



Actas de las  
IV Jornadas de Ingeniería del Agua

# Aplicación de la nueva herramienta HEC-RAS 5.0 para cálculos bidimensionales del flujo de agua en ríos

Willy Eduardo Lluén Chero

*Estudiante de Máster en Ingeniería Civil  
Universidad Politécnica de Cataluña*

Ernest Blade Castellet

*Dr. Ingeniero de Caminos, Instituto Flumen Universitat Politècnica de Catalunya - CIMNE*

## 1. Introducción

La capacidad de los modelos numéricos para representar fenómenos naturales ha venido evolucionando, y es que resultan de mucha importancia, por la necesidad de predecir tales fenómenos para anticipar ciertas medidas preventivas y correctivas sobre la zona de influencia al paso del agua.

En la actualidad los modelos numéricos, ayudados con la capacidad de procesamiento de los ordenadores, permiten adecuarse a un esquema en dos dimensiones (2D), superando los modelos 1D, y ayudándonos a cuantificar parámetros hidráulicos; sobre todo cuando se trata de simulaciones hechas sobre grandes extensiones de terrenos afectados por el paso del agua.

HEC-RAS es una herramienta que ha venido evolucionando, y que a la fecha, en su versión 5.0 (versión beta) cuenta con una extensión que permite simular el flujo de agua combinando modelos 1D/2D, así como totalmente 2D; basa su aplicación en las ecuaciones de Onda Difusiva y Sant Venant (a criterio del usuario) las cuales resuelve mediante el algoritmo de Volúmenes Finitos Implícitos. Una de las novedades de esta nueva versión, es que incorpora la ventana de interface RAS Mapper en la cual el usuario integra el modelo digital del terreno, como paso inicial para la modelización del flujo.

El presente trabajo mostrará lo novedoso de HEC-RAS 5.0 (versión Beta), y tiene como objetivo principal analizar el comportamiento del software para el tratamiento de modelos de flujo bidimensionales, mediante su aplicación en casos de canales prismáticos y sobre llanura de inundación, a través de una serie de tareas que incluyen además, el empleo del software Iber 2.2 como una herramienta de contraste.

## 2. HEC-RAS 5.0 (versión beta): Modelización de flujo en 2D

HEC-RAS es un software de uso libre, cuyo proceso evolutivo ha venido desarrollando nuevas herramientas de trabajo para el análisis de flujo en diferentes condiciones. Esta evolución va desde las versión 2.2, la cual analiza el flujo de forma unidimensional en condiciones permanentes, hasta la actual versión 5.0, que permite la modelización en una y dos dimensiones para condiciones permanentes y no permanentes.

Versión HEC-RAS	Model. 1D	Model. Cuasi-2D	Model. 2D	Flujo Permanente	Flujo No Permanente	Análisis de Transporte de Sedimentos	Análisis de Calidad de Agua
2.2	✓			✓			
3.1.3	✓			✓	✓		
4.1.0	✓	✓		✓	✓	✓	✓
5.0	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

**Tabla 1.** Evolución del tipo de modelización y herramientas de análisis de HEC-RAS.

HEC-RAS 5.0 (versión beta), manteniendo las herramientas de su versión anterior, adiciona algunas otras que lo hacen capaz de realizar la modelización en 1D, 2D o una combinación de ambos. Dentro de las capacidades más importantes que permiten a esta versión la modelización en 2D, podemos citar las siguientes:

- Emplea las ecuaciones de Saint-Venant y Onda Difusa en 2D.
- Esquema numérico empleado: Volúmenes Finitos Implícitos.
- Algoritmo de solución para el acoplamiento de modelos 1D y 2D.
- Mallas computacionales estructuradas y no estructuradas.
- Tabla detallada de propiedades hidráulicas para celdas y contornos de celdas computaciones 2D, que permiten acelerar los tiempos de cálculo.

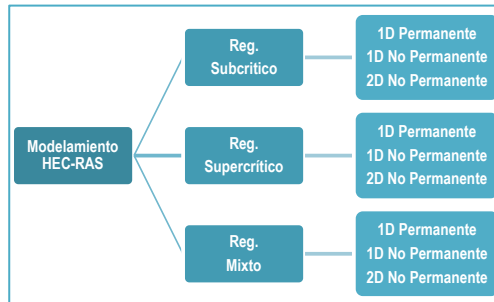
Expone además una serie de limitaciones que presenta la versión beta del software, siendo de las más destacadas, que aún no se puede emplear la modelización en 2D para el análisis de transporte de sedimentos y calidad de agua.

Previo a la ejecución del modelo 2D, se requiere de una serie de configuraciones previas, que involucran establecer tolerancias de cálculo que permitan obtener resultados coherentes. Dos de los más importantes parámetros que hay que configurar son: el tamaño de malla y el paso de tiempo de cómputo. El tamaño de malla ( $\Delta x$ ); nos permitirá que el modelo se adecue apropiadamente al terreno y de esa forma pueda incluir todas las obstrucciones presentes. El paso de tiempo de cómputo ( $\Delta t$ ), está relacionado al Número de Courant, que se obtiene de la relación entre espacio, velocidad y tiempo; siendo conocido que dicha relación debe ser menor igual que la unidad. Ambos serán necesarios para obtener buena precisión numérica y reducir al mínimo el tiempo de cálculo.

### 3. Modelización Hidráulica de canales prismáticos en 1D y 2D con HEC-RAS 5.0

#### 3.1 Datos de entrada para la modelización hidráulica

En el presente capítulo, se ha considerado realizar simulaciones para condiciones permanentes y no permanentes en los regímenes Subcrítico, Supercrítico y Mixto del flujo. El siguiente esquema explica las tareas realizadas para evaluar el comportamiento de la superficie de agua sobre los canales.



**Figura 1.** Esquema de tareas para la modelización de canal prismático en 1D y 2D.

Los canales prismáticos a evaluar tienen sección rectangular, de 100 metros de base por 4 metros de altura; varían en longitud y pendiente, así como en valores de coeficiente de manning, permitiendo evaluar el comportamiento de la superficie de agua en régimen Subcrítico, Supercrítico y Mixto.

Régimen	Tramo I			Tramo II		
	Pendiente (m/m)	Longitud (m)	Manning (n)	Pendiente (m/m)	Longitud (m)	Manning (n)
Subcrítico	0.0003	1000	0.014	---	---	---
Supercrítico	0.0100	800	0.014	---	---	---
Mixto	0.0100	800	0.020	0.0003	1000	0.014

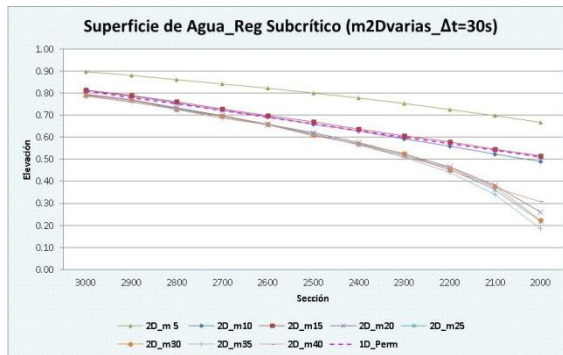
**Tabla 2.** Valores de la geometría y coeficiente de manning de los canales prismáticos.

Para la modelización de los canales, se ha verificado que el caudal transportado sea el necesario para evitar el desborde del flujo de agua. Esto nos permitió establecer que el valor adecuado de caudal será de 40 m<sup>3</sup>/s para modelar en condiciones permanentes y no permanentes en 1D y 2D. Finalmente las condiciones de contorno quedan definidas como se muestra en el siguiente cuadro:

CC	1D_Perm	1D_No Perm	2D_No Perm
Aguas Arriba	Caudal Cte.	Hidrog. Flujo	Hidrog. Flujo
Aguas Abajo	Calado Normal	Calado Normal	Calado Normal

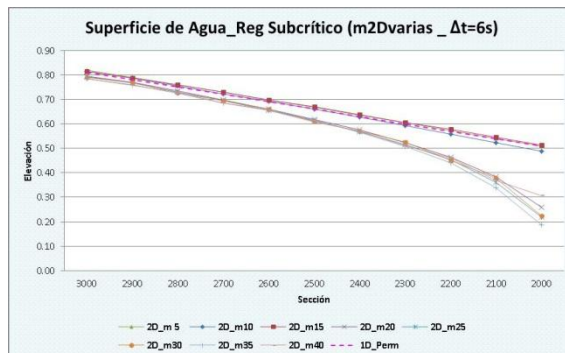
**Tabla 3.** Condiciones de Contorno para la modelización.

Se ha mencionado que HEC-RAS 5.0 (versión beta) para modelos 2D, requiere de adecuados valores de dimensiones de malla y paso de tiempo computacional, por lo cual se han realizado pruebas haciendo variar ambos parámetros hasta establecer valores apropiados.



**Figura 2.** Comportamiento de Superficie de Agua,  $\Delta t=30s$ , Mallas: 5x5m hasta 40x40m.

En la Figura 2 se muestra la variación de la superficie de agua del canal con características de régimen Subcrítico, haciendo variar las dimensiones de malla desde 5x5m hasta 40x40m, empleado únicamente el paso de tiempo computacional ( $\Delta t$ ) de 30 segundos. Tomando como referencia la superficie de agua que resulta del modelo 1D en régimen permanente, podemos apreciar que la malla de dimensiones 10x10m y 15x15m otorgan mejores aproximaciones que las demás. Sin embargo habiendo disminuido el paso de tiempo computacional a 6 segundos, se obtuvieron mejores aproximaciones con mallas de dimensiones 5x5m hasta 15x15m, tal y como se muestra en la Figura 4.



**Figura 3.** Comportamiento de Superficie de Agua,  $\Delta t=6s$ , Mallas: 5x5m hasta 40x40m.

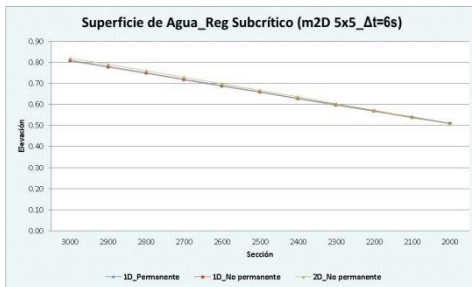
Tras las pruebas hechas, y aunque solo se haya realizado considerando un régimen de flujo Subcrítico, podemos indicar que un valor adecuado del paso de tiempo computacional será de 6 segundos y que se puede emplear mallas de dimensiones entre 5x5 y 15x15 metros, en el análisis de los canales prismáticos.

### 3.2 Modelización 2D del flujo en canal prismático, en régimen Subcrítico, Supercrítico y Mixto

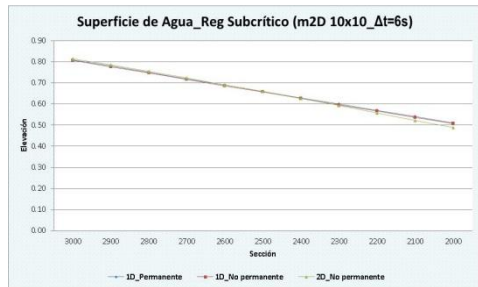
La modelización en régimen Subcrítico presenta la particularidad que para mallas con valores superiores a los 20x20m, la superficie de agua empieza a decrecer de forma parabólica alejándose del perfil de superficie patrón. El tiempo en que estabiliza los modelos según la malla empleada puede apreciarse en el siguiente cuadro:

Malla (m)	5x5	10x10	20x20	40x40
Tiempo (min)	60	60	120	120

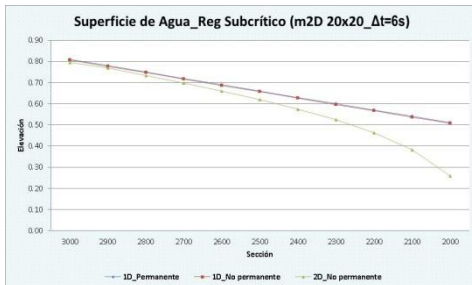
**Tabla 4.** Estabilización del modelo en Régimen Subcrítico, para varias dimensiones de malla



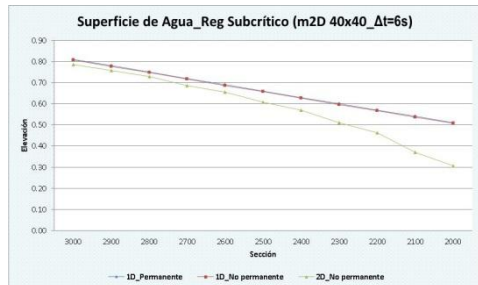
**Figura 4.** Superficie de agua Rég. SUBCRITICO,  $\Delta t=6s$ , Malla: 5x5m



**Figura 5.** Superficie de agua Rég. SUBCRITICO,  $\Delta t=6s$ , Malla: 10x10m



**Figura 6.** Superficie de agua Rég. SUBCRITICO,  $\Delta t=6s$ , Malla: 20x20m

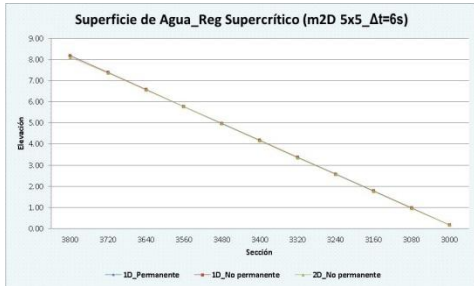


**Figura 7.** Superficie de agua Rég. SUBCRITICO,  $\Delta t=6s$ , Malla: 40x40m

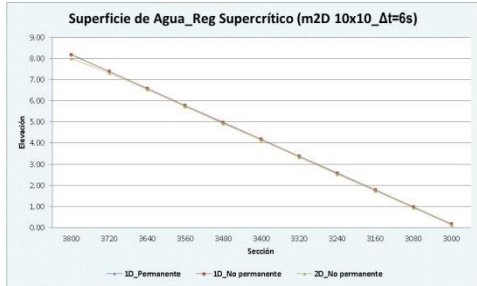
La modelización en régimen supercrítico, muestra un perfil de superficie con buena aproximación respecto al perfil del modelo patrón. Sin embargo, al momento de verificar la rapidez en que se estabiliza el modelo, podemos indicar que usando la malla de dimensión 10x10m el modelo se estabiliza mucho antes que haciendo uso de las otras mallas.

Malla (m)	5x5	10x10	20x20	40x40
Tiempo (min)	40	20	120	120

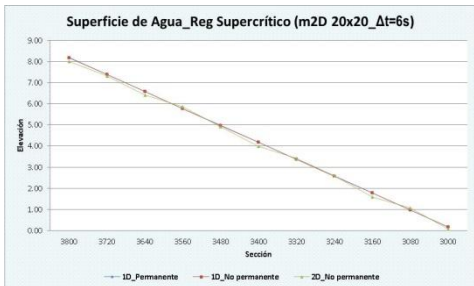
**Tabla 5.** Estabilización del modelo en Régimen Supercrítico, para varias dimensiones de malla



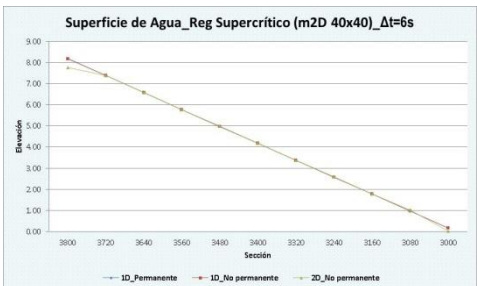
**Figura 8.** Superficie de agua Rég. SUPERCRITICO,  $\Delta t=6s$ , Malla: 5x5m



**Figura 9.** Superficie de agua Rég. SUPERCRITICO,  $\Delta t=6s$ , Malla: 10x10m



**Figura 10.** Superficie de agua Rég. SUPERCRITICO  $\Delta t=6s$ , Malla: 20x20m

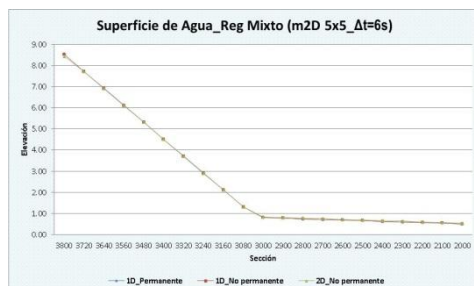


**Figura 11.** Superficie de agua Rég. SUPERCRITICO  $\Delta t=6s$ , Malla: 40x40m

La modelización en régimen mixto similar al caso anterior presenta buena aproximación respecto al perfil obtenido del modelo patrón. La malla de dimensiones 10x10m permite emplear menos tiempo de estabilización respecto a las otras mallas empleadas.

Malla (m)	5x5	10x10	20x20	40x40
Tiempo (min)	60	40	120	120

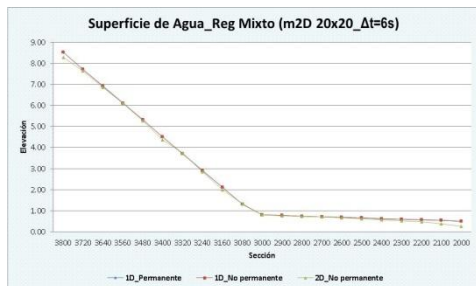
**Tabla 6.** Estabilización del modelo en Régimen Supercrítico, para varias dimensiones de malla



**Figura 12.** Superficie de agua Rég. MIXTO,  $\Delta t=6s$ , Malla: 5x5m



**Figura 13.** Superficie de agua Rég. MIXTO,  $\Delta t=6s$ , Malla: 10x10m



**Figura 14.** Superficie de agua Rég. MIXTO,  $\Delta t=6s$ , Malla: 20X20m



**Figura 15.** Superficie de agua Rég. MIXTO,  $\Delta t=6s$ , Malla: 40x40m

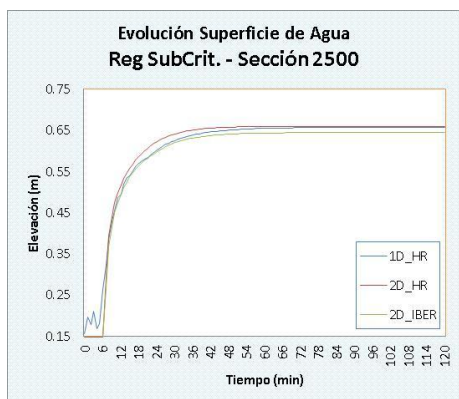
### 3.3 Evolución temporal del comportamiento del flujo para régimen Subcrítico, Supercrítico y Mixto, en condiciones no permanentes.

La evolución temporal del flujo se ha realizado en condiciones no permanentes y se ha evaluado en determinadas secciones a lo largo de los canales que nos permitirá mostrar la rapidez en que se estabiliza el flujo en dicha sección. Se ha creído conveniente emplear adicionalmente el software Iber 2.2. Las condiciones de contorno de los modelos quedan definidas de la siguiente manera:

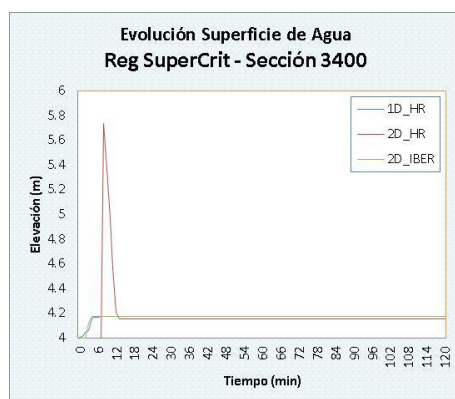
CC	HEC-RAS 1D_NoPerm	HEC-RAS 2D_NoPerm	IBER 2D_NoPerm
<b>Aguas Arriba</b>	Hidrog. Flujo	Hidrog. Flujo	Hidrog. Flujo
<b>Aguas Abajo</b>	Calado Normal	Calado Normal	Vertedero

**Tabla 7.** Condiciones de contorno en la modelización en la evolución de la superficie de agua

El hidrograma de flujo del modelo 1D en HEC-RAS, tiene una crecida repentina en el instante  $t=1\text{min}$  y en adelante mantener el caudal de  $40\text{m}^3/\text{s}$ . Los valores de coeficiente de vertedero del modelo Iber se obtuvieron a partir de la modelización en HEC-RAS 1D no permanente.



**Figura 16.** Evol. Temporal de superficie de agua Régimen Subcrítico, Sección 2500



**Figura 17.** Evol. Temporal de superficie de agua Régimen Supercrítico, Sección 3400

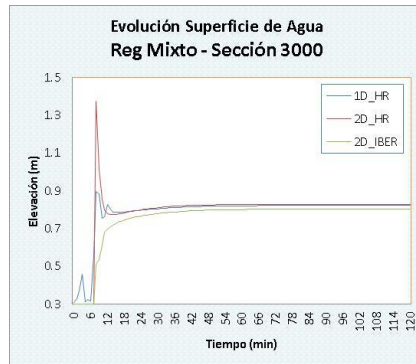


Figura 18. Evol. Temporal de superficie de agua, Régimen Mixto, Sección 3000

Se aprecia una inestabilidad en el cálculo 2D con HEC-RAS posiblemente atribuibles al tratamiento que se hace del proceso de mojado a partir de fondo seco.

## 4. Modelización hidráulica del Río Ter en dos dimensiones empleando HEC-RAS 5.0 (versión beta) e Iber 2.2

El río Ter es el más largo, y uno de los más caudalosos de las cuencas internas catalanas, de longitud 208 kilómetros y una superficie de cuenca de 3010 Km<sup>2</sup>; con un caudal medio de 17.5m<sup>3</sup>/s. En la modelización se empleará una llanura de inundación que tiene área aproximada de 1139 ha, y posee un relieve mayormente con pendientes de entre 0-20 %. La llanura se encuentra conformada por zonas agrícolas, vulnerables a inundaciones

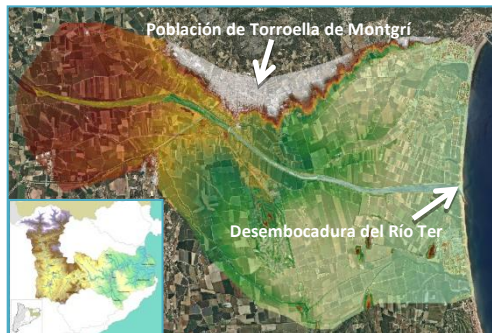
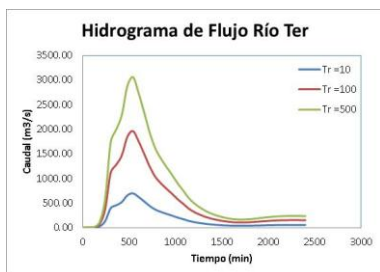


Figura 19. Llanura de Inundación a evaluar.

### 4.1 Parámetros para la modelización de la llanura del Río Ter

Las condiciones de contorno empleadas en ambos softwares serán: aguas arriba se empleará un hidrograma de flujo para períodos de retorno  $T_r=10, 100$  y  $500$  años (elaborado en la Agencia Catalana del Agua); y aguas abajo una curva de gasto para representar los valores aproximados del Mar Mediterráneo en la desembocadura del Río Ter. Se ha considerado para la llanura de inundación un valor de coeficiente de manning  $n=0.06$ .

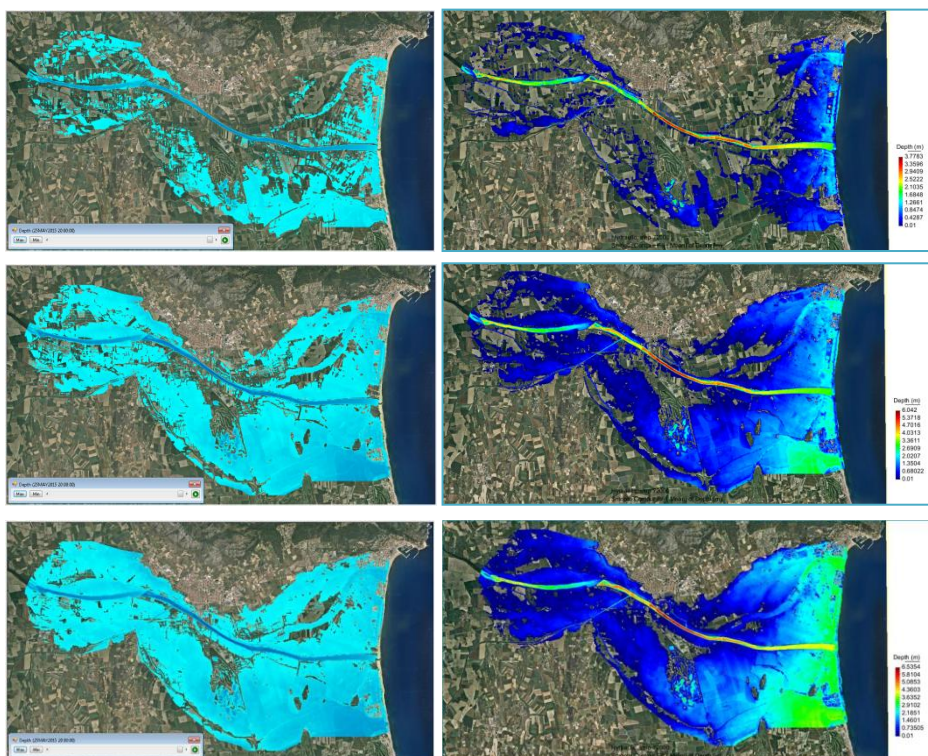




**Figura 20.** Hidrograma de flujo empleado en la modelización del Río Ter

De acuerdo a pruebas realizadas, se decidió trabajar con paso de tiempo computacional y dimensión de malla, de 6 segundos y 40x40m, respectivamente. Podemos indicar además que se ha modificado la malla para el modelo en HEC-RAS 5.0, con lo cual se ha adecuado a las sinuosidades del terreno

#### 4.1 Resultados de Modelización bidimensional con HEC-RAS 5.0 e Iber 2.2



**Figura 21.** Propagación del flujo de agua, Lado izquierdo HEC-RAS 5.0, Lado derecho Iber 2.2. para periodos de retorno  $Tr=10, 100$  y  $500$  años (de arriba hacia abajo)

## **5. Conclusiones**

HEC-RAS 5.0 (versión beta), a través de RAS Mapper incorpora las herramientas básicas para la modelización en dos dimensiones. El empleo del mismo es bastante sencillo en el pre y post proceso. La particularidad más notable al momento de adecuar la malla 2D al terreno subyacente es el tiempo empleado, si hablamos de evaluar grandes llanuras de inundación.

En el desarrollo del presente trabajo, destacamos la importancia de los parámetros computacionales como son: la dimensión de malla y paso de tiempo computacional, pues nos permiten asegurar la estabilidad del modelo.

Los resultados obtenidos en los modelos simples para canales prismáticos, han sido bastante satisfactorios, pues una vez que los modelos se estabilizan, las variaciones en los valores de superficie de agua son casi imperceptibles.

Finalmente, respecto al caso del modelo netamente 2D, podemos decir que debido a que no existe un patrón de comparación real, puesto que se usaron valores de hidrograma proyectados, no podemos asegurar si la mancha de agua mostrada en ambos softwares nos ofrece valores cercanos a la realidad, pero sí, rescatar la similitud que tienen ambos al momento de presentar los resultados en el pos proceso.

## **Agradecimientos**

Al grupo de investigación del Institut Flumen por el soporte académico brindado para el desarrollo del presente trabajo.

## **Referencias**

Bladé, E., Sánchez Juny, M., Sánchez H.P., Niñerola, D. y Gómez, M. (2009). Modelización numérica en ríos en régimen permanente y variable, Una visión a partir del modelo HEC-RAS. Barcelona: Edicions UPC.

Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., Dolz, J. y Coll, A. (2014). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. En: Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería 30, 1–10.

Chow, Ven Te., Maidment, D. y Mays, L. (1994). Hidrología Aplicada. Santafé de Bogotá : McGraw-Hill Interamericana.

Brunner, Gary W. (October 2014) Combined 1D and 2D Modeling with HEC-RAS Hidrologyc Engineering Center (HEC).

Iber: Modelización bidimensional del flujo en lámina libre en aguas poco profundas. Manual básico de usuario (Mayo 2012)