

Efectos de la cartografía sobre la modelización hidráulica bidimensional de crecidas.

Carlos Gil, Ignacio Villanueva y Peter Godiksen

Ofiteco, S.A.

cgil@ofiteco.es; ivillanueva@ofiteco.es; pgodiksen@ofiteco.es

1. Introducción:

Los modelos hidráulicos bidimensionales permiten conocer mediante diversos cálculos la extensión, la duración y la magnitud de inundaciones sobre una topografía concreta. En este tipo de modelos, la topografía constituye el elemento más determinante para obtener los mejores resultados, ya que unos errores en esta representación topográfica pueden tener unas consecuencias enormes en los resultados del modelo, de vital importancia para la clasificación, determinación y gestión de áreas inundables del territorio, en España según la Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones (B.O.E. 14-2-95).

Gracias a las nuevas técnicas fotogramétricas y de posicionamiento global (GPS), es posible crear modelos digitales del terreno (MDT's) los cuales representan el relieve con una gran fidelidad.

A la hora de realizar un modelo hidráulico bidimensional se considera imprescindible disponer de una batimetría, ya que los resultados difieren mucho si disponemos de ella o no (Figura 1). El trabajo de Merwade et al. (2008), ha difundido una herramienta que permite interpolar perfiles batimétricos medidos en campo con ecosonda y realizar un canal que une los distintos puntos de los perfiles para generar un relieve lo más fiel posible a la realidad. Esta herramienta resulta muy útil para MDT's que no profundizan más allá de la superficie del agua, los cuales son más comunes debido a su menor coste económico.

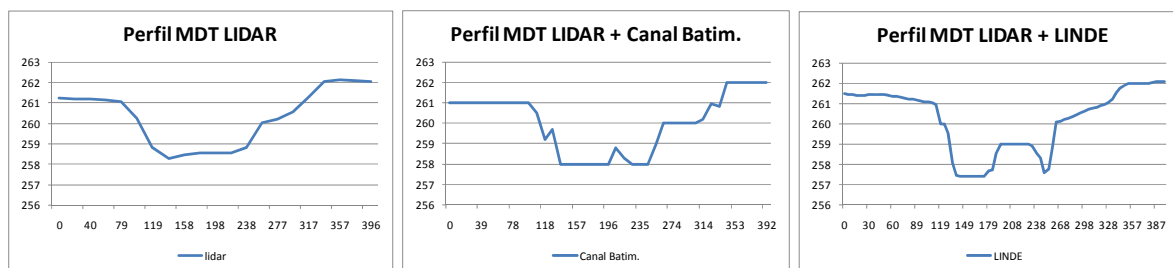


Figura 1. Perfiles transversales en una misma sección del río Jerte. Fuente: Elaboración propia.

Hasta la fecha, se han realizado múltiples estudios sobre modelos de inundación, véase un resumen de las ecuaciones hidrodinámicas principales en Hunter et al. (2007), y en el plano bidimensional se han usado desde modelos simplificados de onda difusiva a modelos completos con esquemas de captura de discontinuidades y descentrados como en los trabajos de Toro and García-Navarro, (2007). Mientras que como referencias de partida para estudiar la influencia del origen de los datos de los MDT's citaremos a Casas-Planes et al. (2005) y Cook and Merwade (2009).

En relación a esos trabajos, se ha querido profundizar en las variaciones de los modelos hidráulicos utilizando distintos modelos de software de modelización; TRENT, Villanueva and Wright (2006), e IBER (2010), respecto a algunos MDT obtenidos con varias metodologías.

La zona sobre la que se ha trabajado corresponde al tramo bajo del río Jerte (Cáceres), habiéndose utilizado tres tipos de MDT en formato AsciiGrid con malla regular rectangular: a) un MDT LIDAR original con resolución por celda de 20 metros, b) un MDT LIDAR con tamaño de celda de 20 metros combinado con un canal batimétrico interpolado de 10 metros de resolución, y c) un MDT LIDAR de 20 metros por celda combinado con otro MDT con una resolución de 5 metros por celda generado a partir de curvas de nivel de 1 metro y puntos

medidos en campo. Además también se han realizado mallas regulares triangulares (RTIN) tomando como base el formato AsciiGrid de los tres MDT anteriores, para así tener una mejor comparación de resultados.

Por lo tanto, el objetivo del trabajo consiste en analizar las diferencias de los MDT sobre unas simulaciones de inundaciones, y generar en último lugar unos mapas de probabilidad de inundación en función de los distintos resultados obtenidos. Esta técnica permite estudiar los escenarios probabilísticos de todas las curvas de inundación generadas con unas mismas condiciones de contorno sobre los distintos modelos digitales del terreno.

2. Modelos matemáticos de inundación:

Aunque no siempre hay observaciones históricas para la calibración y validación de los modelos numéricos, la gran cantidad de cartografía digital disponible, y la capacidad de tratamiento de los datos digitales con ordenadores de sobremesa, hacen que el uso de herramientas de simulación y predicción de los efectos de inundaciones sea realmente atractivo y esté al alcance de personal técnico especializado.

Una descripción general de los modelos hidráulicos y las ecuaciones hidrodinámicas para el cálculo de inundaciones se encuentra en los manuales del software IBER, 2010, y en Hunter et al., 2007.

2.1 Modelos 1D versus 2D:

Respecto a las características dinámicas del flujo (fundamentalmente sus direcciones de propagación y las escalas de tiempo asociadas al fenómeno de transporte), los modelos se clasifican como unidimensionales (1D), bidimensionales (2D) o tridimensionales (3D). Como ejemplo clásico de modelo 1D citaremos el de transporte en un canal de geometría o sección regular, para el 2D el de propagación en una llanura de inundación, y para 3D el de flujo sobre un aliviadero.

Dada la complejidad creciente de las ecuaciones a resolver según la dimensión y las mediciones de campo como pluviometría, aforos, niveles en estaciones, o muros, imágenes aéreas de la superficie de inundación, etc., los modelos comúnmente empleados para la modelización de inundaciones han sido hasta la fecha 1D y 2D.

Los modelos 1D fueron los primeros en desarrollarse, pero sufren de graves carencias:

- Falta de representatividad para llanuras de inundación o flujos que desbordan el cauce principal, puesto que necesitan de extrapolaciones para representar superficies inundadas.
- Excesiva dependencia de la distancia y orientación de los perfiles transversales, especialmente en zonas de meandros.

Siendo su ventaja principal la rapidez de ejecución y explotación por el usuario.

Por otro lado los modelos 2D al desarrollarse sobre superficies malladas requieren mucha más información espacial y coste de ejecución, pero están menos sujetos a criterios de modelización y explotación subjetivos a priori, aunque como se verá a lo largo del presente trabajo es importante considerar la influencia o sensibilidad de diversos factores sobre sus resultados.

No debe olvidarse que aunque los modelos 1D y 2D se explican separadamente y se originaron con varias décadas de diferencia, en la actualidad la mayoría de los códigos son híbridos porque permiten diferenciar cauces 1D unidos con zonas 2D para aprovechar las ventajas de rapidez del cálculo 1D y la precisión en la definición de superficies 2D.

En los siguientes apartados se pretende exponer más detalladamente las técnicas de modelización 2D para interpretar y explotar mejor los resultados y la influencia de los modelos digitales del terreno.

2.2 Métodos numéricos de resolución 2D, paso de tiempo:

Para la resolución de las ecuaciones de Saint Venant, que salvo casos excepcionales como fondo plano y sin fricción, no tienen solución analítica o exacta, se emplean algoritmos de discretización o mallado del dominio mediante volúmenes de control. En particular se emplean comúnmente esquemas en diferencias finitas o volúmenes finitos sobre mallas estructuradas o no estructuradas.

Una discretización en volúmenes finitos en una malla rectangular para la conservación de masa en cada celda (i,j) permite calcular el valor del calado h en el tiempo $n+1$ como:

$$h_{ij}^{n+1} = h_{ij}^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} [F_{i+1/2j}^* - F_{i-1/2j}^*] - \frac{\Delta t}{\Delta y} [G_{ij+1/2}^* - G_{ij-1/2}^*] + \Delta t [S_{ij}^*]$$

Con F y G como flujos inter-celda y S como fuente o sumidero de masa.

Una descripción completa para el cálculo de los flujos F y G , fuentes S , con los esquemas shock-capturing basados en la resolución del problema de Riemann en la aproximación de Godunov para las ecuaciones de Saint Venant bidimensionales, incluyendo citas bibliográficas del desarrollo histórico, se encuentra en Toro y García-Navarro, 2007. A esta familia pertenecen los programas empleados de TRENT, Villanueva and Wright (2006), e IBER (2010), ambos son esquemas completos descentrados, el primero de ámbito académico y el segundo optimizado para su libre distribución. Además del avanzado esquema numérico empleado, ambos modelos han sido programados para repartir el cálculo de balance entre celdas en plataformas multi-procesador con librerías OpenMP.

Respecto al paso de tiempo empleado, recordamos que se ajusta al criterio CFL (Courant-Friedrichs-Levy), que en 2D es:

$$\Delta t = CFL \frac{\Delta x}{\max[|u| + |v| + 2c]}$$

Con Δx como paso de malla, u y v las velocidades del flujo en el plano x-y respectivamente, y la celeridad c definida como:

$$c = \sqrt{gh}$$

Con h como calado, y con el límite de $CFL < 1$.

Nótese que cuanto más pequeño es el tamaño de celda, mayor la velocidad o la profundidad de la lámina, más pequeño es el paso de tiempo y por tanto mas costosa la simulación. A modo de ejemplo, en una malla original de celdas cuadradas, el dividir el tamaño de la celda por 2 equivale a multiplicar por 4 el número de celdas y reducir el paso de tiempo por 2, por tanto la nueva malla tiene un coste computacional 8 veces superior a la original.

En realidad, un compromiso entre resolución de malla, coste computacional, y precisión de los resultados, que permita unos resultados óptimos es muy difícil de aconsejar a priori, pero a modo de orientación según la experiencia de los autores, con la capacidad de cálculo de los ordenadores de sobremesa actuales y los modelos LIDAR disponibles, se aconseja emplear inicialmente resoluciones del orden de 5-20 metros en escenarios fluviales rurales, y bajar a menos de 5 metros en escenarios urbanos con presencia de edificios y otras estructuras. El presente trabajo presenta una técnica probabilística para facilitar la interpretación de múltiples simulaciones que son factibles con los ordenadores y modelos disponibles.

3. Escenario de la simulación:

El área de estudio sobre el que se han realizado las distintas modelizaciones se sitúa en el tramo bajo del río Jerte, al norte de la provincia de Cáceres (Figura 2). El río Jerte nace en las cercanías del municipio de Tornavacas (a 1800 msnm) y confluye con el río Alagón 70 km después a una altitud de 250 msnm, lo que da una idea de los fuertes desniveles por los que circula, superando gran parte de este desnivel durante los primeros 50 km, donde alcanza los 354 msnm en Plasencia.

Esto se debe a que el valle del Jerte se encuentra entre dos cadenas montañosas: la Sierra de Tormantos al sureste y los montes de Traslasierra al noroeste, donde se encuentra el punto más elevado de la región, el Calvitero, cuya altura es de 2410 m. Estas dos sierras, pertenecientes al Sistema Central, constituyen sus límites naturales.

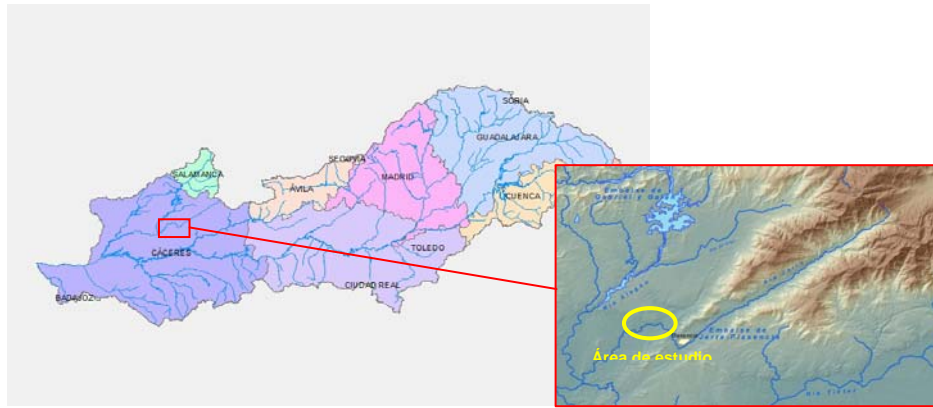


Figura 2. Situación del río Jerte y localización del área de estudio. Fuente: Elaboración propia.

Para el presente trabajo se ha seleccionado un tramo de 12 km correspondiente al sector inmediatamente después del recodo de Plasencia, para así observar los cambios en las curvas de inundación entre el valle encajonado y una llanura de inundación de unos 500 metros de ancho ocupada en su práctica totalidad por cultivos (Figura 3).

Tras el recodo de Plasencia, el valle se extiende más amplio a través de una llanura aluvial donde el río adquiere menores velocidades y aporta sedimentos, teniendo así un flujo meandriforme con un coeficiente de sinuosidad de 1.4.

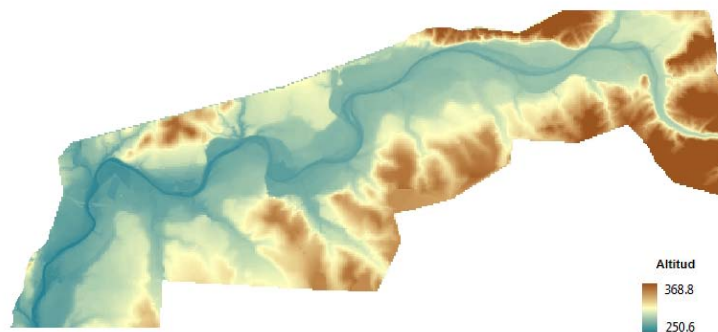


Figura 3. Modelo Digital del Terreno del tramo de estudio del río Jerte. Composición del MDT LIDAR y del MDT de puntos y curvas del proyecto LINDE. Fuente: Elaboración propia.

4. Mallas empleadas: metodología

Hay muchas maneras de obtener un MDT. Actualmente la primera es a través de mediciones láser del terreno desde un avión. Esta tecnología láser, más conocida como LIDAR (*Light Detection and Ranging*), es un sistema que emite pulsos de luz que se reflejan en el terreno y otros objetos de cierta altura. Los fotones de los pulsos reflejados son transformados en impulsos eléctricos e interpretados por un registrador de datos de alta velocidad. El intervalo de tiempo que tarda el haz de luz en regresar al emisor es transformado en distancia, ayudado por la información posicional obtenida de los receptores GPS del avión/terreno y de la altitud de la aeronave.

Una ventaja significativa de esta tecnología, con respecto a otras, es que los datos pueden ser adquiridos en condiciones atmosféricas en las que la fotografía aérea convencional no puede hacerlo. Por ejemplo, la toma de datos puede hacerse desde un avión en vuelo nocturno o en condiciones de visibilidad reducida, como las que se dan con tiempo brumoso o nublado. Sin embargo el láser no es capaz de atravesar los cuerpos de agua, lo que para modelos hidráulicos resulta un gran inconveniente al no conocer la batimetría del lecho de ríos, embalses, etc.

Otro método para la obtención de un MDT es la medición de puntos en campo con un GPS. La calidad en la representación topográfica mediante este sistema dependerá del número y la densidad de puntos que se establezcan, por lo que lo hace un sistema adecuado para áreas pequeñas. Pero al igual que con el sistema LIDAR, mediante la utilización única del GPS no se puede obtener una batimetría.

Los puntos GPS utilizados en este trabajo se han obtenido de planos en formato .cad pertenecientes al Proyecto LINDE del río Jerte realizado por PYCSA en el año 2001. Dichos planos incluían gran cantidad de puntos y curvas de nivel de un metro, además de perfiles batimétricos medidos en campo. Puesto que la superficie de los planos era menor que el MDT LIDAR, se han combinado ambos para que tengan la misma extensión.

Para la obtención de una batimetría es necesario realizar mediciones en multitud de puntos mediante ecosonda. Dichos puntos deben estar localizados por un GPS para, posteriormente, tener una red de puntos batimétricos que permitirá realizar un modelo digital a través de una interpolación. Cuanta más densa sea la red de puntos, mayor calidad tendrá el mapeo batimétrico. Una vez obtenidos los perfiles batimétricos, se realiza un canal en forma de malla rectangular irregular interpolando la cota de todos los puntos. Este canal se ha combinado con el MDT LIDAR y con el MDT generado con los planos de Autocad para comprobar las diferencias entre un MDT sin batimetría y otro con batimetría.

Todos los MDT anteriores han sido generados en formato AsciiGrid de ArcGIS.

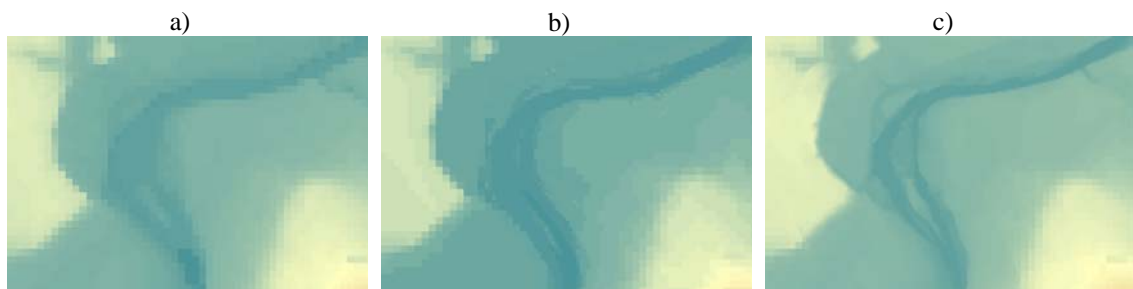
Otro tipo de malla utilizado para la obtención de MDT es una malla regular triangular (RTIN). Estos RTIN fueron generados con el programa de modelización hidráulica IBER en base a archivos AsciiGrid, por lo que son una forma de interpolación que permiten una malla más fina, siempre en base a triángulos rectángulos con un parámetro de longitud de lado o cateto máximo y otra para el mínimo.

Con todas estas técnicas se han utilizado las siguientes mallas (Figura 6):

- a) MDT LIDAR original. Resolución de 20 metros.
- b) MDT LIDAR original (Resolución: 20 m.) + Canal batimétrico interpolado (Res: 10 m.).
- c) MDT LIDAR original (Res: 20 m.) + MDT puntos y curvas de nivel del Proyecto LINDE (Res: 5 m.).
- d) RTIN generado a través del MDT LIDAR 20 metros. Lado máx. y mín. del triángulo: 20 m.
- e) RTIN generado a través del MDT LIDAR 20 m. + Canal batimétrico 10 m. Lado máx. del triángulo: 20 m; lado mín. del triángulo: 10 m.

No se ha realizado un RTIN para el MDT LIDAR de 20 metros y los puntos y curvas de nivel LINDE 5m debido a la incapacidad del software y hardware empleado para generar dicha malla (IBER en procesador Intel Core i5 de 4 CPUs a 2.8 GHz y 8 Gb de memoria RAM).

Puesto que la resolución más alta pertenece a 20 metros, todas las salidas de los modelos hidráulicos se han generado en un tamaño de celda de 20 metros.



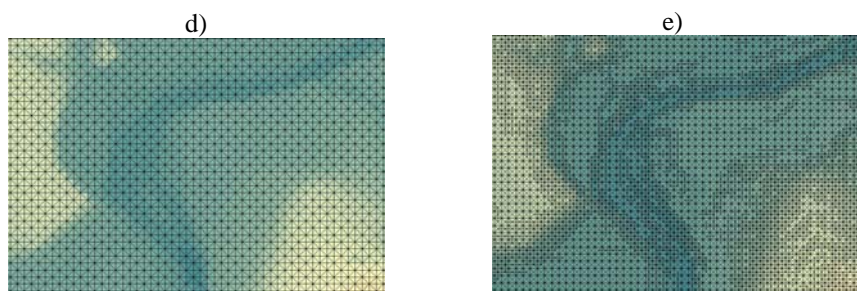


Figura 6. Meandro del río Jerte con distintas resoluciones espaciales. a) MDT LIDAR 20 metros, b) MDT LIDAR 20 metros + Canal batimétrico interpolado 10 metros, c) MDT LIDAR 20 metros + MDT puntos y curvas de nivel LINDE 5 metros, d) RTIN del MDT LIDAR con lado de triángulo de 20 metros, e) RTIN del MDT LIDAR + Canal batimétrico interpolado con lado máximo de triángulo de 20 metros y mínimo de 10 metros. Fuente: Elaboración propia.

5. Tiempos de cálculo

Una vez obtenidas las mallas se han lanzado tres series de simulaciones para cada software de simulación de flujo bidimensional; TRENT e IBER. Los MDT de malla regular cuadrada se han utilizado con el programa TRENT y los RTIN de malla estructurada triangular con el programa IBER.

Para las dos primeras simulaciones se ha optado por una avenida cada una con unos caudales correspondientes al periodo de retorno de 10 años ($465 \text{ m}^3/\text{s}$) y al periodo de retorno de 100 años ($778 \text{ m}^3/\text{s}$), ambas con un mismo coeficiente Manning de rugosidad de 0.04. El tiempo de simulación de los modelos es de 8 horas (28800 segundos), en los que se ha utilizado un hidrograma uniforme con una entrada de caudal constante y una salida en régimen supercrítico.

En la tercera simulación se ha utilizado un caudal correspondiente al periodo de retorno de 10 años con distintos coeficientes Manning de rugosidad (0.25, 0.30, 0.35, 0.40 y 0.45). El tiempo simulado también es de 28800 segundos con un caudal uniforme y una salida en régimen supercrítico, similar a las dos primeras simulaciones. En este caso se ha utilizado una única malla, la correspondiente a RTIN LIDAR+ Canal batimétrico, debido a unos tiempos de simulación óptimos y una resolución de malla aceptable.

En la siguiente tabla se muestran los tiempos de ejecución de los modelos respecto a los distintos MDT, los distintos caudales y los diferentes coeficientes de rugosidad. Para la ejecución de los modelos se ha utilizado un procesador Intel Core i5 de 4 CPUs a 2.8 GHz y 8 Gb de memoria RAM.

Tabla 1. Tiempos de cálculo de los modelos en función del Modelo Digital del Terreno para el periodo de retorno de 10 años.

MDT	Nº celdas	Resolución (m)	T de Sim. (s)	Manning (n)	Duración
LIDAR	43931	Cuad. 20	28800	0.040	59 min
RTIN LIDAR	86598	Triang. 20	28800	0.040	19 min
LIDAR + Canal bat.	175477	Cuad. 10	28800	0.040	4h 51min
RTIN LIDAR + Canal bat.	286044	Triang. 20, 10	28800	0.040	1h 51min
LIDAR+ LINDE	707957	Cuad. 5	28800	0.040	16h 31min

Tabla 2. Tiempos de cálculo de los modelos en función del Modelo Digital del Terreno para el periodo de retorno de 100 años.

MDT	Nº celdas	Resolución (m)	T de Sim. (s)	Manning (n)	Duración
LIDAR	43931	Cuad. 20	28800	0.040	1h 28min
RTIN LIDAR	86598	Triang. 20	28800	0.040	28 min
LIDAR + Canal bat.	175477	Cuad. 10	28800	0.040	5h 37min
RTIN LIDAR + Canal bat.	286044	Triang. 20, 10	28800	0.040	2h 38min
LIDAR+ LINDE	707957	Cuad. 5	28800	0.040	23h 11min

Tabla 3. Tiempos de cálculo del modelo RTIN LIDAR + Canal batimétrico en función del índice de rugosidad Manning para el periodo de retorno de 10 años.

MDT	Nº celdas	Resolución (m)	T de Sim. (s)	Manning (n)	Duración
RTIN LIDAR + Canal bat.	286044	Triang. 20, 10	28800	0.025	1h 52min
RTIN LIDAR + Canal bat.	286044	Triang. 20, 10	28800	0.030	1h 51min
RTIN LIDAR + Canal bat.	286044	Triang. 20, 10	28800	0.035	1h 53min
RTIN LIDAR + Canal bat.	286044	Triang. 20, 10	28800	0.040	1h 51min
RTIN LIDAR + Canal bat.	286044	Triang. 20, 10	28800	0.045	1h 55min

Como se puede apreciar, cuanto mayor es la resolución de la malla, mayor es el tiempo de cálculo del ordenador. De este modo los resultados serán más precisos pero se debe valorar si es factible el cálculo de modelos de tanta resolución espacial debido al tiempo necesario para la obtención de la simulación; al igual que se debe valorar si se utiliza una resolución menor a pesar de los menores costes de ejecución, ya que los resultados no pueden ser demasiado precisos.

Es destacable el hecho de que las simulaciones con malla cartesiana o cuadrada (no RTIN, hechas con TRENT) sean notablemente más costosas que las de malla triangular de IBER versión 1.06, utilizando además un número menor de celdas, siendo la explicación fundamental el hecho de que TRENT no está optimizado internamente, utiliza el compilador libre de MinGW, y el reparto de bucles con librerías OpenMP es diferente al de IBER. No obstante los autores del trabajo tienen acceso al código abierto de TRENT para su mejora y éste ha permitido trabajar con la malla más fina de 5m y 700 K celdas.

También se puede observar un aumento del tiempo de ejecución en función del caudal, pero la diferencia entre simulaciones no es tan destacable como en el caso de usar distintos MDT.

Sin embargo, en las simulaciones realizadas con distinto coeficiente de Manning no hay ninguna relación entre aumento de tiempo según el coeficiente, por lo que la variación de número de Manning no afecta de forma importante en el tiempo de simulación.

6. Análisis de sensibilidad: mapas de probabilidad de inundación

Al igual que en tiempos de ejecución, los modelos también varían en sus resultados en función del MDT sobre los que se han lanzado (Figura 7). Según qué simulaciones, hay áreas que quedan completamente inundadas mientras que en otras simulaciones lanzadas con otros MDT o modelo, esas mismas áreas están secas durante todo el periodo simulado. Estas diferencias provocan el problema de no saber qué modelo de flujo bidimensional es el más preciso, ni que MDT se aproxima más a la realidad.

Para intentar solucionar esta cuestión se ha realizado en este trabajo un análisis de las distintas curvas de inundación en función de los MDT y los coeficientes de Manning para generar en última instancia un mapa de probabilidad de curvas de inundación, el cual representará la probabilidad de que una celda del modelo quede inundada.

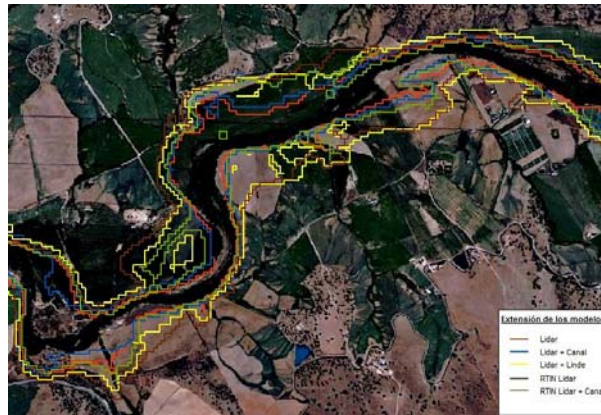


Figura 7. Representación de las curvas de inundación del periodo de retorno de 10 años respecto a los distintos MDT's.
Fuente: Elaboración propia.

Los mapas probabilísticos se han generado mediante la herramienta *Raster Calculator* de ArcGIS, calculando el coeficiente F^2 y el valor de probabilidad para cada pixel como se comenta a continuación:

Cálculo del número F^2 :

Este número es un coeficiente que muestra la relación entre dos modelos a través de la siguiente ecuación:

$$F^2(1,2) = \frac{A - C}{A + B + C}$$

A: Numero pixeles donde el modelo 1 y 2 ($M1$ y $M2$) están mojados a la vez

B: Número pixeles donde el $M1$ es seco y $M2$ mojado

C: Número pixeles donde el $M1$ es mojado y $M2$ seco

Mapa de probabilidad:

Para la obtención del mapa de probabilidad hay que calcular la probabilidad que cada pixel tiene de inundarse, con una definición ligeramente modificada respecto a la propuesta por Romanowicz et al. (1996), porque no se dispone de una imagen de referencia o patrón observado, de modo que para cada pixel K se tiene:

$$P_k = \frac{\sum_{j=1}^N F_j^2 R_{kj}}{\sum_{j=1}^N F_j^2}$$

Siendo:

N El número de variaciones sin repetición de las N simulaciones tomadas de dos en dos.

$R_{kj}=1$ Si el pixel K está mojado en la simulación j

$R_{kj}=0$ Si el pixel K está seco en la simulación j

7. Resultados y discusiones:

Para los mapas de probabilidad de inundación hemos obtenido las F^2 de los cinco modelos calculados, creando tres mapas, uno para el periodo de retorno de 10 años, otro para el de 100 años (Figura 9) y un último mapa con distintos coeficientes de Manning para el periodo de retorno de 10 años (Figura 10), todos sobre el fondo común del MDT RTIN LIDAR + Canal batimétrico.

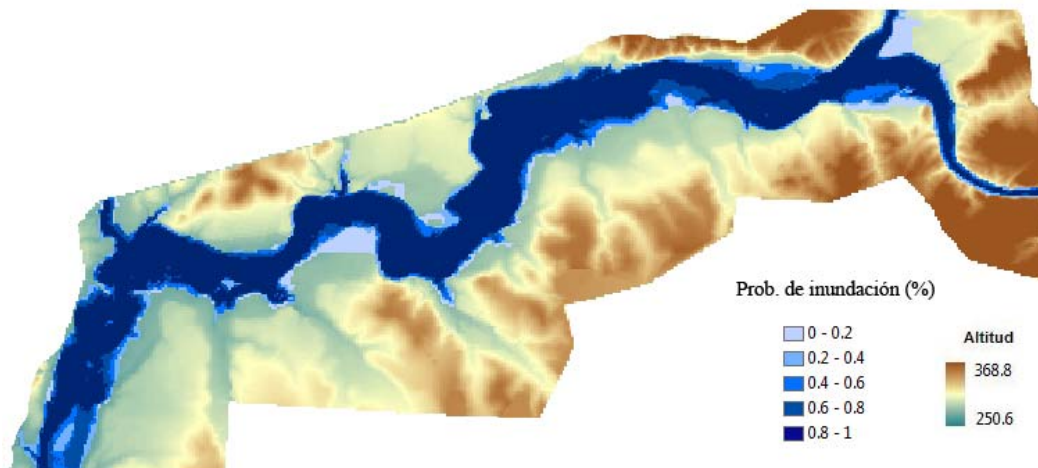


Figura 9. Mapa de probabilidad de inundación para el periodo de retorno de 100 años. Fuente: Elaboración propia.

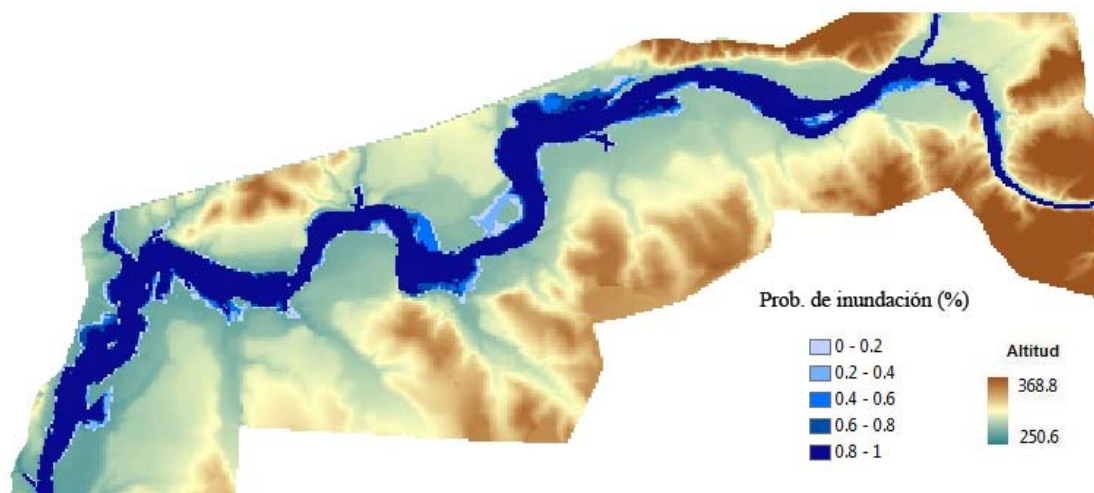


Figura 10. Mapa de probabilidad de inundación con distintos coeficientes de rugosidad Manning para el periodo de retorno de 10 años. Fuente: Elaboración propia.

Se observan mayores diferencias en el mapa de probabilidad para el periodo de retorno de 10 años debido a que el caudal es menor y hay una mayor sensibilidad a las variaciones altitudinales del terreno. Este hecho se hace notar más en el sector intermedio, donde el río circula por una llanura de inundación más amplia. En el mismo sector es donde también se aprecian las diferencias entre los distintos coeficientes de Manning, ya que esta zona llana es más sensible a variaciones en función de las distintas condiciones impuestas en los modelos.

La realización de mapas probabilísticos es una nueva tarea que podrá permitir analizar de una manera más precisa y objetiva los resultados de la infinidad de cartografías y distintos modelos de los que se puede disponer actualmente.

Con estos mapas el usuario podrá interpretar todos los modelos en conjunto, lo que supone un gran apoyo si se dispone de múltiples cartografías, las cuales, como se ha podido ver en este trabajo, varían de forma considerable los resultados obtenidos. La posibilidad de disponer de estos mapas probabilísticos supone un avance similar al ocurrido en el campo de la meteorología, con el estudio de ensembles o escenarios probabilísticos de predicción.

Otro objetivo de este trabajo es demostrar la importancia de un buen modelo batimétrico, ya que si no se tiene una batimetría los resultados podrán ser menos creíbles debido a que algunos modelos cartográficos representan los cuerpos de agua como zonas llanas (sólo representan su superficie).

Una resolución fina de malla permite obtener resultados precisos y el coste computacional es asumible usando ordenadores de sobremesa con varios procesadores, de modo que el número de eventos y escenarios capaces de ser estudiados crece considerablemente. La experiencia del hidrólogo es fundamental para seleccionar las fuentes de cartografía digital, los escenarios con su resolución de malla apropiada y los eventos de interés para decidir qué resultados son los más óptimos para su trabajo, siendo los mapas probabilísticos de inundación una herramienta importante para el análisis de sensibilidad de la geometría y la selección y difusión de resultados.

Bibliografía:

- Casas-Planes, A., Benito, G., Thorndycraft, V.R. and Rico, M., 2005. *Efectos de las fuentes cartográficas en los resultados de la modelación hidráulica de crecidas*. Ingeniería del Agua. Vol. 12, No. 4, pp 309-320.
- Cook, A. and Merwade, V., 2009. *Effect of topographic data, geometric configuration and modelling approach on flood inundation mapping*. Journal of Hydrology, 377, pp 131-142.
- Hunter, N.M., Bates, P.D., Horritt, M.S., Wilson, M.D., 2007. *Simple spatially-distributed models for predicting flood inundation: A review*. Journal of Geomorphology, 90, pp 208-225.
- IBER, modelo para flujo en lámina libre 2D, <http://www.iberaula.es> (accedida Junio 2011)
- Merwade, V., Cook, A., Coonrod, J., 2008. *GIS techniques for creating river terrain models for hydrodynamic modelling flood inundation mapping*. Environmental Modelling and Software, 23, pp 1300-1311.
- MinGW, compilador gcc en Windows , <http://www.mingw.org> (accedida Junio 2011)
- Romanowicz, R. , Beven, K.J. and Tawn, J., 1996. *Bayesian calibration of flood inundation maps*. In Flood Plain Processes, Eds. Anderson, M.G., Walling, D.E. and Bates, P.D., New York, Wiley, pp 333-360.
- OpenMP, librerías de computación en paralelo, <http://openmp.org/wp/> (accedida Junio 2011)
- Toro, E. F. and García-Navarro, P., 2007. *Godunov-type methods for free-surface shallow flows: A review*. Journal of Hydraulic Research, Vol. 45, No. 6, pp 736-751.
- Villanueva, I. and Wright, N. G., 2006. Linking riemann and storage cell models for flood prediction. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Journal of Water Management, 159, 27-33.