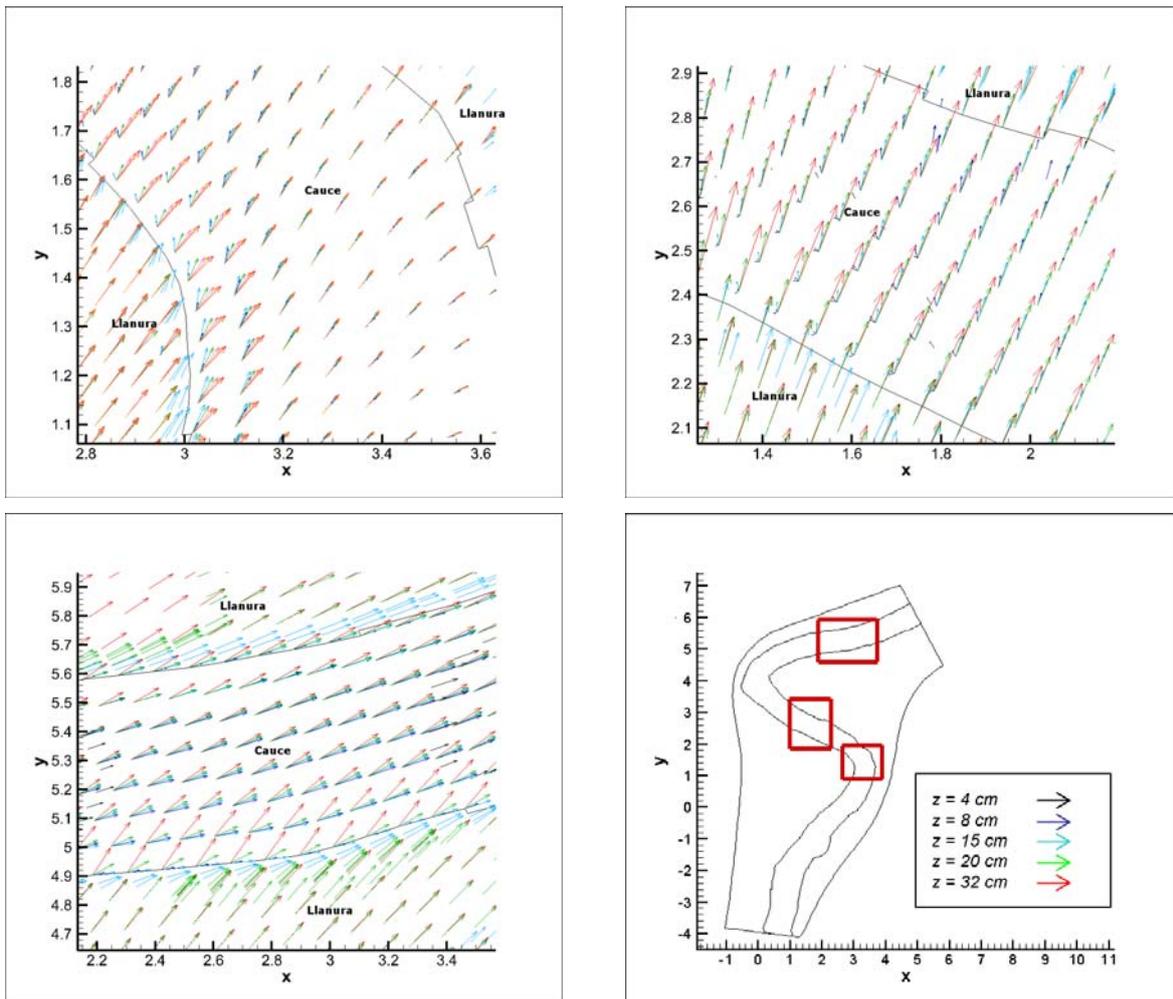


Figura 7 Multidireccionalidad a distintas profundidades generadas por la interacción entre el flujo del cauce y el de las llanuras de inundación.

En la Figura 8 se aprecia claramente la situación de la célula de recirculación que avanza helicoidalmente en la dirección del cauce frente al flujo mayoritariamente dominado por la dirección preferente en las llanuras (cuyo ángulo es mayor que cero). El ángulo de las velocidades en torno a -45° en el cauce, mientras que para el caudal de inundación toma valores positivos.

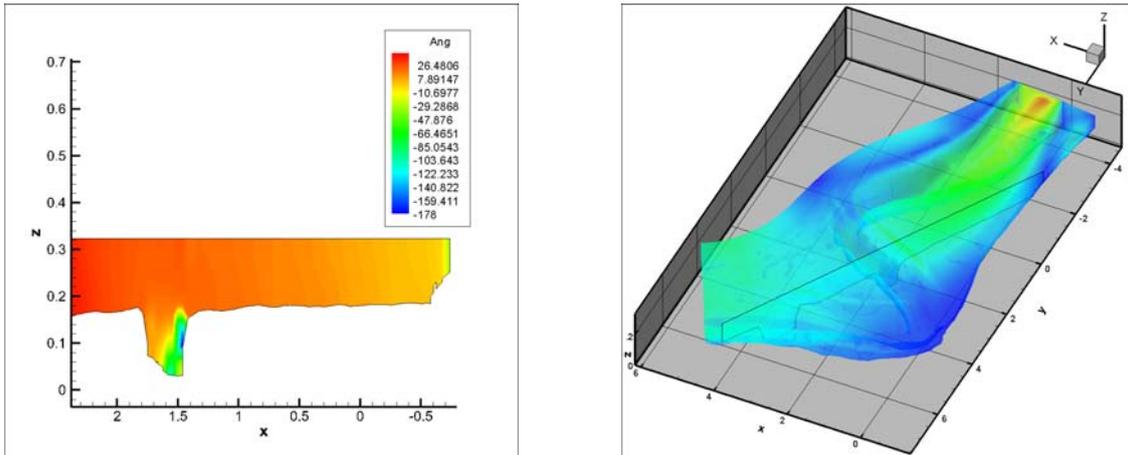


Figura 8 En la figura de la izquierda se aprecia el ángulo de giro con respecto al eje longitudinal de una sección del tramo (cuya situación se especifica en la imagen de la derecha)..

3.2 Efecto de la rugosidad

La rugosidad es un elemento clave del modelado que es muy difícil de calibrar cuando se trata de simulaciones en canales naturales. La irregularidad de los lechos y las llanuras de inundación obliga a utilizar parámetros tabulados, como el número de Manning. Las simulaciones son muy sensibles a las pequeñas diferencias relativas entre rugosidades de cauce y llanuras, creándose caminos preferentes de flujo que cambian completamente el comportamiento del mismo. Se ha analizado este efecto, que puede observarse en la Figura 9. Se observa la creación de distintos caminos preferentes. En el segundo caso el flujo tiene mayor tendencia a ser encauzado, pues la rugosidad relativa de las llanuras es mayor. Esta concentración de flujo también da lugar a mayores picos de velocidad.

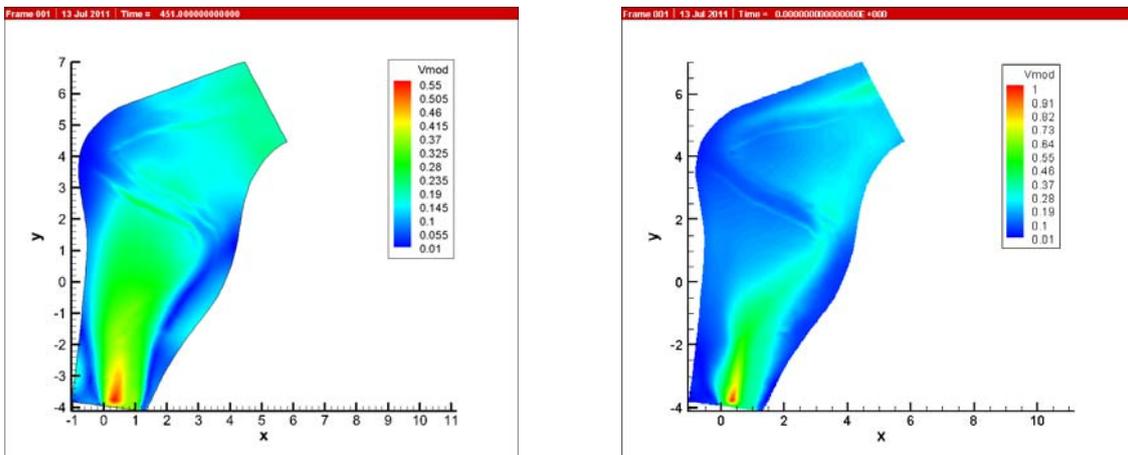


Figura 9 Distribución del módulo de velocidad en dos simulaciones con diferentes números de Manning. En la figura de la izquierda se utilizaron los valores de rugosidad asignados al modelo físico, en el que el Manning del cauce es un 65% del de las llanuras. En la imagen de la derecha la diferencia es mayor, siendo el Manning del cauce un 35% del de las llanuras.

4 Conclusiones y líneas futuras

Los resultados que se acaban de presentar son los de un trabajo en desarrollo. Una campaña de ensayos está a punto de realizarse en el modelo físico, proporcionando datos para la validación numérico-experimental. Hasta ahora el trabajo se ha centrado en el análisis de la capacidad del modelo para predecir comportamientos complejos en un dominio computacional altamente irregular. Entre las principales conclusiones que se extraen de dicho análisis podemos mencionar:

- Buena captación de los efectos 3D. La estructura tridimensional del flujo observada en las simulaciones se corresponde con exactitud con los modelos teóricos existentes en la literatura, basados en las observaciones de campo y experimentales. El modelo es capaz de captar efectos tales como la generación las de células de recirculación típicas de los meandros y su interacción con el caudal de avenida (efectos de “zambullida” y “expulsión”), detectándose el cambio de dirección del flujo a lo largo de perfiles verticales de velocidad.
- Importancia de la rugosidad. La relación entre las rugosidades del cauce y la llanura es totalmente determinante para el cálculo del campo de velocidades y, por tanto, de los fenómenos de erosión en el cauce. La calibración del número de Manning de cara a la validación numérico-experimental es fundamental.

Entre las líneas actuales de investigación se encuentran:

- Validación experimental. La campaña de ensayos en el modelo 1:20 del tramo meandriforme descrito pronto permitirá una validación cuantitativa de los datos obtenidos en estas simulaciones.
- Estudio de la turbulencia. Hasta ahora se ha trabajado con el modelo $k-\varepsilon$ en diferentes simulaciones y casos test, proporcionando buenos resultados. Pero sería deseable una aproximación a la turbulencia que reflejase la naturaleza claramente anisótropa de la misma en casos como el que se describe, en que al menos algunas zonas presentan escalas de longitud muy diferentes en el plano horizontal y vertical.
- Mejor caracterización de la rugosidad. La utilización de coeficientes de rugosidad facilita el trabajo y la comparación numérico-experimental, pero la aproximación mediante leyes de pared o de arrastre puede aportar resultados más exactos en las zonas próximas al lecho.

5 Principales referencias bibliográficas

- Cea L, Puertas J, Vázquez-Cendón ME. "Depth Averaged Modelling of Turbulent Shallow Water Flow with Wet-Dry Fronts". Archives of Computational Methods in Engineering, 14 (3), 303--341, 2007.
- 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; 61:382–410.
- Ervine, D.A., Willetts, B.B., Sellin, R.H.J. and Lorena, M., 1993. "Factors affecting conveyance in meandering compound flows". J. Hydraul. Engrg. (119), 1383-1399.
- Gahmry H. K., Steffler P. M. "Two-dimensional depth-averaged modeling of flow in curved open channels". Journal of Hydraulic Research Vol. 43, No. 1 (2005), pp. 44–55.
- Nicholas A. P., McLelland S. J. Computational fluid dynamics modelling of three-dimensional processes on natural river floodplains. Journal of Hydraulic Research Vol. 42, No. 2 (2004), pp. 131-143.
- Sellin, R.H.J., Irvine, D.A. and Willetts, B.B., 1993. "Behaviour of meandering two-stage channels". Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Water, Maritime and Energy 101, pp. 99–111.
- Shiono, K., Spooner, J., Chan, T., Rameshwaran, J., and Chandler, J., "Flow Characteristics in Meandering Channels with Non-Mobile and Mobile Beds for Overbank Flows", IAHR Journal of Hydraulic Research, Volume 46, No. 1, pp. 595-609, Delft, Netherland, January, 2008.
- Stoesser T, Ruether N and Olsen NRB. "Calculation of primary and secondary flow and boundary shear stresses in a meandering channel". Advances in Water Resources. Volume 33, Issue 2, February 2010, Pages 158-170.
- Tritthart M, Gutknecht D. 2007. "Three-dimensional simulation of free-surface flows using polyhedral finite volumes". Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics 1: 1–14.
- van Balen, W. , Blanckaert, K. and Uijttewaai, W. S. J.(2010) "Analysis of the role of turbulence in curved open-channel flow at different water depths by means of experiments, LES and RANS". Journal of Turbulence, Volume 11, Art. No. N 12.
- Wormleaton PR, Ewunetu M. 2006. "Three-dimensional k- e numerical modelling of overbank flow in a mobile bed meandering channel with floodplains of different depth, roughness and platform". Journal of Hydraulic Research Vol. 44, Issue 1, pp. 18-32.