

## OPCIONES DE RESTAURACIÓN ECOLÓGICA A TRAVÉS DE SIMULACIÓN NUMÉRICA; CASO ESTUDIO DEL TRAMO MEDIO DEL RIO EBRO, ESPAÑA

### ECOLOGICAL RESTORATION OPTIONS WITH NUMERICAL SIMULATION: CASE STUDY OF THE MIDDLE EBRO RIVER, SPAIN

Ernesto Veres<sup>1</sup>, María González-Sanchis<sup>2</sup>, Javier Murillo<sup>3</sup> y Pilar García-Navarro<sup>3</sup>

#### Resumen

Durante el siglo pasado, el régimen de flujo del río Ebro se ha visto afectado considerablemente. El riego de las tierras bajas y el abandono de tierras de cultivo en las zonas altas han generado fuertes cambios en la hidrología, en la carga de sedimentos y de las interacciones en las llanuras de inundación. Por otro lado, la fuerte regulación del río debido a la construcción de embalses junto con la colocación de estructuras de protección (terraplenes) ha mermado la actividad geomorfológica de la cuenca. En el caso de las llanuras de inundación, la falta de actividad geomorfológica ha limitado la interacción dinámica entre el agua y la tierra, disminuyendo de esta manera la conectividad hidrológica del sistema. Por ello se ha generado un proceso largo y profundo de degradación de los ecosistemas de las llanuras. El presente trabajo tiene como objetivo principal utilizar la simulación numérica como herramienta útil para entender y predecir la dinámica de inundación y morfológica de la llanura de inundación. La zona de estudio se localiza en la Reserva Natural de Los Galachos, a 12 km aguas abajo de Zaragoza, en el tramo medio del río Ebro. Se ha planteado utilizar la simulación numérica para analizar y proponer algunas alternativas de restauración ecológica basadas en: i) manejo de caudales, y/o ii) modificación del terreno. Para ello se ha definido un modelo hidráulico bidimensional (2-D) de régimen variable que se ha resuelto a través del software GUAD 2D (referencia a [www.inclam.com](http://www.inclam.com)). Los resultados muestran, respecto a la dinámica de flujo, que la mayor parte del área de estudio es inundada con caudales ordinarios. Por otro lado, como indicador de la actividad geomorfológica, se ha determinado el esfuerzo crítico cortante o shear stress a partir de los resultados obtenidos de las simulaciones (profundidad y velocidad del flujo). Las alternativas propuestas para la restauración no han inducido a cambios geomorfológicos importantes, sin embargo, se ha observado un aumento de los valores del shear stress en la zona restaurada que, a largo plazo, podrían generar cambios morfológicos. Finalmente, se ha demostrado el potencial de la simulación numérica como herramienta para predecir la dinámica de inundación y morfológica de las llanuras de inundación.

**Palabras clave:** Restauración ecológica, llanura de inundación, esfuerzo crítico cortante, simulación numérica

#### Abstract:

During the last century, the Ebro river flow regime has been considerably affected. The lowland irrigation and the abandonment of agricultural land in the highlands have caused strong changes in hydrology, the sediment load and floodplain interactions. On the other hand, the strong regulation of the river caused by the construction of dams and structures of protection (embankments) has diminished the basin geomorphological activity. In the case of the floodplain, the geomorphological activity shortage has limited the dynamic interaction between water and land, reducing the hydrological connectivity of the system. Therefore, a long and deep process of degradation of the floodplain ecosystem is generated. The present work presents the numerical simulation as a useful tool to understand and predict the flood and morphological dynamics of the floodplain. The study area is located in the Natural Reserve of "Los Galachos", 12 km downstream from Zaragoza city, in the middle Ebro basin section. We use numerical simulation to analyze and propose some alternatives for ecological restoration based on: i) flow management, and/or ii) terrain modification. We select a two-dimensional (2-D) hydraulic model in a variable regime that it is resolved by the GUAD 2D software (information at [www.inclam.com](http://www.inclam.com)). The results show, regarding flow dynamics, most of the study area is flooded under ordinary flooding events. On the other hand, as an indicator of the geomorphological activity, it is determined the critical shear stress from the results of the simulations (depth and velocity). The alternatives proposed for the restoration do not induce significant geomorphological changes, however it is observed an increasing of the shear stress values in the restored area that, in the longer term future, could generate morphological changes. Finally, it is demonstrated the numerical simulation as a tool capable of predict the flood and morphological dynamics of the floodplain.

**Keywords:** Ecological restoration, floodplain, shear stress, numerical simulation

<sup>1</sup> Comisión Nacional de Riego (CNR), Gobierno de Chile.

<sup>2</sup> Universidad Politécnica de Valencia, España.

<sup>3</sup> Universidad de Zaragoza (UZ), España.

## INTRODUCCIÓN

Las llanuras de inundación son ecotonos entre los ambientes de las zonas de tierra y el cauce del río donde se alterna estados acuáticos y terrestres (Junk et al., 1989). La interacción dinámica entre el agua y la tierra generada por la frecuencia en las inundaciones es el principal proceso que produce y mantiene estos ecosistemas (Bayley et al., 1995). Esta interacción se denomina conectividad hidrológica y constituye el elemento necesario que genera el intercambio lateral de materia y energía a través de flujo superficial (el concepto de pulso de inundación de Junk et al. (1989)) y subterráneo (Heiler et al., 1995).

Como resultado aparecen diferentes hábitats generados a través del paisaje fluvial, donde muchas especies coexisten (Hauer & Lorang, 2004). Las llanuras de inundación están considerados centros de biodiversidad (Tockner & Standford, 2002). Sin embargo, estos ecosistemas también son los más alterados de la tierra, cuyo ritmo de desaparición continúa creciendo de manera alarmante (Vitousek et al., 1997; Olson & Dinerstein, 1998; Ravenga et al., 2000).

Particularmente, la Cuenca del río Ebro (NE de España) en su tramo medio ha visto limitada su actividad geomorfológica durante la última mitad del s. XX, debido principalmente a la alteración del mismo. Dicha limitación se ha generado a partir de la construcción de estructuras de protección (terraplenes) y a una fuerte regulación del río (Ollero, 2010). Además, el cambio de la dinámica en la agricultura con el riego de las tierras bajas y el abandono de las tierras de cultivo en las zonas altas de la cuenca han generado fuertes cambios en la hidrología, en la carga de sedimentos y en las interacciones en las llanuras de inundación (Ibáñez et al., 1996; Batalla et al., 2004; Frutos et al., 2004; Pinilla, 2006; Ollero, 2007; Cabezas, et al., 2009).

Esta falta de actividad geomorfológica ha limitado la conexión dinámica entre el agua y la tierra, disminuyendo la conectividad hidrológica del sistema. De esta manera se ha generado un proceso acusado de degradación de los ecosistemas de la llanura de inundación. La *Reserva Natural de Los Galachos de La Alfranca, Pastriz, la Cartuja y el Burgo de Ebro*, perteneciente al tramo medio de la cuenca del Ebro y área de estudio del presente trabajo tampoco ha escapado a esta situación (González - Sanchis, et al., 2012).

Diversos autores proponen la alternativa de restauración ecológica para revertir tal situación. Estas estrategias se basan principalmente en el manejo de caudales y modificación del terreno (Buijse et al., 2002; Cabezas et al., 2008).

Las llanuras fluviales son áreas sujetas a inundaciones recurrentes en las que la representación detallada del avance del frente de inundación es de interés indudable. Es importante contar con un modelo que recoja la complejidad de

la topografía y sus consecuencias sobre la dinámica del flujo. Esto invalida aproximaciones simplistas de tipo unidimensional (1D) basadas en secciones transversales. Los modelos bi y tri-dimensionales (2D, 3D) ofrecen una mejor representación de la hidrodinámica. Los modelos 3D proporcionan resultados muy detallados al precio de un coste computacional muy alto que a menudo los vuelve ineficientes. Este coste puede aliviarse usando modelos 2D promediados en la vertical dado que las escalas horizontales y los calados habituales permiten este tipo de aproximación.

La mayor parte de los modelos aplicados para simulaciones medioambientales son de régimen no permanente (Bates et al., 1998; Somes et al., 1999; Horritt, 2000; Beffa & Connell, 2001; Cobby et al., 2003), incluso para simulación de estados permanentes. De entre estos, algunos se basan en simplificaciones que desprecian términos inerciales (Bates et al., 1998; Horritt, 2000; Cobby et al., 2003; Bates and De Roo., 2000). Esto reduce considerablemente el significado físico de la velocidad calculada. Más aun, los basados en la aproximación de onda cinemática son incapaces de recoger efectos de remanso, de gran importancia en las llanuras fluviales (Junk et al., 1989). Los modelos 2D de onda dinámica completos (Murillo et al., 2009) ofrecen por el contrario una información fiable de calado y velocidad del flujo promediado en la vertical de gran importancia en estudios como el presente (González-Sanchis et al., 2012).

Por todo lo anterior, el objetivo general del presente trabajo es utilizar la simulación numérica en 2D como herramienta útil para entender y predecir la dinámica de inundación y morfológica de la llanura de inundación de la *Reserva Natural de los Galachos*.

## METODOLOGÍA

### Área de Estudio

La zona de estudio se localiza dentro de la Reserva Natural de Los Galachos de La Alfranca, Pastriz, la Cartuja y el Burgo de Ebro, perteneciente al tramo medio de la cuenca del río Ebro (41°39' N, 0°52' W) localizada aproximadamente a 12 km aguas abajo de la ciudad de Zaragoza. La cuenca del Ebro se sitúa en el cuadrante NE de la Península Ibérica ocupando una superficie total de 85.362 km<sup>2</sup>. Es la cuenca hidrográfica más extensa de España (CHE, 2013).

El río Ebro, con una longitud total de 910 km, es el más largo de los ríos de la Península Ibérica que desembocan en el Mediterráneo. Tiene una descarga anual al mar Mediterráneo de 18.138 hm<sup>3</sup> y de restos geomorfológicamente activos, a pesar de las 170 presas y embalses situados en el río y en sus afluentes (Cabezas, et al., 2008).

El clima de la cuenca del río Ebro es semiárido caracterizado por la escasez de precipitaciones (400

mm/año) y temperaturas a menudo superiores a 35° C en el periodo estival (González, 2010). El régimen hidrológico del río Ebro es pluvionival y, como la mayoría de los ríos mediterráneos, caracterizado por la alta variabilidad del flujo intra e inter- anual (Ollero, 2010).

En la estación de aforo de Zaragoza la media del caudal mensual registrado es de 230 m<sup>3</sup>/s (1981–2003) y la cota de la lámina de agua oscila entre

175 a 185 msnm en el cauce del río sobre la base de la vieja terraza del mismo (Cabezas et al., 2008). Los niveles bajos en el caudal (30-50 m<sup>3</sup>/s) ocurren frecuentemente en el verano (4 a 5 meses), aunque el flujo superficial sigue siendo permanente (González, 2010). Tal como se observa en la figura 1, la zona de estudio es de carácter meandriforme muy característico del tramo medio del río Ebro (Cabezas et al., 2008).

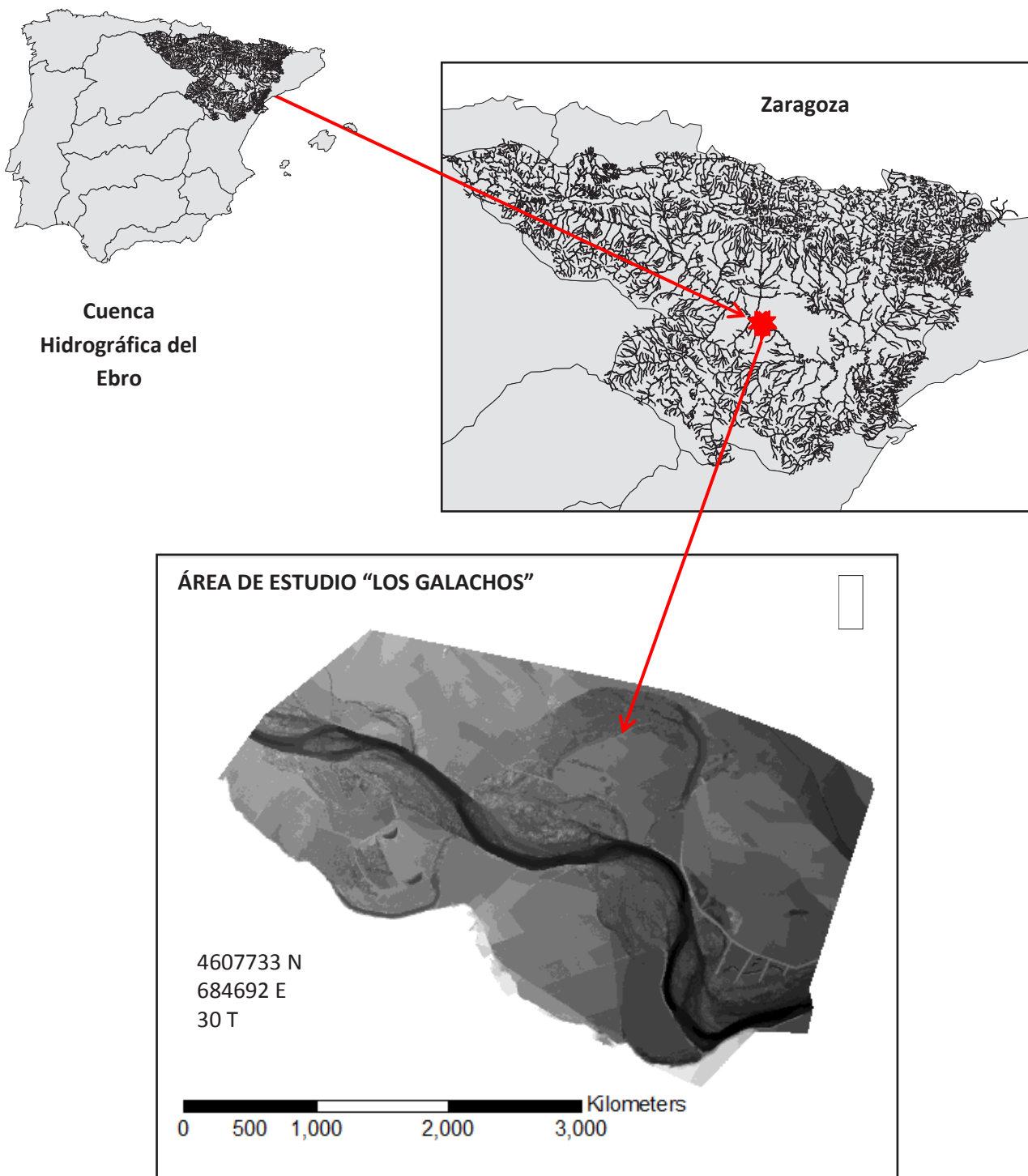


Figura 1. Ubicación área de estudio

La zona estudiada del río está notablemente afectada por estructuras de protección (terraplenes), donde se ha visto limitada la actividad geomorfológica. En esa línea, Cabezas et al. (2008) indica que la fuerte estabilidad morfológica de la llanura inundable está conduciendo a un deterioro de la diversidad del paisaje. Estos y otros estudios han descubierto la necesidad de una estrategia de recuperación de la llanura inundable enfocada a la restauración de la dinámica hidromorfológica (González-Sanchis et al., 2012; González-Sanchis et al., 2014).

Sin embargo en algunos de los estudios, las estimaciones y las propuestas de restauración se han basado en estudios empíricos (Cabezas et al., 2008), que aunque necesarios, implican un elevado coste económico y humano y tienen poca capacidad de extrapolación. Por lo tanto, la simulación numérica puede ser un instrumento adecuado para una selección eficiente de la mejor alternativa de restauración ecológica (González-Sanchis, 2012).

### Modelo Hidráulico

Los modelos de régimen variable bidimensionales tienen su principal campo de aplicación en los casos en que la capacidad de laminación representa un factor importante. Se pueden resolver casos como las avenidas que discurren por grandes llanuras de inundación, el estudio de la evolución de avenidas que superan las motas de protección, y otros estudios tales como el funcionamiento de deltas o humedales de poca profundidad.

Desde el punto de vista matemático, las ecuaciones que gobiernan el flujo de superficie libre forman un sistema de ecuaciones no lineales en derivadas parciales de tipo hiperbólico. Son las ecuaciones 2D de Saint Venant o de aguas poco profundas, que resulta el modelo más adecuado para el análisis hidráulico de nuestro caso de estudio (Vreugdenhil, 1994; Wu, 2007):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( hu^2 + g \frac{h^2}{2} \right) + \frac{\partial huv}{\partial y} = gh(S_{0x} - S_{fx})$$

$$\frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial huv}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left( hv^2 + g \frac{h^2}{2} \right) = gh(S_{0y} - S_{fy})$$

donde  $h$  representa la profundidad del agua,  $hu$  y  $hv$  son los caudales unitarios a lo largo de las direcciones coordenadas  $x$ ,  $y$  respectivamente,  $S_{0x}$ ,  $S_{0y}$  reflejan las variaciones del fondo del cauce en forma de pendiente:

$$S_{0x} = -\frac{\partial z}{\partial x}, S_{0y} = -\frac{\partial z}{\partial y}$$

y  $S_{fx}$ ,  $S_{fy}$  constituyen los términos de fricción del agua con el fondo del cauce (pendiente motriz) en cada una de las direcciones coordenadas:

$$S_{fx} = \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}}, S_{fy} = \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}}$$

En el presente trabajo el sistema de ecuaciones se resolvió a partir del software de cálculo GUAD - 2D, prediciendo con exactitud los detalles de la inundación. El procedimiento de resolución del GUAD - 2D se basa en el método de volúmenes finitos (Murillo et al., 2007) porque tratan de combinar lo mejor de los métodos de elementos finitos, su flexibilidad geométrica, con lo mejor de los métodos en diferencias finitas, su flexibilidad en la definición del flujo discreto (valores discretos de las variables dependientes y sus flujos asociados).

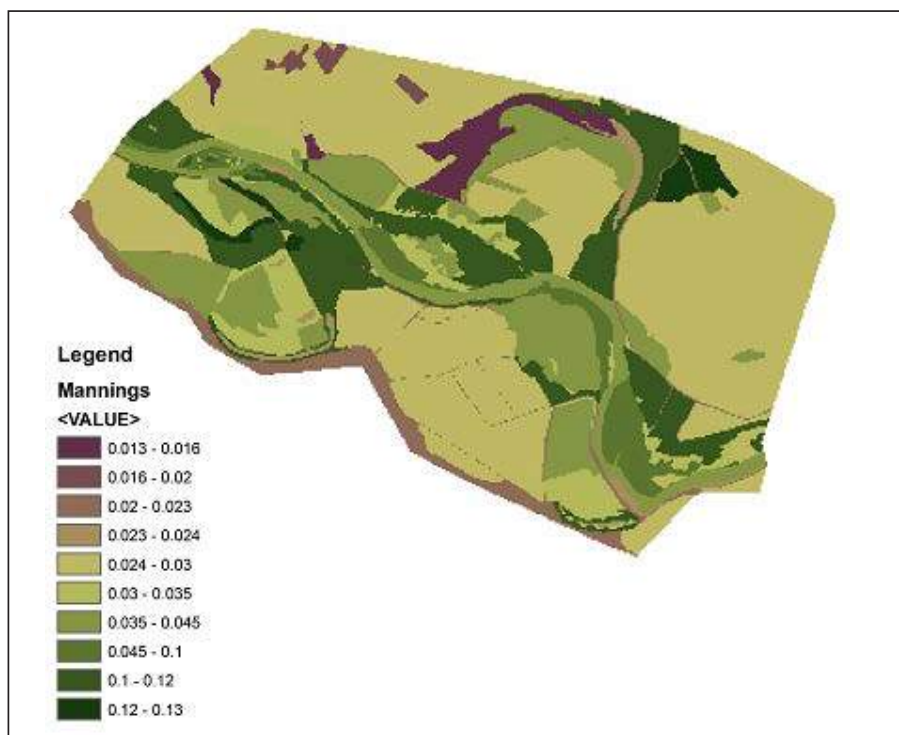
### Topografía

El modelo digital del terreno (MDT) utilizado en este trabajo fue facilitado por la Confederación Hidrográfica del Ebro. Dicho modelo fue obtenido a partir de Laser Induced Direction and Ranging (LIDAR), por medio de un único impulso sensor captura, con 0,15 metros de precisión vertical y 1 m resolución horizontal. El escáner a partir de los sensores LIDAR genera una alta calidad de los datos topográficos, proporcionando una buena información sobre el terreno para integrar de forma bidimensional modelos hidráulicos numéricos (Marks & Bates, 2000).

Sin embargo, las redes triangulares son la mejor representación discreta para representar la información sobre el terreno (Uchida et al., 2002). Por eso, se discretizó el MDT en una red triangular estructurada. Las celdas triangulares computacionales se crearon a partir de un tamaño de celda de 10 m. Como resultado se obtuvo una red malla triangular con 174.923 celdas.

### Coefficientes de Manning

La rugosidad de la llanura de inundación fue caracterizada in situ (González-Sanchis et al., 2012), dividiéndola en grupos de hábitats de estructura homogénea. Para tal fin se utilizó un GPS diferencial Topcon ® (0,03 m de precisión). Para determinar el valor del coeficiente de Manning, a cada hábitat se le asignó un valor según las recomendaciones encontradas en la bibliografía especializada (figura 2 y tabla 1).



**Figura 2.** Coeficientes de Manning

**Tabla 1.** Coeficientes de Manning

Tipo	Valor Manning	Referencia
Cauce Principal	0,035	Acrement & Schenides, 1990
Urbano	0,05	Sande van Der et al., 2003
Cultivos	0,035	Palmeri et al. , 2002
Zona inundada	0,024	Palmeri et al. , 2002
Bosque de Pino	0,124	Poole et al., 2004
Camino de tierra	0,027	Chow, 1959
Pastizal	0,033	Palmeri et al. , 2002
Chopera, alameda	0,05	Martin Vide, 2002
Gravas	0,028	Acrement & Schenides, 1990
Álamos o sauces 5-10 años en suelo con gravas	0,1	Acrement & Schenides, 1990
Álamos o predomina sauces 10-15 años en suelo arenoso	0,04	Acrement & Schenides, 1990
Álamos o predomina sauces < 2 m de altura y < 5 cm de diámetro a la base	0,13	Poole et al., 2004
Cañaveral	0,13	Rhee et al., 2008
Pastizal alto con sauces dispersos 1- 5 años	0,124	Acrement & Schenides, 1990
Bosque maduro y arbustos zarzamora	0,12	Poole et al., 2004
Cauce secundario antiguo	0,13	Poole et al., 2004
Álamos dispersos y Tamarix 15 - 20 años en suelo con gravas	0,036	Bedient & Huber, 1988
Escarpe	0,023	Chow, 1959

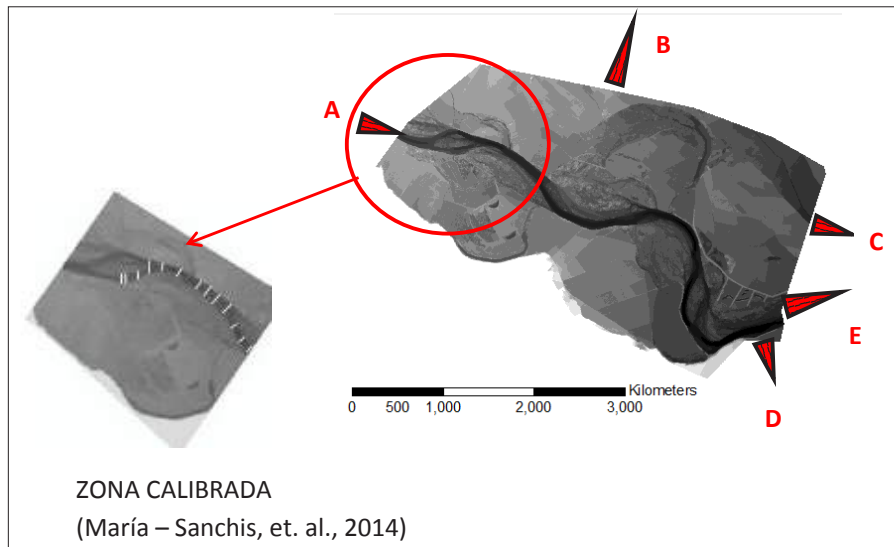
**Condiciones de contorno**

Se definieron las siguientes condiciones de contorno (figura 3):

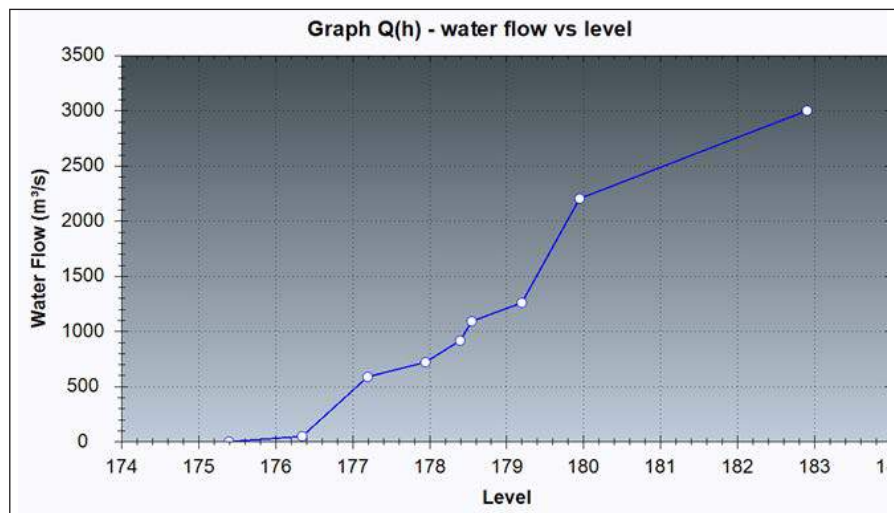
- Entrada: (A) Caudal en función del tiempo: Q (t).
- Salida: (B), (C) y (D) Salida crítica: en los tres casos anteriores se simuló una descarga libre debido a que la serie de caudales de carácter extraordinario inundaba casi por completo toda nuestra área de estudio. Los resultados demostraron que las secciones donde se puso

altura crítica como condición de borde no influyen en el área de estudio restaurada.

- (E) Caudal en función del calado: Q (h). La curva de aforo para determinar Q (h) se obtuvo de forma experimental tomando la cota para diferentes caudales a la salida del dominio mediante un GPS diferencial. Debido a la representación “digital” del terreno, la curva de aforo se ajustó, utilizando para ello información del trabajo de campo (cota y área inundada) (figura 4):



**Figura 3.** Condiciones de contorno y zona calibrada



**Figura 4.** Curva de aforo utilizada como condición de contorno a la salida del cauce

**Validación del modelo**

El modelo no estaba calibrado para todo el dominio pero sí para parte del mismo (González-Sanchis, et. al., 2012). Se midió en terreno con un GPS diferencial Topcon ® (0,03 m de precisión) la extensión del área inundada durante el pico de la inundación de diversos eventos de riada. Posteriormente se realizó

la comparación entre el área inundada calculada y el área inundada medida a partir de la siguiente expresión (Bates & De Roo, 2000):

$$Fit_A(\%) = 100 \frac{(A_o \cap A_c)}{(A_o + A_c) - (A_o \cap A_c)}$$

Donde  $A_o$  es el área inundada medida,  $A_c$  el área inundada calculada y  $A_o \cap A_c$  el área de intersección entre el área calculada y el área medida. Esta calibración ofreció un ajuste medio del área inundada de  $79 \pm 13\%$ .

Una segunda etapa consistió en el estudio del nivel (calado) de agua. Esta etapa se basó en la comparación de los resultados a partir del área inundada calculada y mediciones puntuales en terreno del nivel de agua. Para las mediciones en terreno se utilizaron sensores de nivel y temperatura Diver ® (0,5 cm de precisión). Finalmente, para estimar la relación entre el nivel de agua medido

y el nivel de agua calculado se utilizó la siguiente expresión:

$$Fit_D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n |(N_c - N_o)_i|$$

Donde  $N_o$  es el nivel de agua medido,  $N_c$  el nivel de agua calculado. Esta calibración ofreció un ajuste medio del nivel medido de  $0.27 \pm 0.05m$ . Debido al buen ajuste del modelo, se asumió que se podía ampliar el dominio (área de estudio) para cumplir el objetivo del presente trabajo (figura 3).

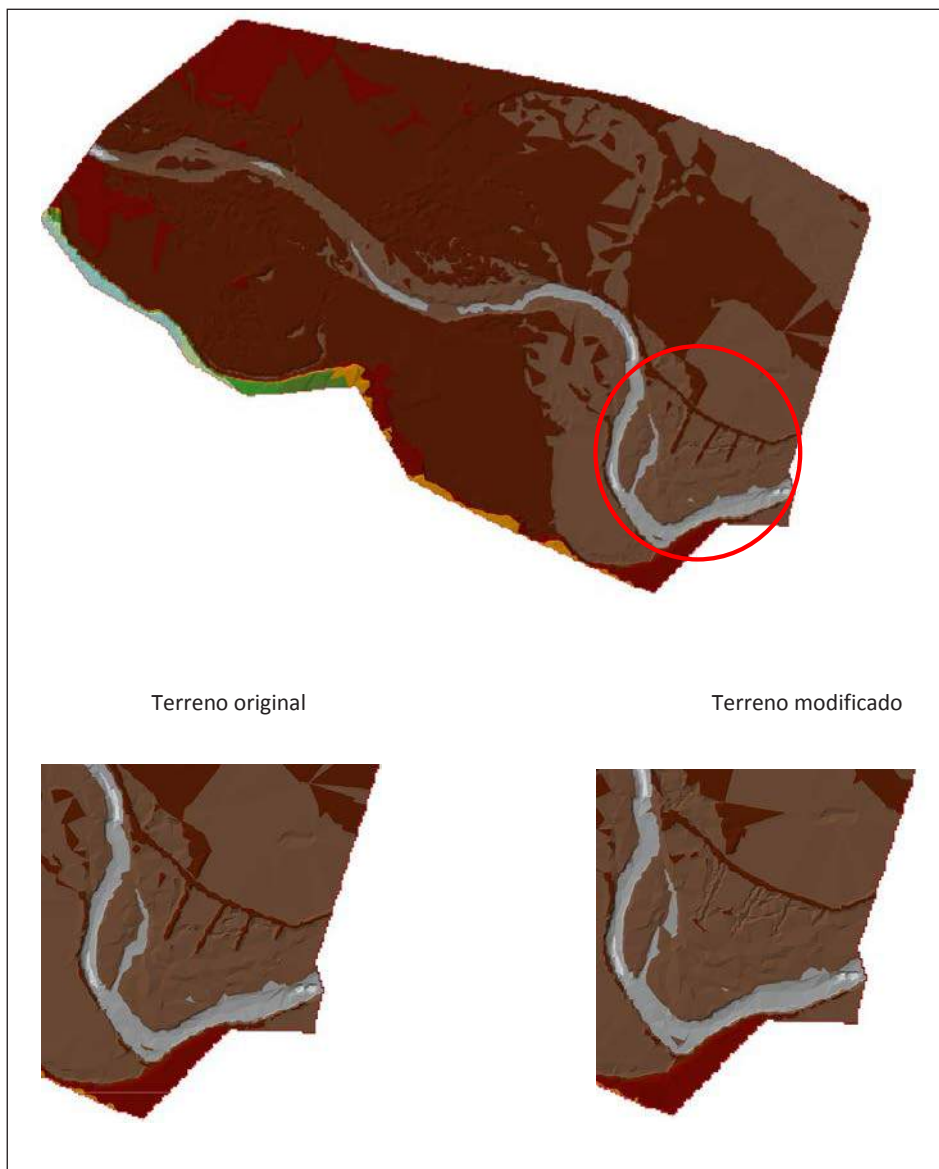


Figura 5. Zona restaurada

### Caudales

A partir del análisis hidrológico entre los años 1927 - 2010 realizado por González-Sanchis (2012), se definieron los caudales a utilizar en la simulación. Los caudales 500, 1.000, 1.500, 2.000 y 2.500  $m^3/s$  son caudales ordinarios (tal como se puede observar

a través de los periodos de retorno, son  $< 10$  años) y por lo tanto, se considera que son los que van a generar, teóricamente la mayor parte de la dinámica morfológica del área de estudio. Si estos caudales de mayor probabilidad, no son capaces de dinamizar

morfológicamente el área del presente estudio, significa que el sistema está demasiado estático. El caudal de 3.000 m<sup>3</sup>/s es de carácter extraordinario (> 10 años). Este caudal debería producir un mayor cambio morfológico, comparado con los anteriores (tabla 2):

**Tabla 2.** Caudales y sus periodos de retorno

Caudales Q (m <sup>3</sup> /s)	Periodos de retorno T (años)
500	0,09
1.000	0,29
1.500	0,74
2.000	2,25
2.500	5,93
3.000	18,69

### Esfuerzo cortante crítico o “shear stress”

Para poder representar la actividad geomorfológica en la llanura inundable es necesario definir un término que estime el flujo potencialmente erosivo. Este término debe expresar la capacidad erosiva del flujo, con la finalidad de representar el estado presente del sistema y sus posibilidades de restauración. La capacidad de erosión puede estimarse a partir del parámetro de Shields (Wu, 2007) o *shear stress* (esfuerzo crítico cortante):

$$\theta = \frac{|\tau_b|}{g(\rho_s - \rho_w)d_m}$$

Donde  $\rho_s$  y  $\rho_w$  son la densidad del material sólido y la densidad del agua, el diámetro medio de las partículas (en mm). Por otro lado el valor de  $\theta_c$ , solamente se puede determinar a partir de las características del fluido y sedimentos (Cao et. al, 2006) por medio del número de Reynolds de la partícula:

$$R = \frac{\sqrt{d_m^3(s-1)g}}{\gamma}$$

Donde  $\gamma$  es la viscosidad cinemática.

Para poder evaluar si se produce o no erosión, se utiliza el siguiente parámetro:

$$r_\theta = \frac{\theta}{\theta_c}$$

Cuando  $r_\theta > 1$ , entonces si se produce erosión.

Sin embargo, el valor de shear stress también puede estimarse a partir del siguiente desarrollo matemático (García – Arias et al., 2011):

La velocidad de corte en el lecho  $u^*$  se define como:

$$u^* = (gR_H S_f)^{1/2}$$

Donde  $R_H$  es el radio hidráulico,  $g$  la gravedad y  $S_f$  la pendiente motriz. Además,

$$v = C (R_H S_f)^{1/2}$$

donde  $v$  es la velocidad de flujo y  $C$  el coeficiente de rugosidad de Chézy. Combinamos ambas expresiones tenemos que:

$$vg^{1/2} = Cu^*$$

Por otro lado, es bien conocida la relación entre el coeficiente de rugosidad de Manning y Chézy:

$$C = 1,49n^{-1}R_H^{1/6}$$

Considerando que para flujos someros el radio hidráulico puede aproximarse al calado  $R_H \approx h$ , tenemos que la velocidad de corte en el flujo se puede definir también como:

$$u^* = 2,102vnh^{-1/6}$$

Finalmente se obtiene el valor de shear stress:

$$\tau = \rho u^{*2} \text{ (N/m}^2\text{)}$$

Siendo  $\rho$  la densidad del agua<sup>1</sup>

Debido a la sencillez de la expresión, en este trabajo se optó por utilizarla y deducir las tensiones de corte a partir de los calados y velocidades obtenidas de las simulaciones hidráulicas. A partir del trabajo realizado por Francés (2011), se consideró 100 N/m<sup>2</sup> como el límite a partir del cual puede generarse erosión en ambientes ribereños característicos de las llanuras de inundación. Por ello, se estableció este valor para determinar si se produce o no erosión y por lo tanto si se genera o no actividad geomorfológica en la llanura de inundación.

1 El río Ebro suele llevar unos 30 mg/l de sólidos en suspensión y en riadas 300 – 400 mg/l. En el presente trabajo se parte como hipótesis que las concentraciones de sólidos habituales son lo suficientemente bajas como para que no sea necesario tener en cuenta un cambio de densidad del agua.



## Estrategias de Restauración

Tal como se ha comentado anteriormente, la actividad geomorfológica del área de estudio ha disminuido como consecuencia de la construcción de estructuras de protección (terraplenes) a lo largo del cauce. Una opción de restauración ecológica consiste en la eliminación de algunas de éstas estructuras. Por ello, a partir del programa Arc Map 9.3 se seleccionaron cinco estructuras de protección (terraplenes) en el MDT cuya altura se redujo 2 metros. De esta manera se disminuyó su altura y por lo tanto su capacidad de protección generando una mayor conectividad hidrológica entre las zonas de tierra y el cauce. Con estas actuaciones puede esperarse una mayor actividad geomorfológica en la zona.

Una segunda opción de restauración ecológica consistió en incrementar el caudal circulante (gestión de caudales), de forma que fuese capaz de generar un cambio geomorfológico. Para ello se seleccionó el caudal de 3.000 m<sup>3</sup>/s, que correspondía a un periodo de retorno de 18,7 años (de carácter extraordinario).

## Escenarios

Se estudió el comportamiento de la dinámica fluvial de la llanura de inundación y su actividad geomorfológica bajo cuatro escenarios mediante GUAD 2D:

1. Con el terreno original y caudales ordinarios (500 m<sup>3</sup>/s, 1.000 m<sup>3</sup>/s, 1.500 m<sup>3</sup>/s, 2.000 m<sup>3</sup>/s y 2.500 m<sup>3</sup>/s).
2. Con la eliminación de cinco motas y caudales ordinarios (500 m<sup>3</sup>/s, 1.000 m<sup>3</sup>/s, 1.500 m<sup>3</sup>/s, 2.000 m<sup>3</sup>/s y 2.500 m<sup>3</sup>/s).
3. Con el terreno original y un caudal extraordinario de 3.000 m<sup>3</sup>/s.
4. Con la eliminación de cinco motas y un caudal extraordinario de 3.000 m<sup>3</sup>/s.

Respecto a la actividad geomorfológica, a partir de los resultados generados en el GUAD – 2D (velocidad y profundidad) junto con la rugosidad (Manning) se obtuvo el shear stress. De esta manera se pudo estudiar el flujo potencialmente erosivo formado. Para cada simulación generada, se partió de la simulación anterior para crear las condiciones iniciales. Es decir, para la simulación en el terreno original y un caudal de 1.500 m<sup>3</sup>/s se definieron las condiciones iniciales el resultado generado para un caudal de 1.000 m<sup>3</sup>/s. Las simulaciones acabaron una vez que se alcanzó el régimen estacionario en todo el dominio ( $Q_{\text{entrada}} = Q_{\text{salida}}$ ). En algunos casos, GUAD – 2D se demoró casi 8 horas para simular 30 horas del evento real para alcanzar el estacionario.

## RESULTADOS

### 1) Con el terreno original y caudales ordinarios:

Tal como se puede observar en la tabla 3, a medida que aumentaron los caudales, se incrementó el área inundada llegando incluso a un porcentaje del área total inundada de 83%. Por tanto, con caudales ordinarios se generó suficiente conectividad en todo el área de estudio. Sin embargo, los caudales ordinarios fueron incapaces de incrementar potencialmente la capacidad erosiva del flujo (shear stress > 100 N/m<sup>2</sup>). Un caudal de 2.500 m<sup>3</sup>/s solamente generó un 0,03% de área potencialmente erosionada. Así pues, en este caso los caudales ordinarios no dinamizaron la geomorfología de la llanura de inundación.

**Tabla 3.** Resultados escenario 1

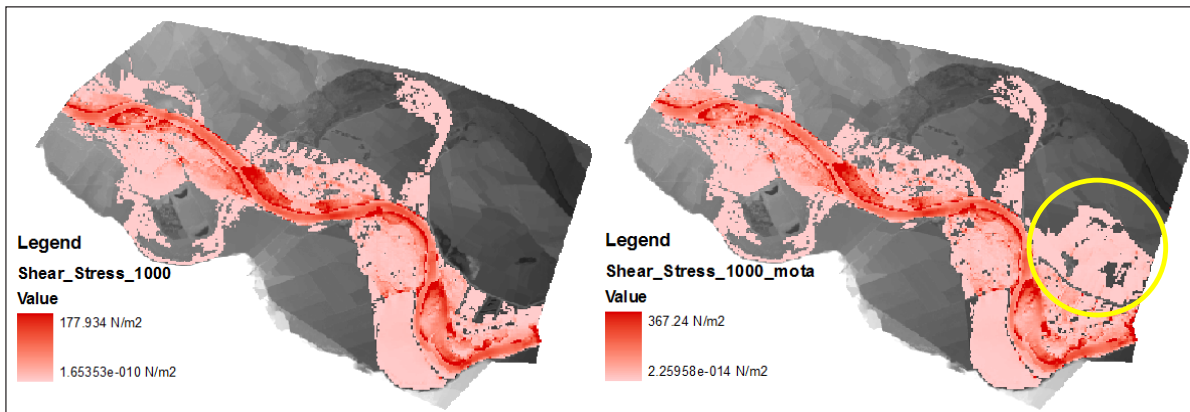
Q	Área inundada		Área erosionada	
	m <sup>2</sup>	%	m <sup>2</sup>	%
500	1.048.012	10,13	0	0,00
1.000	3.162.000	30,57	392	0,00
1.500	6.281.600	60,73	392	0,00
2.000	7.870.700	76,10	1.372	0,01
2.500	8.566.900	82,83	3.528	0,03

### 2) Con la eliminación de cinco motas y caudales ordinarios:

En este caso (ver tabla 4), los valores fueron muy similares a los anteriores tanto para el área inundada como para el área erosionada. Solamente en el caso de 1.000 m<sup>3</sup>/s donde el área inundada fue alrededor de un 5% mayor debido a la actuación realizada sobre las 5 motas. Por otra parte los valores máximos del shear stress fueron prácticamente iguales que en el primer escenario. La actuación realizada en las motas no generó cambios significativos ni en la conectividad del sistema ni en la geomorfología de la llanura (figura 6).

**Tabla 4.** Resultados escenario 2

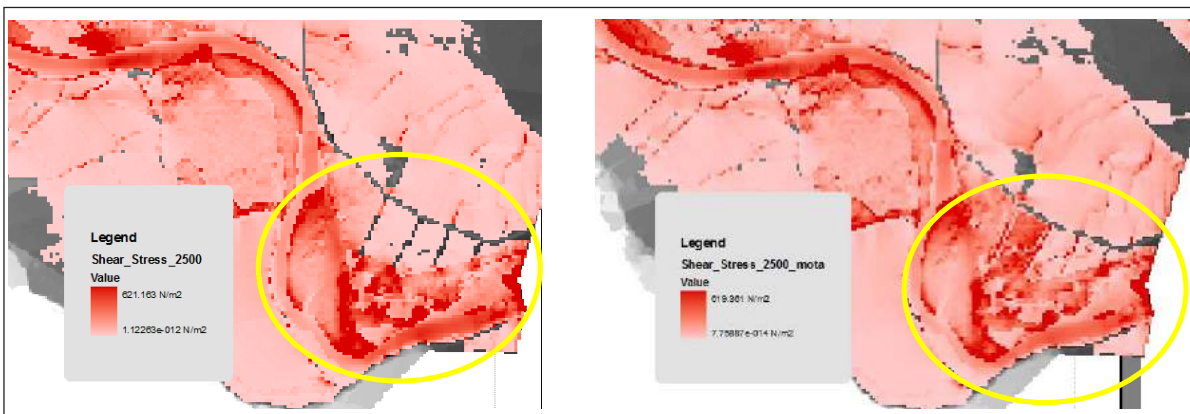
Q	Área inundada		Área erosionada	
	m <sup>2</sup>	%	m <sup>2</sup>	%
500	1.095.400	10,59	0	0,00
1.000	3.763.900	36,39	0	0,00
1.500	6.389.000	61,77	392	0,00
2.000	7.834.400	75,74	1.176	0,01
2.500	8.542.200	82,59	3.136	0,03



**Figura 6.** Comparación de los valores *shear stress* y área de inundación con terreno original y modificado para un caudal de 1.000 m<sup>3</sup>/s

Sin embargo, en la zona de actuación se puede observar que aunque no se ha alcanzado el valor crítico del *shear stress* (> 100 N/m<sup>2</sup>), sí que

aumentaron esos valores respecto al escenario con el terreno original (figura 7).



**Figura 7.** Comparación *shear stress* con terreno original y modificado para un caudal de 2.500 m<sup>3</sup>/s

**3) Con el terreno original y la incorporación de un caudal extraordinario (3.000 m<sup>3</sup>/s):**

En este caso, aumentó ligeramente el área total inundada (tabla 5). Sin embargo, el aumento del área total erosionada resultó casi inapreciable. El caudal extraordinario de 3.000 m<sup>3</sup>/s no generó cambios en la geomorfología de la llanura de inundación.

**Tabla 5.** Resultados escenario 3

Q	Área inundada		Área erosionada	
	m <sup>2</sup>	%	m <sup>2</sup>	%
3.000	8.924.200	86,28	6.272	0,06

**4) Con la eliminación de cinco motas y la incorporación de un caudal extraordinario (3.000 m<sup>3</sup>/s):**

La situación fue prácticamente igual al caso anterior. La acción combinada de un caudal extraordinario (3.000 m<sup>3</sup>/s) junto con la actuación de disminuir la

altura (2 m) de las cinco defensas no generó cambio alguno en la actividad geomorfológica del área de estudio (tabla 6). El valor máximo alcanzado para el *shear stress* fue prácticamente igual al escenario 3 (aportación del caudal extraordinario de 3.000 m<sup>3</sup>/s). Pero al igual que en el escenario 2, se observó un aumento de los valores de *shear stress* en la zona de actuación.

**Tabla 6.** Resultados escenario 4

Q	Área inundada		Área erosionada	
	m <sup>2</sup>	%	m <sup>2</sup>	%
3.000	8.898.400	86,03	6.076	0.06

**DISCUSIÓN**

Analizando los resultados anteriores, se observó que con caudales ordinarios se inundó la mayor parte de nuestro dominio. Sin embargo no se generó un cambio geomorfológico significativo (valores de *shear*

stress superiores a 100 N/m<sup>2</sup>). A pesar del efecto de un caudal de carácter extraordinario (3.000 m<sup>3</sup>/s) y la eliminación de altura de las defensas en el río, no se generó un cambio geomorfológico significativo.

Los resultados (porcentaje de área erosionada) coincidieron con los obtenidos en el trabajo de González – Sanchis et. al., (2012) en el tramo situado aguas arriba del área de actuación. En dicho estudio se estimó la capacidad de cambio geomorfológico a partir del parámetro de Shields (Wu, 2007). En cambio, en el presente trabajo se utilizó otra expresión que define el valor de 100 N/m<sup>2</sup> como límite de capacidad erosiva. La similitud de los resultados (tabla 7) confirmó que el valor de 100 N/m<sup>2</sup> era adecuado para nuestra área de estudio.

**Tabla 7.** Resultados estudio González – Sanchis et. al., 2012

Q	Flooded area		Eroded area	
	(m <sup>2</sup> )	%	(m <sup>2</sup> )	%
Escenario 1				
4.000	2.494.575	99	35.425,1	1.4
5.000	2.494.575	99	41.673,2	1.7
Escenario 2				
1.180	934.843	37	4.082	0.16
2.250	2.499.535	99	6.839	0.3
3.000	2.499.940	99	21.198	0.84

Por otro lado, solamente se percibió un aumento de los valores del shear stress (no superiores a 100 N/m<sup>2</sup>) en la zona restaurada, capaz de generar cambios morfológicos a más largo plazo. Pero a pesar de ello, las actuaciones propuestas no fueron capaces de permitir que el flujo potencialmente erosivo adentrarse a las zonas adyacentes del cauce y permitiese el intercambio de materia y energía.

Con estos resultados, se confirma que aunque el actual régimen de flujo puede ser lo suficientemente alto para mantener el bosque ribereño (González et al., 2010), su potencial erosivo es muy limitado y por lo tanto, la capacidad erosiva esperada no es significativa bajo el actual régimen de flujo y topografía. Por ello, se debería evaluar la alternativa más agresiva que consiste en la restauración de los antiguos canales de agua superficiales (los denominados galachos). Ya que las alternativas basadas en el manejo de caudal y modificación de las estructuras de defensas no generó cambio geomorfológico alguno (González - Sanchis, 2012; Buijse et al., 2002).

## CONCLUSIONES

A continuación se resumen las conclusiones de los resultados obtenidos:

1. Se han propuesto, simulado y analizado cuatro escenarios de restauración con el objetivo de incrementar la inundación y el morfodinamismo de la llanura de inundación a partir de un modelo de simulación numérica 2D. Estas actuaciones se han basado en el manejo del caudal y/o de la modificación del terreno.
2. Respecto a la dinámica de flujo, la mayor parte del área de estudio es inundada con caudales ordinarios (periodos de retorno menores de 10 años).
3. A pesar de ello, las actuaciones llevadas a cabo (manejo del caudal y modificación del terreno) no han demostrado ser efectivos en la inducción de cambios geomorfológicos importantes en la llanura de inundación. La falta de actividad geomorfológica está más influenciada por las defensas del río y el uso del territorio que por el régimen de caudales del Ebro.

Finalmente, ha quedado de manifiesto la potencialidad de la simulación numérica como herramienta para predecir la dinámica de inundación y morfológica de las llanuras de inundación, y que permite evaluar distintas estrategias de restauración ecológica basadas en el manejo de caudal y modificación del terreno.

## REFERENCIAS

- Acrement G.C. & V.R Schenides, (1990). *Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains*. Water-Supply Paper No. 2339 (Department of the Interior, U.S. Geological Survey, Reston, VA).
- Batalla, R. J.; Gómez, C. M. & G. M. Kondolf, (2004). *Reservoir induced hydrological changes in the Ebro River basin (NE Spain)*. Journal of Hydrology, 290: 117–136.
- Bates, P. D. & A. P. J. De Roo, (2000). *A simple raster-based model for flood inundation simulation*. J. Hydrol. (Amsterdam), 236(1–2), 54–77.
- Bates, P. D.; Horritt, M. S. & J. M. Hervouet, (1998). *Investigating two-dimensional, finite element predictions of floodplain inundation using fractal generated topography*. Hydrological Processes, 12(8), 1257–1277.
- Bayley, P.B., (1995). *Understanding large river-floodplain ecosystems*. Bio- Science, 45:153–158.
- Bedient P.B. & W.C. Huber, (1988). *Hydrology and floodplain analysis*. Addison-Wesley, Reading, Mass. (USA).

- Beffa, C., & R. J. Connell, (2001). *Two-dimensional flood plain flow. I: Model description*. J. Hydrol. Eng., 6(5), 397–402.
- Buijse A.D.; Coops, H; M. Staras, M.; Jans, L.H.; Vangeest, G.J.; Griff, R.E.; Ibelings, B.W.; Oosterberg, W & F.J.M. Roozen, (2002). *Restoration strategies for river floodplains along large lowland rivers in Europe*. Freshwater Biology 47(4): 889-907.
- Cabezas, A.; García, M.; Gallardo, B.; González, E.; González, M & F.A. Comín, (2009). *The effect of anthropogenic disturbance on the hydrochemical characteristics of riparian wetlands at the Middle Ebro River (NE Spain)*. Hydrobiologia, 617:101–116.
- Cabezas, A.; González, E.; Gallardo, B.; García, M.; González – Sanchis, M.; Jiménez, J.J. & F.A. Comín, (2008). *Effects of hydrological connectivity on the substrate and understory structure of riparian wetlands in the Middle Ebro River (NE Spain): Implications for restoration and management*. Aquatic Sciences, 70: 361 – 376.
- Cao, G.; Pender, Z. & J. Meng, (2006). *Explicit formulation of the shields diagram for incipient motion of sediment*. J. Hydraul. Eng., 132(10), 1907 – 1099.
- CHE, (2013). *Descripción de la Cuenca Confederación Hidrográfica del Ebro*. [En Línea]. Disponible en: <http://www.chebro.es/contenido.visualizar.do?idContenido=2001&idMenu=2004> [Accesado el día 2 de enero de 2013].
- Chow, V.T., (1959). *Open-Channel Hydraulics*.
- Cobby, D. M.; Mason, D. C.; Horritt, M. S. & P.D. Bates, (2003). *Two-dimensional hydraulic flood modelling using a finite-element mesh decomposed according to vegetation and topographic features derived from airborne scanning laser altimetry*. Hydrological. Processes 17(10), 1979–2000.
- Francés, F., (2011). “Dynamic modelling of riparian vegetation with RIPFLOW: integrating vegetation into water management” en *Seminar on Environmental Flows: Recent Developments and Applications at Basin Scale*, Valencia 5 – 6 de Septiembre 2011.
- Frutos, L. M.; A. Ollero, A. & M. Sánchez Fabre, (2004). “Characterization of the Ebro river and its catchment and its hydrological fluctuations”. In Gil Oncina, A. (ed.), *Alteración de los regímenes fluviales peninsulares*. Fundación Caja Murcia, Alicante: 223–280 (in Spanish).
- García – Arias, A.; Francés, F.; Andrés - Doménech, I.; Vallés, f.; V. Garófano – Gómez, V & F. Martínez – Capel, (2011). “Modelización dinámica de la vegetación de ribera. Calibración del Modelo RIPFLOW y su aplicación en escenarios de regulación de caudales” en *II Jornadas de Ingeniería del Agua*, Barcelona 5 - 6 de octubre 2011.
- González, E.; M. González–Sanchis, M.; Comín, F.A. & E. Muller, (2010). *Hydrologic thresholds for riparian forest conservation in a regulated large Mediterranean river*. River Research and Applications, Published online in Wiley InterScience ([www.interscience.wiley.com](http://www.interscience.wiley.com)) DOI: 10.1002/rra.1436.
- González-Sanchis, M.; Murillo, J.; Cabezas, A.; Vermaat, J.E.; Comín, F & P. García-Navarro, (2014). *Modeling sediment deposition and phosphorus retention in a river floodplain*. Hydrological Processes. doi: 10.1002/hyp.10152.
- González - Sanchis, M., (2012). *Dinámica de flujo y retención de nutrientes en la llanura de inundación del tramo medio del Ebro: análisis experimental y simulación numérica*. PhD tesis. Instituto Pirenaico de Ecología y Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, Spain.
- González-Sanchis, M; Murillo, J.; Latorre, B.; Comín, F. & P. García-Navarro, (2012). *Transient Two-Dimensional Simulation of Real Flood Events in a Mediterranean Floodplain*. Journal of Hydraulic Engineering, 138, 7: 629-641.
- Hauer, F. R. & M. S. Lorang, (2004). *River regulation, decline of ecological resources, and potential for restoration in a semi-arid lands river in the western USA*. Aquatic Sciences, 66:388 -401.
- Heiler, G.; Hein, T.; Schiemer, F. & G. Bornette, (1995). *Hydrological connectivity and flood pulses as the central aspects for the integrity of a riverfloodplain system*. Regulated Rivers: Research and Management, 11: 351–361.
- Horritt, M.S., (2000). *Calibration of a two-dimensional finite element flood flow model using satellite radar imagery*. Water Resources Research 36:3279–3291.
- Ibáñez, C., N. Prat & A. Canicio, (1996). *Changes in the hydrology and sediment transport produced by large dams on the lower Ebro river and its estuary*. Regulated Rivers- Research and Management 12: 51–62.
- Junk, W. J.; Bayley, P. B. & R. E. Sparks, (1989). *The flood pulse concept in river-floodplain systems*. Canadian Special Publication in Fisheries and Aquatic Sciences. 106:110–127.
- Marks, K. & P. Bates, (2000). *Integration of high-resolution topographic data with floodplain flow models*. Hydrological Processes, 14: 2109–2122.
- Martin Vide, J. P., (2002). *Ingeniería de Ríos*. Ediciones UPC, Barcelona.
- Murillo, J.; García-Navarro, P. & J. Burguete, (2009). *Conservative numerical simulation of multi-component transport in two-dimensional unsteady shallow water flow*. J. Comput. Phys., 228(15), 5539–5573.
- Murillo, J.; García – Navarro, P.; Burguete, J. & P. Brufau, (2007). *The influence of source terms on stability, accuracy and conservation in two dimensional shallow flow simulation using triangular*

- finite volumes*. International Journal of Numerical Methods in Fluids, 54:543–590.
- Olson, D.M. & E. Dinerstein, (1998). *The global 200: a representation approach to conserving the earth's most biologically valuable ecosystems*. Conservation Biology 12: 502–515.
- Ollero, A., (2010). *Channel changes and floodplain management in the meandering middle Ebro River, Spain*. Geomorphology, 117 (3-4):247 – 260.
- Ollero, A., (2007). *Channel adjustments, floodplain changes and riparian ecosystems of the middle Ebro River: Assessment and management*. International Journal of Water Resources Development, 23: 73–90.
- Palmeri F., Silvín, F.; Prieto, I.; Balboni, M. & I. García-Mijangos, (2002). *Manual de técnicas de ingeniería naturalística en ámbito fluvial*. Basque Government, Spain.
- Pinilla, V., (2006). *The development of irrigated agriculture in twentieth-century Spain: a case study of the Ebro basin*. Agricultural History Review, 54: 122–141.
- Poole, G. C.; Stanfor, J.A.; Running, S.W.; Frissell, C.A.; Woessner, W.W. & B.K. Ellis, (2004). *A patch hierarchy approach to modeling surface and subsurface hydrology in complex flood-plain environments*. Earth Surface Processes and Landforms, 10:1259–1274.
- Ravenga, C.; Brunner, J.; Henninger, N.; Kassem, K. & R. Payne, (2000). *Pilot Analysis of Global Ecosystems. Freshwater Systems*. Washington DC, USA: World Resources Institute.
- Rhee, D.S.; Woo, H.; Kwon, B.A. & H.K. Ahn, (2008). *Hydraulic resistance of some selected vegetation in open channel flows*. River Research and Applications, 24:673–687.
- van Der Sande, C.J.; Jong, S.M. & A.P.J. Roo, (2003). *A segmentation and classification approach of ikonos-2 imagery for land cover mapping to assist flood risk and flood damage assessment*. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 4:217–229.
- Somes, N. L. G.; Bishop, W. A. & T. H. F. Wong, (1999). *Numerical simulation of wetland hydrodynamics*. Environ. Int., 25 (6–7), 773–779.
- Tockner, C & J.A. Stanford, (2002). *Riverine flood plains: present state and future trends*. Environmental Conservation 29 (3): 308–330.
- Uchida, T; Kawahara, Y. & Y. Ito, (2002). “Modeling of inundation flow in urbanized area using a high-resolution method with Cartesian mesh”. *Proc. Congress – IAHR Conf. 32, Vol 1, Int. Association for Hydraulic Research, Madrid*.
- Vitousek, P.M.; Mooney, H.A.; Lubchenco, J. & J.M. Melillo, (1997). *Human domination of earth's ecosystems*. Science 277: 494–499.
- Vreugdenhil, C. B., (1994). *Numerical methods for shallow-water flow*. Kluwer Academic, Dordrecht, Netherlands.
- Wu, W., (2007). *Computational river dynamics*, Taylor & Francis, London.