

## **DESARROLLO DE UN MODELO DE SIMULACIÓN DE FLUJO EN RÍOS. CONVENIOS DE COLABORACIÓN CEDEX – UPC - UDC**

**Luis Balairón (1), Ernest Bladé i Castellet (2), Georgina Corestein (1), Luis Cea (3),  
Ángel Lara (1), Josep Dolz (2), Jerónimo Puertas (3).**

- (1) Centro de Estudios Hidrográficos – CEDEX  
E-mail: [angel.lara@cedex.es](mailto:angel.lara@cedex.es) – Web <http://www.cedex.es/>  
(2) Grup de Recerca Flumen – Universitat Politècnica de Catalunya  
E-mail: [ernest.blade@upc.edu](mailto:ernest.blade@upc.edu) – Web: <http://www.flumen.upc.es>  
(3) Grupo de Enxeraría da Auga e do Medio Ambiente - Universidade da Coruña  
E-mail: [l.cea@udc.es](mailto:l.cea@udc.es) – Web <http://www.geama.info/>

### **RESUMEN**

Los trabajos presentados en este documento se realizan en el marco de los convenios de colaboración: *Desarrollo de un modelo de simulación del flujo en cauces naturales 1D y 2D combinados* y *Estudio de los procesos de suspensión en la morfología fluvial*. Convenios firmados entre el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX, el grupo Flumen de la Universitat Politècnica de Catalunya y el GEAMA de la Universidade da Coruña.

El resultado de estos acuerdos es un modelo numérico que aúna la experiencia de los grupos participantes. Se trata de una herramienta que incorpora capacidades de CARPA, modelo hidrodinámico 1D-2D, del grupo Flumen y de TURBILLÓN, modelo hidrodinámico 2D + turbulencia, del grupo GEAMA, así como por nuevos desarrollos específicamente realizados a lo largo de estos convenios.

La herramienta final está orientada tanto a la simulación de la hidrodinámica de un cauce fluvial, como al estudio de su evolución morfológica considerando tanto arrastre de fondo como transporte en suspensión. La validación de los módulos de evolución morfológica y transporte de sedimentos se beneficiará de la experiencia en modelos físicos por parte del CEH, que podrán ser modelados numéricamente para una posterior comparación de los resultados numéricos y experimentales.

### **ABSTRACT**

Works presented in this document are done under the collaboration frameworks “*Desarrollo de un modelo de simulación del flujo en cauces naturales 1D y 2D combinados*” and “*Estudio de los procesos de suspensión en la morfología fluvial*”. The agreements were signed between the Hydrographics Studies Centre of the CEDEX, the research group FLUMEN from the Polytechnical University of Catalonia and the research group GEAMA from the University of A Coruña.

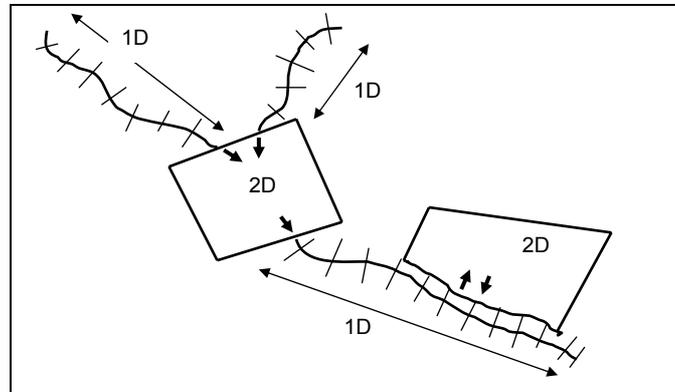
The product of those agreements is a numerical model that joins the experience of the participants. The resultant tool put together the capabilities of CARPA, a 1D-2D hydrodynamic model, from the Flumen group and of TURBILLÓN, a 2D hydrodynamic + turbulence model, from the GEAMA group. Besides from new developments performed as part of the agreement.

The new tool is addressed both to the hydrodynamic simulation of river-bed and to its morphological evolution, considering bed-load and suspended sediment transport. The validation of the modules of morphological evolution and sediment transport will benefit from the experience in scaled models of the CEH, which can be modelled in order to compare numerical and experimental results.

### **INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS**

El punto de partida de los trabajos desarrollados son el modelo CARPA, desarrollado por el grupo Flumen de la Universitat Politècnica de Catalunya, y el modelo Turbillón desarrollado por el grupo GEAMA de la Universidade da Coruña. Ambos modelos comparten una serie de características comunes como son la resolución de las ecuaciones de Saint Venant, o de aguas someras, en dos dimensiones por medio de esquemas numéricos basados en la técnica de los volúmenes finitos mediante esquemas de alta resolución con extensión a segundo orden en base al esquema de Roe.

Turbillón permite la consideración de distintos modelos de turbulencia como el modelo ASM y distintas variantes del modelo  $k-\varepsilon$ , aparte de otros más sencillos. El modelo CARPA incorpora, por su lado, la posibilidad de realizar simulaciones conjuntas combinando aproximaciones en una y dos dimensiones, con el consecuente ahorro de coste computacional (Figura 1)



**Figura 1.-** Descomposición del área de estudio en dominios unidimensionales y bidimensionales

El objetivo principales de los trabajos desarrollados son es el desarrollo de un modelo matemático para el estudio de las variables hidráulicas y sedimentológicas del flujo en cauces naturales, considerando la turbulencia. Considerando la situación existente al principio del convenio con la existencia de los modelos CARPA y Turbillón, este objetivo principal se concreta en una serie de objetivos secundarios:

- Mejora del módulo hidrodinámico incorporando nuevas condiciones de contorno no contempladas anteriormente (condición de calado crítico, curvas de gasto) y condiciones de contorno internas para la consideración de elementos especiales como estructuras, obras de drenaje o puentes.
- Incorporación de un módulo de flujo turbulento al modelo CARPA, basado en los desarrollos ya incluidos en Turbillón
- Incorporación al modelo de un módulo de transporte de sólido de fondo
- Incorporación de un módulo de transporte en suspensión
- Desarrollo de los elementos de preproceso y postproceso del modelo numérico para mejorar su amigabilidad pero también para dotarlo de mayores capacidades.

En la presente comunicación se muestra la concreción de algunos de los objetivos parciales en desarrollos incorporados a CARPA y Turbillón

## **MÓDULO DE FLUJO TURBULENTO**

Los trabajos de desarrollo del módulo de flujo turbulento dentro de CARPA se basan en los trabajos desarrollados por el GEAMA de la UdC, y concretamente en los trabajos de L. Cea (2005). De entre los posibles modelos de turbulencia se ha optado por la implementación de un modelo de viscosidad turbulenta constante y el modelo  $k-\varepsilon$  de Rastogi y Rodi. La aproximación de Boussinesq se utiliza en los modelos lineales de viscosidad turbulenta, y relaciona las tensiones de Reynolds con los gradientes de velocidad media mediante la siguiente relación lineal:

$$-\overline{u_i u_j} = \nu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (1)$$

La hipótesis de Boussinesq no deja de ser una mera aproximación que funciona mejor o peor en función de las condiciones de flujo. En los modelos de aguas poco profundas, lo que realmente aparece en las ecuaciones es el valor de las tensiones de Reynolds promediado en profundidad. Se puede asumir directamente el uso de una formulación similar para el cálculo de tensiones de Reynolds promediadas en profundidad, utilizando para ello las siguientes expresiones:

$$-\overline{u'^2} = 2\nu_t \frac{\partial U_x}{\partial x} - \frac{2}{3} k \quad -\overline{u'v'} = \nu_t \left( \frac{\partial U_x}{\partial y} + \frac{\partial U_y}{\partial x} \right) \quad -\overline{v'^2} = 2\nu_t \frac{\partial U_y}{\partial y} - \frac{2}{3} \quad (2)$$

donde todas las variables hacen referencia a valores promediados en profundidad. Introduciendo la aproximación de Boussinesq en las ecuaciones de aguas someras y simplificando algunos términos de segundo orden, se obtiene la siguiente formulación:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h U_x}{\partial x} + \frac{\partial h U_y}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial h U_x}{\partial t} + \frac{\partial h U_x^2}{\partial x} + \frac{\partial h U_x U_y}{\partial y} = -gh \frac{\partial z_s}{\partial x} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left( h \nu_e \frac{\partial U_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( h \nu_e \frac{\partial U_x}{\partial y} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial h U_y}{\partial t} + \frac{\partial h U_x U_y}{\partial x} + \frac{\partial h U_y^2}{\partial y} = -gh \frac{\partial z_s}{\partial y} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left( h \nu_e \frac{\partial U_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( h \nu_e \frac{\partial U_y}{\partial y} \right)$$

$$\nu_e = \nu + \nu_t \quad (4)$$

La viscosidad efectiva  $\nu_e$  incluye la viscosidad laminar  $\nu$  y la viscosidad turbulenta  $\nu_t$ , aunque como se ha dicho anteriormente, en flujos turbulentos la viscosidad turbulenta es varios órdenes de magnitud superior a la viscosidad laminar (en hidráulica fluvial suele ser entre 3 y 4 órdenes de magnitud superior)

#### MODELO DE VISCOSIDAD TURBULENTO CONSTANTE

El orden de magnitud de la viscosidad turbulenta se puede fijar de forma aproximada en función del flujo considerado. Existen diferentes publicaciones en las que se proponen valores aproximados de la viscosidad turbulenta en función del flujo considerado. Este enfoque es muy sencillo, y no se puede considerar como un modelo de turbulencia adecuado ni realista en ningún caso, ya que no tiene en cuenta que la viscosidad turbulenta varía fuertemente de un punto a otro. Es importante remarcar que no es sólo el valor de la viscosidad turbulenta, sino también su variación espacial la que determina el campo de velocidad media. Además las tablas existentes proporcionan únicamente valores aproximados. Por todo ello no se recomienda utilizar este método, ya que puede llevar a resultados con errores considerables, generalmente por utilizar valores excesivamente elevados de viscosidad turbulenta, así como por no considerar su variabilidad espacial. Otro inconveniente importante de este enfoque se produce en la modelización de flujos en régimen no estacionarios, ya que en estos casos la turbulencia varía no sólo en espacio sino también en el tiempo.

### MODELO K-E DE RASTOGI Y RODI (1978)

Es un modelo que resuelve una ecuación de transporte para la energía cinética turbulenta  $k$  y para la tasa de disipación de energía turbulenta  $\varepsilon$ . El modelo tiene en cuenta la producción debido al rozamiento del fondo, la producción por gradientes de velocidad, la disipación y el transporte convectivo. Las ecuaciones del modelo k- $\varepsilon$  para aguas someras son las siguientes:

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial U_x k}{\partial x} + \frac{\partial U_y k}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + 2v_t S_{ij} S_{ij} + c_k \frac{u_f^3}{h} - \varepsilon \\ \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial U_x \varepsilon}{\partial x} + \frac{\partial U_y \varepsilon}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( v + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + c_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} 2v_t S_{ij} S_{ij} + c_\varepsilon \frac{u_f^4}{h^2} - c_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (5)$$

$$v_t = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad c_k = c_f^{-1/2} \quad c_\varepsilon = 3.6 c_k^{3/2} c_{\varepsilon 2} c_\mu^{1/2} \quad c_f = \frac{\tau_b}{\rho |U|^2}$$

con las constantes:

$$c_\mu = 0.09 \quad c_{\varepsilon 1} = 1.44 \quad c_{\varepsilon 2} = 1.92 \quad \sigma_k = 1.0 \quad \sigma_\varepsilon = 1.31$$

donde  $k$  es la energía cinética turbulenta,  $\varepsilon$  es la tasa de disipación de turbulencia  $S_{ij}$  es el tensor de deformación. Los términos que incluyen la velocidad de fricción de fondo  $u_*$  son los responsables de modelar la generación de turbulencia por rozamiento de fondo.

El modelo k- $\varepsilon$  es un modelo relativamente sofisticado. En flujos turbulentos poco-profundos proporciona resultados relativamente buenos, siendo uno de los modelos más utilizados en dicho ámbito cuando el nivel de turbulencia es importante. No obstante, su grado de complejidad no garantiza resultados correctos en cualquier tipo de flujo. Al igual que cualquier modelo de turbulencia, los resultados obtenidos con el modelo k- $\varepsilon$  deben de analizarse y valorarse de forma crítica, para lo cual es fundamental la experiencia del usuario en la modelización de flujos turbulentos.

### MÓDULO DE TRANSPORTE DE FONDO

#### ECUACIONES DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS POR ARRASTRE DE FONDO

Para poder considerar fondo móvil, a las tres ecuaciones anteriores se le debe añadir la ecuación de continuidad del sedimento o ecuación de Exner:

$$(1 - \lambda) \frac{\partial z}{\partial t} = -\nabla \mathbf{q}_s \quad (6)$$

donde  $\lambda$  es la porosidad,  $z$  la cota de fondo y  $\mathbf{q}_s$  el caudal sólido por unidad de ancho. Para el cálculo del caudal sólido se han incorporado las ecuaciones de transporte de fondo de Meyer-Peter y Müller y de Einstein-Brown.

#### CORRECCIÓN POR EFECTO DE LA PENDIENTE DE FONDO

Cuando el fondo no es plano, las anteriores ecuaciones deben ser corregidas para tenerlo en cuenta, tanto en el sentido de aumentar el transporte de fondo con pendiente positiva, como de

disminuirlo con pendiente adversa. La formulación de la corrección por pendiente de fondo, que se realiza sobre el término de tensión crítica de inicio del movimiento, se detalla en Dey (2003), Chiew y Parker (1994) y en múltiples referencias que aparecen en estos trabajos. Se corrige la tensión tangencial crítica de inicio del movimiento según la expresión

$$\tau_c^* = \tau_{co}^* \cos \alpha \left(1 - \frac{\tan \alpha}{\mu_c}\right) \tag{7}$$

siendo  $\tau_{co}^*$  la tensión tangencial para fondo plano,  $\alpha$  la pendiente de fondo y  $\mu_c$  el ángulo de rozamiento interno del material de fondo. En la siguiente figura se presenta el valor de la corrección en función de la pendiente de fondo. De esta manera se calcula el caudal sólido en cada volumen finito y, a través de la ecuación de Exner, se actualiza la cota de fondo. En el caso 2D dicha actualización es inmediata por la discretización espacial que se utiliza. Por el contrario, en las secciones transversales del cálculo 1D debe hacerse algún tipo de hipótesis sobre la forma en que se modifica la sección a partir del caudal sólido. La hipótesis adoptada es que la erosión en cada punto de la sección es proporcional al calado en dicho punto (Figura 3).

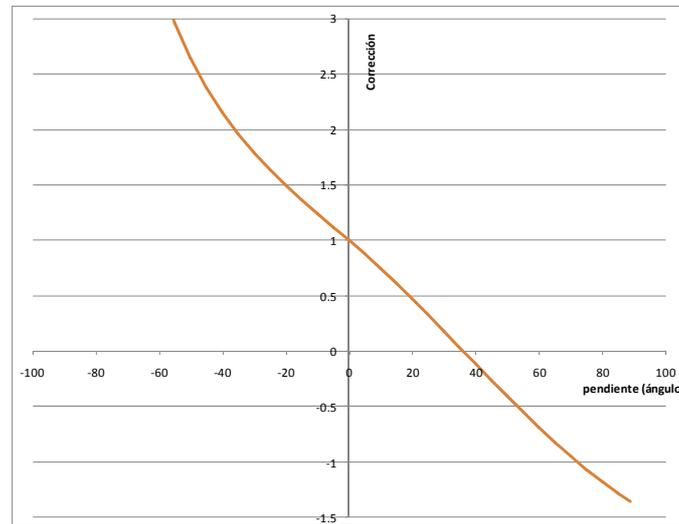


Figura 2. Corrección en la tensión crítica para considerar la pendiente de fondo

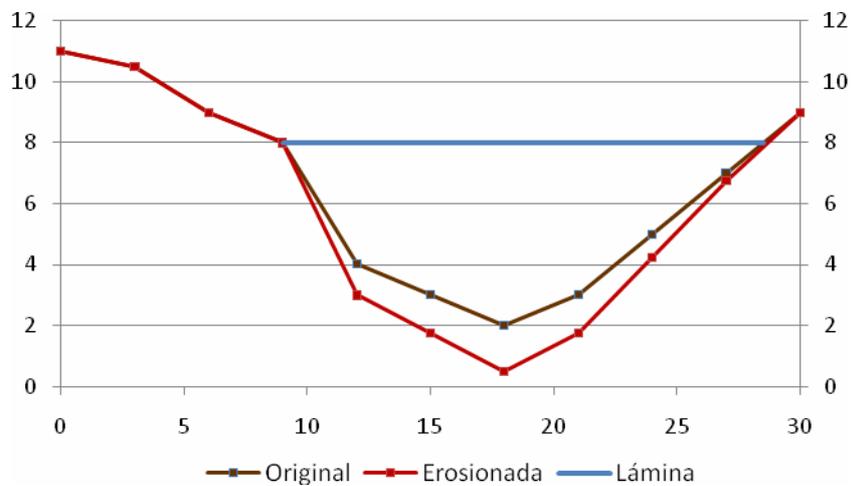


Figura 3. Erosión de una sección transversal en el cálculo 1D

CONSIDERACIÓN DE UNA COTA NO EROSIONABLE

En el cálculo del arrastre de fondo y el cambio provocado en la cota de fondo se ha incluido la posibilidad de considerar una cota de roca, o superficie no erosionable. En la formulación en volúmenes finitos ello conlleva a una separación en dos pasos (predictor y corrector) de los flujos numéricos de sedimento de fondo a través de los contornos de los elementos.

Predictor: se busca la nueva cota de fondo debido sólo al caudal sólido de salida de un elemento.

$$z_i^p = z_i^n + \frac{\Delta t}{(1-\lambda_p)V_i} \sum_{l=1}^{N_i} (\max(\mathbf{q}_{s,i,w_l}^n \mathbf{n}_{i,w_l}, \mathbf{0})) l_{i,w_l} \tag{8}$$

Corrector: si en el predictor el elemento se ha erosionado por debajo de la cota de rocas, se corrige el caudal sólido y se actualiza a la nueva cota de fondo.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{si } (z_i^p < z_{roca}) \text{ y } (\mathbf{q}_{s,i,w_l}^n \mathbf{n}_{i,w_l}) > 0 \Rightarrow \begin{cases} \mathbf{q}_{s,i,w_l}^c = \mathbf{q}_{s,i,w_l}^n (z_i^n - z_{roca}) / (z_i^n - z_i^p) \\ \mathbf{q}_{s,j,w_l}^c = -\mathbf{q}_{s,i,w_l}^n \end{cases} \\ \text{en c.c } \Rightarrow \mathbf{q}_{s,w_l}^c = \mathbf{q}_{s,w_l}^n \end{array} \right. \tag{9}$$

$$z_i^{n+1} = z_i^n + \frac{\Delta t}{(1-\lambda_p)V_i} \sum_{l=1}^{N_i} (\mathbf{q}_{s,i,w_l}^c \mathbf{n}_{i,w_l}) l_{i,w_l} \tag{10}$$

MÓDULO DE TRANSPORTE EN SUSPENSIÓN

Tanto para el transporte en suspensión como para el transporte de contaminantes, se ha incluido la ecuación de continuidad del sedimento en suspensión, ecuación de transporte no estacionaria en que la incógnita es la concentración de sedimento y que incorpora también el coeficiente de viscosidad turbulenta, así como las tasas de erosión y sedimentación. Para estas últimas se ha considerado la formulación de Van Rijn.

$$\frac{\partial hC}{\partial t} + \frac{\partial hU_x C}{\partial x} + \frac{\partial hU_y C}{\partial y} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \Gamma + \frac{v_z}{S_{ct}} \right) h \frac{\partial C}{\partial x_j} \right)}_{\text{Difusión turbulenta}} + \underbrace{(E - D)}_{\substack{\text{Erosión} \\ \text{Deposición}}} \tag{11}$$

$$E - D = w_s (c_a^* - c_a) = \alpha w_s (C^* - C) \tag{12}$$

$$\alpha = \frac{h - a}{\int_a^h \left( \frac{h - z}{z} \cdot \frac{a}{h - a} \right)^{w_s/k u_*} dz} \tag{13}$$

$$c_a^* = 0.015 \frac{D_{50} \cdot T^{1.5}}{a \cdot D_*^{0.3}}$$

Con:

$$W_s = \frac{(G-1) \times g \times d_{50}^2}{18 \times v} \quad \rightarrow \quad d_{50} < 10^{-4} \text{ m}$$

$$W_s = \frac{10 \times v}{d_{50}} \left( \sqrt{1 + 0.01 \times d_{\text{star}}^3} - 1 \right) \quad \rightarrow \quad 10^{-4} \text{ m} < d_{50} < 10^{-3} \text{ m}$$

$$W_s = 1.1 \times \sqrt{(G-1) \times g \times d_{50}} \quad \rightarrow \quad 10^{-3} \text{ m} < d_{50}$$

## NUEVAS HERRAMIENTAS DE PRE-PROCESO Y POST-PROCESO

La interface, común a los modelos CARPA y Turbillón, se basa en el software GiD desarrollado por el CIMNE (Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería). CARPA y Turbillón se han desarrollado nuevas herramientas de pre-proceso con una doble finalidad: aumentar el programa de nuevas capacidades y hacer la interfaz del usuario más amigable. Para este segundo objetivo se ha modificado la interfaz para poder observar las condiciones impuestas, y se ha dotado la misma de una nueva herramienta de exportación de resultados en formato raster para ser visualizados directamente en SIG. Para el primer objetivo se destaca la posibilidad de importar la rugosidad a partir de datos geo-referenciados de usos del suelo, y las nuevas metodologías de creación de mallas con las que se consiguen mallas de mayor calidad a la vez que un programa más robusto.

Alguna de estas mejoras son puramente para mejorar la amigabilidad del programa. Como ejemplo, ahora se pueden consultar las condiciones (de contorno, iniciales, rugosidades, internas, etc.) a partir de la pantalla de asignación de las mismas cuando anteriormente eso no era posible, los menús son más entendedores, aparecen mensajes de aviso frente a errores comunes, se pueden visualizar los resultados mientras se ejecuta la simulación, reemplazar un cálculo interrumpido, etc.

Por otro lado se ha trabajado en nuevas herramientas para la visualización de los resultados en formato SIG. Una vez acabados los cálculos, se puede pedir el resultado que se desee en el instante que se desee, y se exporta para SIG.

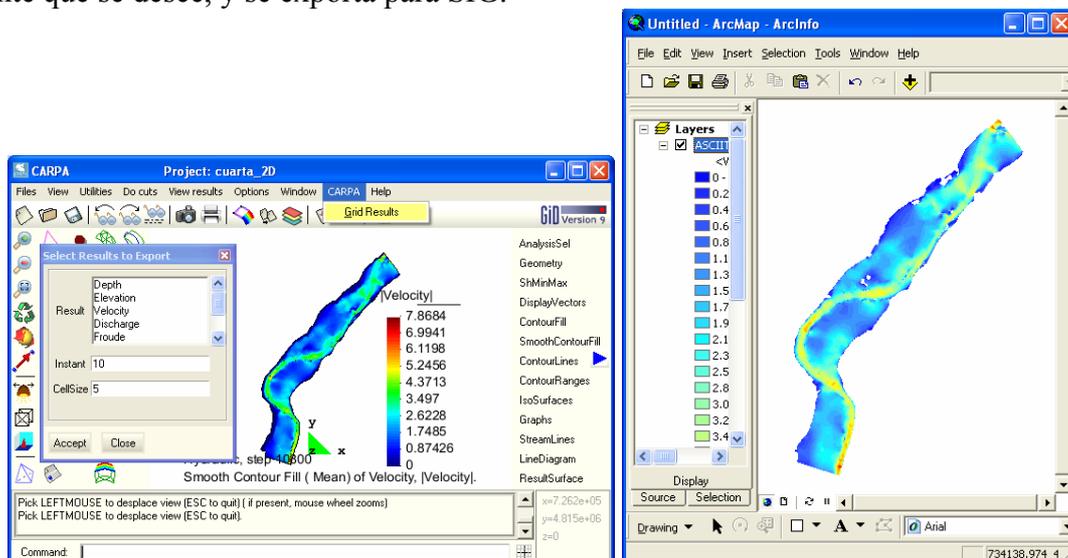
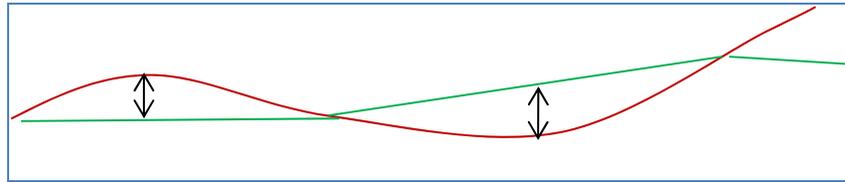


Figura 4. Exportación de un resultado a SIG

Como parte de la integración en SIG, es posible también asignar rugosidades a la malla de cálculo de forma automática a partir de bases de datos georeferenciadas de usos del suelo.

## NUEVAS METODOLOGÍAS DE CREACIÓN DE MALLAS

Uno de los procesos que requieren de mayor tiempo y esfuerzo a la hora de desarrollar un estudio de simulación numérica del flujo en ríos es la generación de la malla de cálculo. Un río tiene una geometría irregular y la construcción de una malla eficiente no es evidente. Una buena malla debe de ser irregular, para minimizar el número de elementos, con transiciones suaves. Para ello son muy adecuados los métodos basados en el error cordal, o máxima diferencia entre el terreno original y la malla.

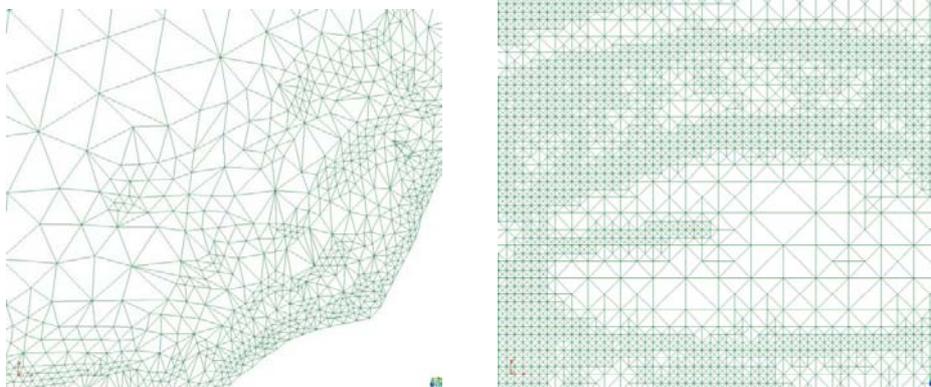


**Figura 5.** Definición del error cordal entre la malla (verde) y el terreno (rojo)

En este sentido, se han desarrollado dos nuevas metodologías basadas en el error cordal, y una tercera para importar una malla regular:

- Malla de triángulos irregulares generada con error cordal
- Malla de triángulos rectángulos equiláteros o RTIN (Rectangular Triangulated Irregular Network), también generada con error cordal
- Malla regular con todos los puntos del MDT (Modelo Digital del Terreno)

Para estas metodologías se requiere como información de partida un Modelo Digital del Terreno en formato ASCII de arc/Info.



**Figura 6.** Detalles de malla generada limitando el error cordal en el río Narcea (izq.) y RTIN en el río Fluvà (der.)

### APLICACIÓN 1. FLUJO TURBULENTO EN ESCALAS DE PECES DE HENDIDURA VERTICAL

Este es un ejemplo paradójico en donde un modelo de aguas poco profundas proporciona resultados muy aceptables del campo de velocidades y calados a pesar de que el calado y la escala horizontal son del mismo orden de magnitud. El hecho de que un modelo 2D-SWE funcione bien se debe a que el flujo es marcadamente bidimensional, las velocidades verticales son muy pequeñas excepto en la hendidura, y el campo de velocidad horizontal es muy homogéneo en profundidad. Es un flujo extremadamente turbulento, por lo que se hace indispensable utilizar un modelo de turbulencia adecuado, tipo  $k-\epsilon$  o similar. La Figura 7

muestra el campo de velocidad y líneas de corriente calculadas en 2 diseños diferentes de piscinas. La correcta evaluación de las zonas de recirculación que aparecen en la piscina depende del modelo de turbulencia utilizado (Figura 8.).

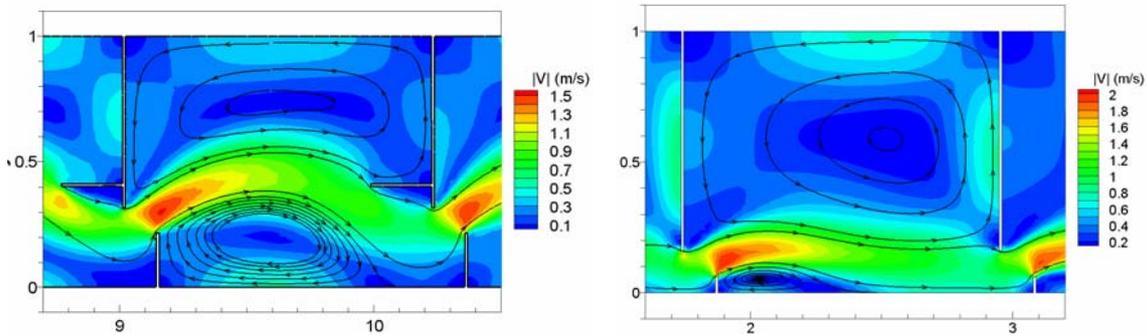


Figura 7.- Campos de velocidad en dos tipos de escala de peces diferentes.

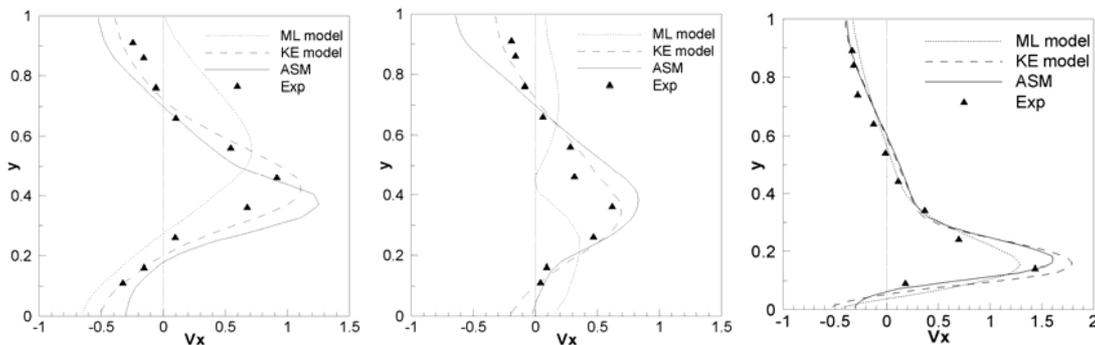


Figura 8.- Secciones de velocidad longitudinal, experimental y numérica, utilizando varios modelos de turbulencia

## APLICACIÓN 2. MORFOLOGÍA DEL RÍO TIETAR

Se realizó el estudio de la hidrodinámica y evolución morfológica de un tramo de unos 80km del río Tietar, entre los embalses de Rosario y Torrejón con el objetivo de estudiar el equilibrio del río y su posible evolución morfológica, considerando el efecto de la explotaciones de extracción de áridos y el cese de la agricultura extensiva (pastoreo de cabras) en la zona. Se realizó una simulación conjunta 1D-2D (Figura 9). La asignación de rugosidades se realizó a partir de una clasificación de usos del suelo en base a fotografía aérea.

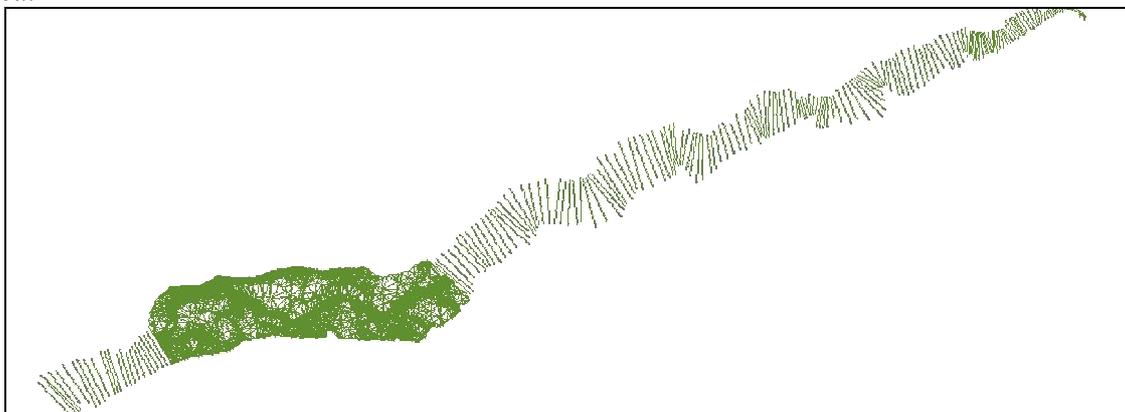


Figura 9.- Malla 1D-2D-1D, con 101336 elementos 2D

A título de ejemplo se muestran los resultados de calados y erosiones en la zona simulada en dos dimensiones (Figura 10 y Figura 11)

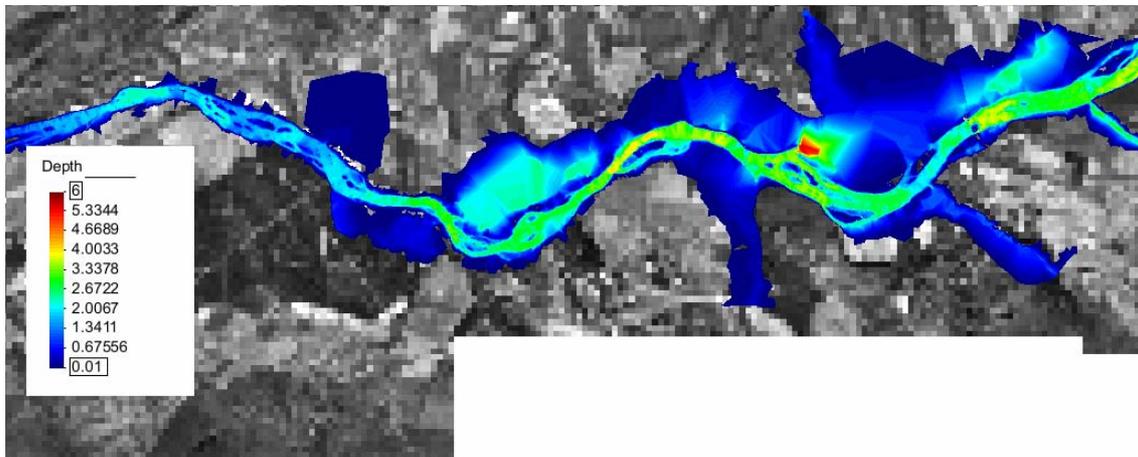


Figura 10.- Resultados de calados para la simulación morfológica del tramo 2D.

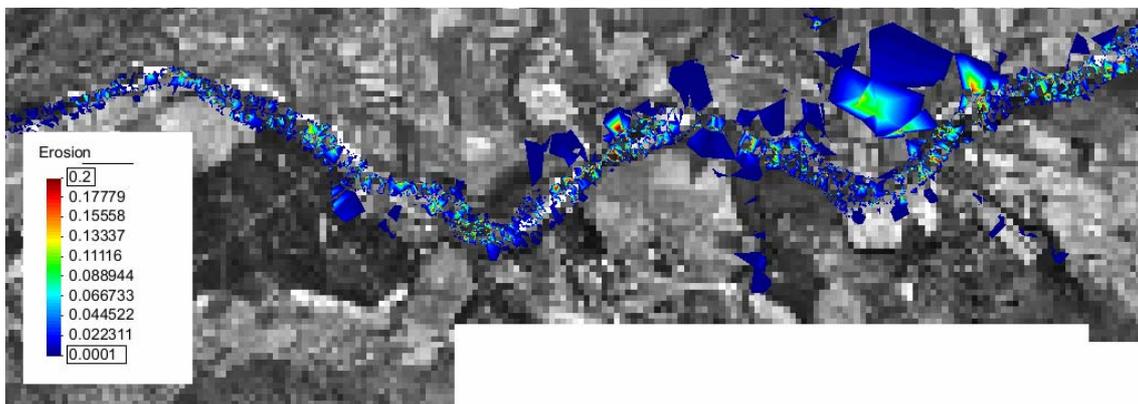


Figura 11.- Resultados de erosiones para la simulación morfológica del tramo 2D.

## CONCLUSIONES

Durante el desarrollo del convenio se ha progresado en la incorporación a los modelos existentes de nuevos módulos de cálculo que los dotan de mayores capacidades, sobre todo para estudios de dinámica fluvial y evolución morfológica de cauces. Por otro lado se han incorporado mejoras en la interface y en los propios módulos de cálculo para mejorar su facilidad de uso y interpretación de resultados. Los principales desarrollos han sido:

- Incorporación de un módulo de transporte de fondo
- Incorporación de un módulo de transporte en suspensión
- Inclusión a CARPA de un modelo de turbulencia que ya incorporaba Turbillón
- Nuevas condiciones de contorno y condiciones de contorno internas para la consideración de estructuras como obras de drenaje, compuertas, vertederos, puentes
- Mejora de la amigabilidad de la interface e integración en SIG mediante transferencia de archivos en formatos estándar de SIG

En definitiva, los desarrollos realizados en base a los modelos existentes permiten que en la actualidad se disponga de una herramienta con mayores capacidades, pero también más robusta y fácil de utilizar para la modelización de procesos fluviales.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**Bladé, E., Gómez-Valentín, M.** (2006). *Modelación del flujo en lámina libre sobre cauces naturales. Análisis integrado en una y dos dimensiones*. Monograph CIMNE N°97. Barcelona

**Bladé, E., Gómez-Valentín, M., Sánchez-Juny, M., Dolz, J.** (2008) “Preserving steady state in Finite Volume Computations of River Flow”, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol 134 (9)

**Cea, L.** (2005) *Unstructured finite volumen model for unsteady turbulent shallow water flow with wet-dry flows: numerical solver and experimental validation*. Tesis doctoral. Universidad de A Coruña

**Chiew, Y.M. and Parker, G.** (1994). “Incipient Sediment Motion on Non-Horizontal Slopes”, *J. Hydr. Res.*, 32(5), 649–660.

**CIMNE** (2009) *GiD The personal pre and post-processor* [www.gidhome.com](http://www.gidhome.com). Último acceso 30/7/2009

**Corestein, G., Bladé, E., Gómez, M., Dolz, J., Oñate, E., Piazzese, J.** (2004) “New GiD Interface for Ramflood-Dss Project Hydraulic Simulation Code”, *Proceeding of the congress 2nd Conference on Advances and Applications of GiD*. CIMNE. Barcelona, España

**Dey** (2003). “Threshold of sediment motion on combined transverse and longitudinal sloping beds”, *Journal of Hydraulic Research* Vol. 41, No. 4 (2003), pp. 405–415

**Evans, W., Kirkpatrick, D. and Townsend, G.** (2001) “Right-Triangulated Irregular Networks”, *Algorithmica: Special Issue on Algorithms for Geographical Information Systems*, 30, 2, pp.264-286.