

**XXV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA  
SAN JOSÉ, COSTA RICA, 9 AL 12 DE SETIEMBRE DE 2012**

**ESTIMACIÓN DE MAPAS DE PELIGROSIDAD MEDIANTE  
GENERACIÓN DE TORMENTAS SINTÉTICAS**

*Gianbattista Bussi*<sup>(1)</sup>, *Félix Francés*<sup>(1)</sup>, *José Luis Salinas*<sup>(1)</sup>, *Rafael García-Bartual*<sup>(1)</sup>, *Lucas Pujol*<sup>(2)</sup>, *Vicente Guna*<sup>(2)</sup>, *Enrique Ortiz*<sup>(2)</sup>

*(1) Universitat Politècnica de València, España*

*(2) Hidrogaia SL, España*

*gbussi@upvnet.upv.es*

**RESUMEN:**

El objetivo de este trabajo es desarrollar una metodología para la estimación de mapas de peligrosidad hidráulica, basado en el acople de generación de tormentas sintéticas variables en el espacio y en el tiempo, modelación hidrológica distribuida y modelación hidráulica bidimensional, siguiendo las directrices de la Directiva Marco del Agua (2007/60) de la Comunidad Europea para la estimación de mapas de peligrosidad frente a inundaciones. La metodología utilizada se basa en la representación espacio-temporal de los procesos de precipitación y transformación lluvia-escurrentía y en una modelación estocástica trivariada de los caudales máximos, teniendo en cuenta otras variables aleatorias que intervienen en el proceso de formación de una avenida, como el estado de humedad del suelo.

A título de ejemplo, se muestran como caso de estudio los resultados obtenidos en el ámbito de la redacción del Plan Director de defensa contra las avenidas de la Marina Alta y Marina Baja (Alicante, España).

**ABSTRACT:**

The goal of this work is the development of a methodology for hydraulic hazard assessment. This approach is based on coupling a distributed storm generation models, a distributed hydrological model and a 2D hydraulic model, following the European Water Framework directive (2007/60). The presented methodology is based on spatio-temporal representation of precipitation and rainfall-runoff transformation processes and on a trivariate stochastic model of maximum discharge, taking into account processes which take part in flood formation, such as soil moisture conditions.

As an example, the presented case-study is taken from the results obtained during the development of the flood risk management plan elaborated for the Marina Alta and Marian Baja regions (Alicante, Spain).

**PALABRAS CLAVES:** peligrosidad hidráulica; modelación hidrológica distribuida; tormentas sintéticas; modelación hidráulica bidimensional

## INTRODUCCIÓN

En el ámbito del análisis y gestión del riesgo de inundación, cada vez más legislaciones nacionales e internacionales hacen hincapié en la necesidad de una correcta planificación de los usos del suelo a través de una clasificación del riesgo de inundación basada en la peligrosidad potencial y en la vulnerabilidad de una determinada zona. Un ejemplo es la Directiva Marco del Agua (2007/60) de la Comunidad Europea. Los trabajos realizados hasta ahora en este sentido se basan en su gran mayoría en el concepto de “tormenta de diseño”, es decir que la probabilidad asociada a una inundación se establece como igual a la frecuencia de la tormenta que lo ha generado. Este enfoque está limitado por la pobre representación espacio-temporal de la precipitación y por no considerar otras variables aleatorias que intervienen en el proceso de formación de una avenida, como el estado de humedad del suelo.

El objetivo de este trabajo es desarrollar una metodología para la estimación de mapas de peligrosidad hidráulica, aprovechando los últimos avances de la modelación hidrológica, a través de la generación de tormentas sintéticas variables en el espacio y en el tiempo, utilizando la modelación hidrológica distribuida y la modelación hidráulica bidimensional.

El primer paso de esta metodología es el análisis estocástico de la precipitación: esta fase se puede realizar a través de un análisis regional de las precipitaciones diarias de las estaciones de la zona y el ajuste de una función de distribución, como se muestra en el caso de estudio presentado. A continuación se procede a la generación estocástica de tormentas sintéticas distribuidas en el espacio y en el tiempo, sobre todo el dominio de estudio, a través de un modelo de generación sintética de tormentas extremas (RAINGEN – Salsón y García Bartual, 2003). Esta técnica ha sido empleada cada vez más en los últimos años, debido a la disponibilidad de datos de redes automáticas de pluviómetros de alta resolución. Además, la información de radar, cada vez más accesible, proporciona un mejor conocimiento de los patrones estructurales y de las características espaciales de una tormenta de elevada intensidad. Estas fuentes de datos facilitan una estimación adecuada de los parámetros de este tipo de modelos y justifican la difusión de los modelos estocásticos y fractales para los objetivos de este trabajo (Wheater et al., 2005; Qin, 2011; Vandenberghe et al., 2010; Calenda et al., 2005).

El tercer paso es la modelación hidrológica distribuida a través del modelo TETIS (Francés et al., 2007). Esta fase prevé la calibración y validación del modelo, tanto a una resolución temporal de detalle, con el objetivo de simular eventos extremos de tormentas, como a una resolución temporal gruesa, para reconstruir la variación del estado de humedad del suelo. Una vez validado el modelo, se procede a simular todas las tormentas sintéticas previamente generadas (368 en el caso de estudio presentado), a partir de un cierto número de estados iniciales considerados como representativos del estado de humedad del suelo antes de un evento hidrológico (en este caso de estudio, 3 estados).

Los resultados son varios hidrogramas en cada punto de simulación. Para establecer la frecuencia de los caudales máximos de cada hidrograma obtenido, se utiliza una metodología estadística trivariada, cuyas variables aleatorias en juego son el caudal máximo, la precipitación diaria y el estado de humedad del suelo antecedente al evento de precipitación (Francés et al., 2001a; Francés et al., 2001b).

Los hidrogramas obtenidos se utilizan como condiciones de contorno de los modelos hidráulicos. La modelación hidráulica bidimensional se ha llevado a cabo utilizando el software comercial Infoworks RS 2D (Wallingford). Por cada zona de inundación, se han simulado cinco eventos, de periodo de retorno respectivamente de 10, 25, 50, 100 y 500 años. Los modelos de elevación digital utilizados provienen de un modelo de resolución 1x1 m obtenido a partir de un vuelo de teledetección Lidar. También se han tenido en cuenta las condiciones iniciales de nivel del mar (marea astronómica) en función del distinto periodo de retorno, y se han modelado las principales infraestructuras hidráulicas (obras de paso o de cruce, grandes colectores, puentes, etc.). Los resultados de las simulaciones hidráulicas son cinco mapas de peligrosidad por cada zona de

simulación, correspondientes a 10, 25, 50, 100 y 500 años de periodo de retorno (Bussi et al., 2011a; Bussi et al., 2011b).

A título de ejemplo, se muestran como caso de estudio los resultados obtenidos en el ámbito de la redacción del Plan Director de defensa contra las avenidas de la Marina Alta y Marina Baja (Alicante, España).

## ANÁLISIS PLUVIOMÉTRICO

El primer paso de esta metodología es el análisis estadístico de las series temporales de precipitación diaria. Para conseguir la máxima fiabilidad en el análisis de la frecuencia de las precipitaciones diarias máxima anuales se ha recurrido a un análisis regional. En el presente caso de estudio, se ha comprobado la homogeneidad regional mediante un test de Fisher sobre el coeficiente de variación. Se ha obtenido una longitud equivalente de la muestra de 1054 años, muy superior a la longitud de la muestra de la estación con más años de datos (48 años). Para la estimación de los parámetros del modelo se ha utilizado el software de libre distribución AFINS, desarrollado en el seno del Grupo de Investigación en Modelación Hidrológica y Medioambiental de la Universidad Politécnica de Valencia; este software utiliza el método de la Máxima Verosimilitud.

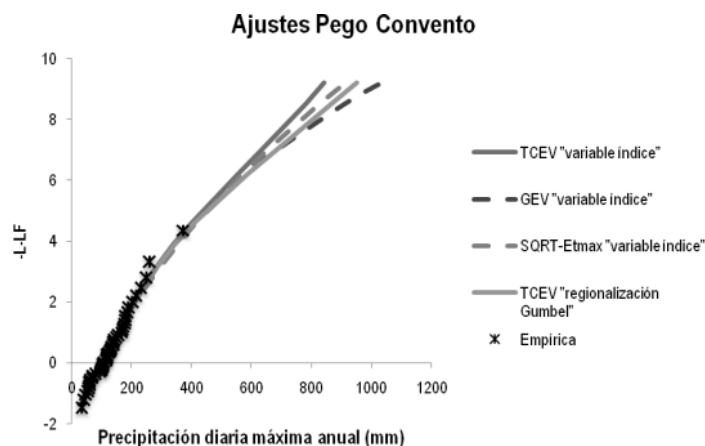


Figura 1.- Ajuste en la estación de "Pego – convento"

Se han empleado dos técnicas de regionalización: el método por variable índice para las funciones de distribución GEV, SQRT-ETmax y TCEV, y una regionalización Gumbel para la función e distribución TCEV (Rossi et al., 1984). Los resultados son excelente para los 4 modelos; en la Figura 1 se muestran los cuantiles para una de las estaciones con la serie de datos más larga (44 años) con los 4 modelos utilizados.

Finalmente se ha elegido la función de distribución TCEV con regionalización Gumbel, por las bases físicas de las hipótesis de la TCEV de existencia de dos poblaciones (eventos ordinarios y extraordinarios), y por el mayor número de eventos extraordinarios detectados con la regionalización Gumbel con respecto al método de la variable índice. Estas conclusiones son acordes a estudios previos para avenidas en el Mediterráneo Occidental (Francés, 1998).

## GENERACIÓN DE TORMENTAS SINTÉTICAS

### Modelo estocástico de precipitación

El modelo estocástico desarrollado por Salsón y García Bartual (2003) ha sido creado para representar adecuadamente los patrones espaciales y temporales y la estructura interna de un campo de precipitación correspondiente a un evento extremo de tipo convectivo, típicos del Mediterráneo.

Este modelo se basa en desarrollos matemáticos previos aplicados a la modelación de la precipitación (Rodríguez-Iturbe and Eagleson, 1987; Sivapalan and Wood, 1987). El modelo en cuestión adapta las formulaciones de estos trabajos al ambiente mediterráneo.

Los parámetros del modelo se han estimado con el método de los momentos, utilizando algunos estadísticos empíricos importantes obtenidos de registros de intensidad de precipitación. Entre ellos, se citan la función de correlación espacial, la función de autocorrelación temporal para distintos niveles de agregación temporal, la función media normalizada, etc.

La aplicación de este modelo estocástico ha permitido la definición de un amplio rango de escenarios climáticos, o eventos de precipitación distribuida. Cada uno de estos eventos está compuesto por un campo de precipitación agregado a una resolución temporal de 10 minutos y con una resolución espacial de 1 km x 1 km. Para esta aplicación hidrológica se han creado 368 escenarios climáticos.

### Estimación del periodo de retorno de una tormenta multidimensional

El concepto de probabilidad de no excedencia está asociado a una variable aleatoria y a su distribución estadística. Por esto, no es posible asignar un periodo de retorno a una tormenta distribuida discretamente en el espacio sobre una malla y en el tiempo en intervalos de 10 minutos.

Para abordar este problema, se utiliza una metodología práctica que prevé asociar un valor unidimensional y único a la tormenta multidimensional; este valor es la precipitación diaria equivalente ( $PD_{eq}$ ), y se considera como representativo de la precipitación acumulada de una tormenta definida sobre una determinada cuenca. Este valor se introduce luego en la función e distribución de la precipitación, previamente estimada, para determinar el periodo de retorno a asociar a la tormenta.  $PD_{eq}$  se puede estimar como [1]:

$$PD_{eq} = 24I_x / ARF \quad [1]$$

mientras que el periodo de retorno  $T$  de la tormenta es [2]:

$$T = 1 / [1 - F(PD_{eq})] \quad [2]$$

donde  $ARF$  es el factor de reducción areal de la cuenca y  $x$  es el intervalo de tiempo en horas, de modo que [3]:

$$I_x \approx PD / 24 \quad [3]$$

donde  $I_x$  en mm/h es el máximo anual de intensidad media de precipitación para un intervalo de duración de  $x$  horas y  $PD$  es el máximo anual de precipitación diaria. En el caso de la Marina Alta y Marina Baja, el valor de  $x$  ha sido estimado en 29h 10min, muy cerca de los valores generalmente recomendados en España, de 28h. La función de estimación de  $ARF$  utilizada ha sido [4]:

$$ARF = [1 + \lambda A \gamma]^{-1} \quad [4]$$

donde  $A$  es el área de la cuenca,  $\lambda=0.00783$  y  $\gamma=0.65676$ .

## MODELACIÓN HIDROLÓGICA

### Modelo hidrológico distribuido

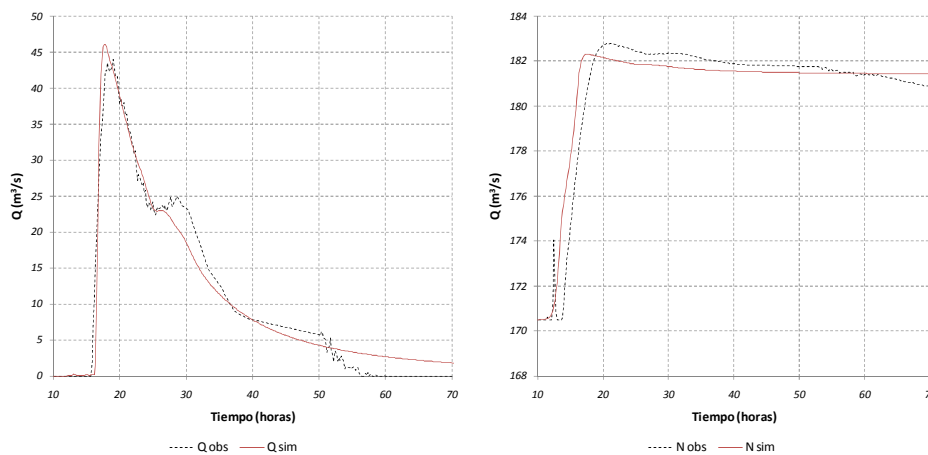
El modelo TETIS es un modelo hidrológico conceptual de parámetros físicos y distribuido en el espacio (Francés et al., 2002, Francés et al, 2007). Para cada celda de la cuenca, el modelo efectúa un balance de agua siguiendo una conceptualización de tipo tanques. La simulación de la producción de escorrentía para cada celda se basa en describir las interacciones atmósfera – vegetación – suelo – acuífero a través de seis tanques interconectados entre si. Los flujos de agua

entre cada tanque representan los procesos hidrológicos más significativos en el ciclo hidrológico: precipitación (lluvia o nieve), evapotranspiración, infiltración, percolación y pérdidas subterráneas.

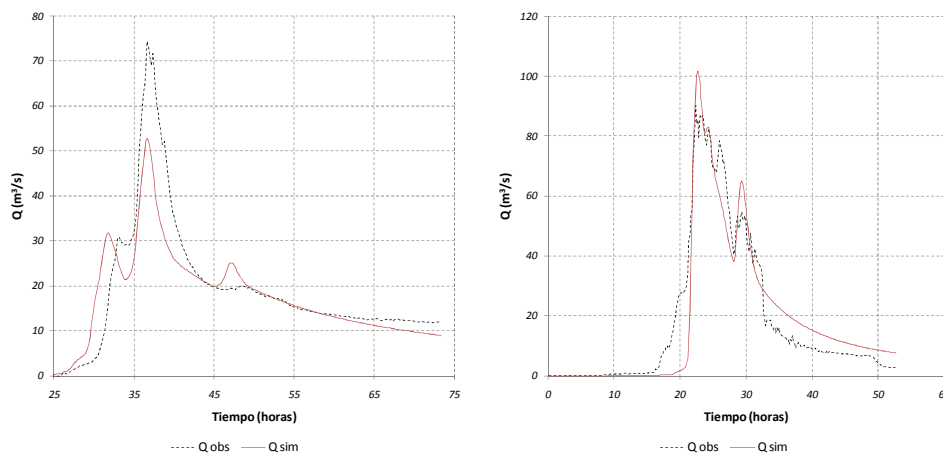
Las salidas posibles de agua para cada celda se da por los tres componentes principales de la escorrentía: la escorrentía directa (producida por escorrentía hortoniana y escorrentía por saturación), el interflujo y el flujo base. Cada proceso involucrado se simula con ecuaciones simples y con pocos parámetros para estimar. La formulación hidráulica utilizada en el modelo TETIS se basa en una aproximación de la onda cinemática, asumiendo un lecho fijo en cada celda en el cual se aplica una ecuación de balance.

### Modelación a escala de evento

El modelo hidrológico conceptual de parámetros físicos y distribuido en el espacio TETIS (Francés et al., 2002, Francés et al, 2007) ha sido calibrado y validado en las estaciones de aforo disponibles a escala de evento ( $\Delta t = 10$  minutos), utilizando como datos de input la precipitación de los pluviómetros SAIH. La calibración (Figura 2) y validación (por ejemplo, Figura 3) del modelo han sido satisfactorias, obteniendo índices de Nash-Sutcliffe superiores a 0.8 tanto en calibración como en casi todas las validaciones espacio-temporales.



**Figura 2.-** Calibración de TETIS en Isbert: hidrogramas (izda) y niveles (dcha) del evento de 04/2003.



**Figura 3.-** Validación espacio-temporal en Marina Baixa, 05/2002 (izda),y en Guadalest, 10/2007 (dcha).

### Análisis de la humedad del suelo

Dado que el objetivo de la modelación hidrológica es la simulación de tormentas sintéticas independientes, no queda definido el estado de humedad inicial. Por esta razón, el modelo TETIS ha sido calibrado y validado también a escala de simulación histórica ( $\Delta t = 1$  día). Una vez ajustado el

modelo diario, se han reproducido las variaciones del estado de humedad del suelo desde 1943 hasta hoy. A través de un análisis de frecuencia del estado de humedad de la cuenca (Figura 4), se han determinado tres estados de humedad representativos del comportamiento hidrológico de la cuenca (10%, 40% y 80% de humedad del suelo) y se les ha asignado una probabilidad de ocurrencia.

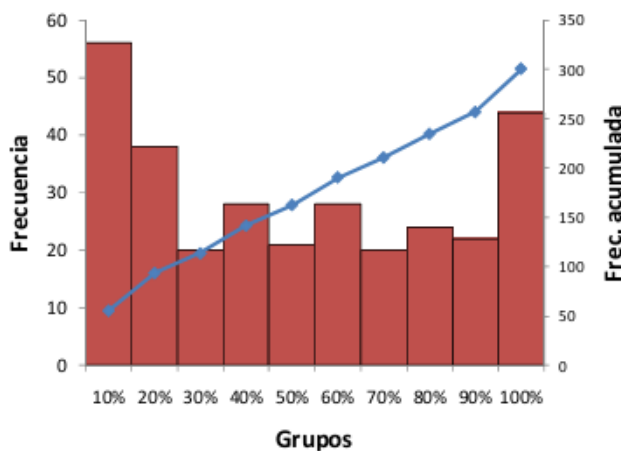


Figura 4.- Análisis de frecuencia de los estados de humedad

### Simulación de eventos sintéticos

Finalmente, en lo que respecta a la modelización hidrológica, el modelo TETIS se ha empleado para simular la transformación lluvia – escorrentía de los 368 eventos sintéticos disponibles, utilizando como estado inicial de humedad cada uno de los tres estados determinados anteriormente, obteniendo así 1104 hidrogramas por cada uno de los más de 200 puntos de simulación hidrológica.

### ANÁLISIS DE FRECUENCIA DE CAUDALES MÁXIMOS

En general, se suele asumir que una lluvia diaria de un determinado periodo de retorno genera un caudal pico al desagüe de la cuenca del mismo periodo de retorno. En realidad, esta hipótesis no está respaldada por las observaciones, ya que la misma precipitación diaria no siempre genera el mismo caudal, dado que las condiciones de humedad del suelo y la variabilidad espacio-temporal de la tormenta pueden ser distintas. Por esta razón se ha desarrollado la siguiente metodología, que aprovecha la caracterización espacio-temporal de la precipitación proporcionada por las tormentas sintéticas y el análisis probabilístico del estado de humedad de la cuenca proporcionada por la simulación hidrológica histórica, con el objetivo de asignar a cada caudal pico el periodo de retorno correcto. El resultado es una función de distribución empírica de los caudales máximos en una determinada sección, que resulta ser distinta de la función de distribución utilizada para asignar el periodo de retorno a la precipitación diaria.

Para la obtención adecuada de probabilidad de no excedencia de las variables de interés (caudal pico de entrada a la zona de inundación, nivel máximo en una presa, etc.) es necesario un tratamiento estadístico. Para ello se considera un modelo estadístico trivariado entre la precipitación diaria máxima anual, el estado de humedad inicial de la cuenca y la variable de interés. En este modo es posible estimar la probabilidad empírica de la distribución marginal de la variable de interés a partir de los valores generados sintéticamente. La ecuación final es la siguiente [5]:

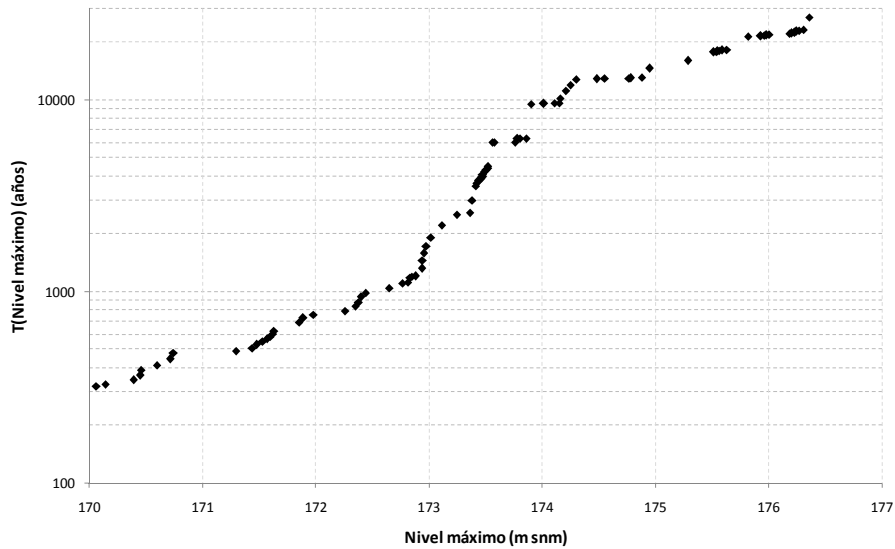
$$F_x(a) \approx \sum_{j=1}^3 \left\{ P_j \sum_{i=0}^{\infty} \frac{n_{ij}(a)}{N_{ij}} [F(R_{i+1}) - F(R_i)] \right\} \quad [5]$$

donde  $P_j$  corresponde a la probabilidad de que los almacenamientos en el modelo se encuentren en un estado de humedad  $j$ ;  $n_i(a)$  = número de observaciones menores o iguales que  $a$ ,

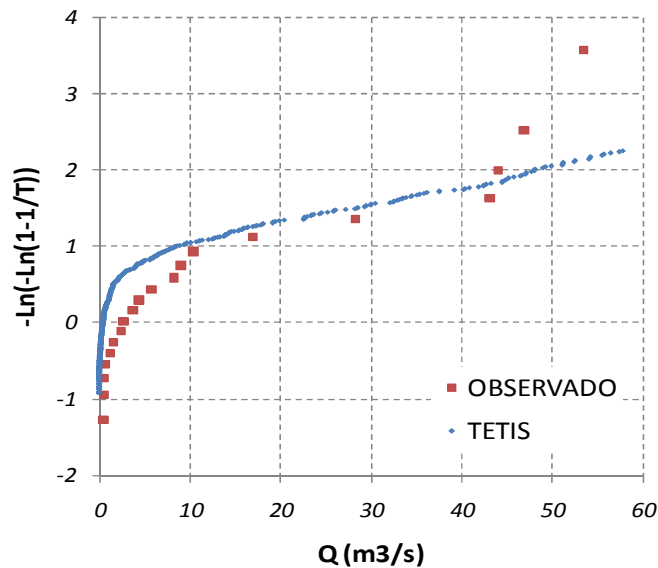
dentro del intervalo  $i$ , que cubre el rango  $[R_i, R_{i+1}]$  y  $N_i$  = número total de observaciones dentro del intervalo  $i$ .

El resultado es la asignación de un periodo de retorno a cada variable de interés que se pueda obtener del modelo hidrológico. Por ejemplo, se asigna un periodo de retorno al caudal máximo de cada hidrograma de los 368 x 3 generados, o a los volúmenes de los hidrogramas, según el objetivo del estudio. También es posible aplicar esta metodología a niveles o volúmenes de embalses (Figura6).

Una de las funciones de distribución de caudales máximos resultantes, la que coincide con la estación de aforo de Gallinera, ha sido utilizada para la validación de los cuantiles bajos (hasta 10 – 15 años de periodo de retorno). Los resultados se pueden ver en la Figura 5.



**Figura 6.** “Plotting position” del nivel máximo anual de un potencial nuevo embalse en el río Girona.



**Figura 5.** Validación de la función de distribución en la estación de Gallinera.

## MODELACIÓN HIDRÁULICA

En este estudio se ha llevado a cabo una modelación hidráulica bidimensional de las zonas inundables consideradas. Se ha utilizado el modelo matemático Infoworks RS 2D (Innovyze). El módulo InfoWorks RS 2D utiliza el método de volúmenes finitos para resolver las ecuaciones de

flujo de aguas someras. Utiliza mallas triangulares e irregulares con elementos escalonados planos horizontales para modelar el terreno, lo cual permite una alta flexibilidad para describir geometrías complejas. Los modelos digitales del terreno utilizados han sido realizados por medio de tecnología LIDAR, con una resolución de 1x1 m.

La metodología seguida en el proceso de modelación hidráulica ha sido la siguiente:

1) Definición de la topología del modelo (Figura 7): definición del modelo de elevación digital, dominio del modelo, obstáculos al flujo, edificios (tratados como polígonos impermeables), líneas de rotura y generación del mallado.

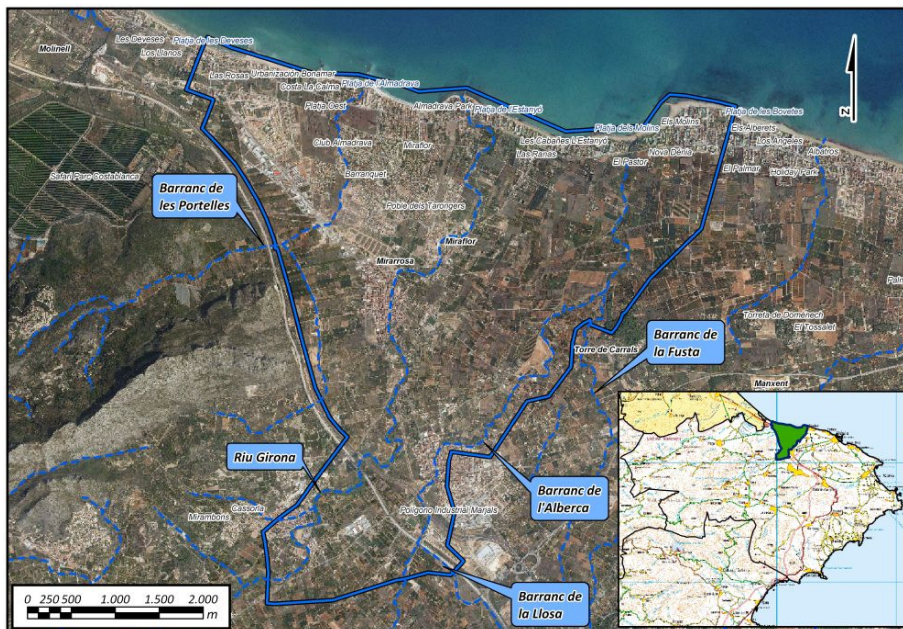


Figura 7.- Esquema del modelo.

2) Modelación de las estructuras hidráulicas que interactúan con el flujo en lámina libre, como por ejemplo alcantarillas, puentes o sifones invertidos que afecten los flujos principales; se modelan como elementos unidimensionales, mediante el elemento “orificio” que simula el flujo de un alcantarillado corto con una sección rectangular, y se comunican con la malla 2D mediante elementos de conexión 1D2D.

3) Definición de la rugosidad del suelo a través de unos polígonos de rugosidad homogénea indicando el número de Manning correspondiente a cada zona. Los polígonos han sido determinados a partir de los usos de suelo de CORINE (2006) y las ortofotos. Para la estimación del valor de la rugosidad de Manning ( $n$ ) se ha hecho uso de la clasificación de Chow (1982).

4) Definición de las condiciones de contorno (hidrogramas), escogiendo 5 de los 1104 hidrogramas generados en la modelación hidrológica por cada entrada al modelo. Cabe destacar que no existe un solo hidrograma de diseño; ya que solo se puede asignar un periodo de retorno a una variable escalar (en este caso el caudal pico), es altamente probable que se puedan generar hidrogramas muy distintos en términos de volumen, tiempo al pico y duración, pero con el mismo periodo de retorno. En este estudio se utiliza el hidrograma, referido a un punto de control aguas abajo del modelo, cuyo periodo de retorno del caudal pico sea cercano al periodo de retorno que se desea simular (10, 25, 50, 100 y 500 años). También se definen condiciones de contorno de marea, utilizando el “Atlas de Inundación del Litoral Peninsular Español”, desarrollado por el Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas de la Universidad de Cantabria, para la Dirección General de Costas del Ministerio de Medio Ambiente (GIOC, 2001).

Los resultados (por ejemplo, Figura 8) proporcionan unos mapas de calados máximos con un valor de probabilidad asociado, en términos de periodo de retorno, derivados de la modelación hidráulica bidimensional y definen la peligrosidad frente a eventos hidrometeorológicos extremos.





**Figura 8.-** Mapa de peligrosidad asociado a T = 500 años

## CONCLUSIONES

Uno de los objetivos más comunes en hidrología es el análisis de frecuencia de las crecidas en una determinada sección de un curso de agua. Este análisis se usa en varias aplicaciones de la ingeniería hidráulica e hidrológica, como por ejemplo el diseño de infraestructuras hidráulicas (aliviaderos de presas, obras de derivación, canales, etc.), el diseño de sistemas de drenaje transversal de infraestructuras lineares (puentes y sifones), cartografía de la peligrosidad y del riesgo de inundación, etc. El análisis de frecuencia de las crecidas tiene como objetivo principal la estimación de la relación entre los valores del caudal y su probabilidad de no excedencia correspondiente (o su periodo de retorno), o, simplemente la correspondencia de algunos valores de caudal con el periodo de retorno.

En muchas de las situaciones descritas anteriormente, las implicaciones socioeconómicas son enormes; por esta razón, se requiere la máxima precisión posible y el empleo de las técnicas más modernas: un error de infravaloración aumentaría el riesgo, mientras que un error de sobrevaloración aumentaría los costes de forma innecesaria.

La metodología tradicional basada en la tormenta de diseño conlleva fuertes limitaciones conceptuales, que sugieren su abandono. Este trabajo se basa en una metodología innovadora para la estimación de mapas de peligrosidad de inundación, que suple las limitaciones de la metodología clásica basada en la Avenida de Proyecto.

Los resultados han proporcionado unos mapas de calados máximos con un valor de probabilidad asociado (por ejemplo, figura 8), en términos de periodo de retorno, derivados de la modelación hidráulica bidimensional. Estos mapas indican la peligrosidad de las zonas estudiadas frente a eventos hidrometeorológicos extremos, y son de fundamental importancia en la planificación y en la ordenación del territorio.

## REFERENCIAS

- Bussi G, Bellver V, R García-Bartual, F Francé, L Pujo, R Gabaldón, E Orti, V Guna y J Antón** (2011a). Flash flood risk assessment following the European Water Framework Directive. The case of Marina Alta and Marina Baja (Alicante, Spain). *Geophysical Research Abstracts*. Vol. 13, EGU General Assembly, Vienna (Austria).
- Bussi, G, E Ortiz, F Francés, L Pujol, R Gabaldón, V Guna, V Bellver y J Antón** (2011b). Modelación hidráulica y análisis del riesgo de inundación según las líneas guía de la Directiva Marco del Agua. El caso de la Marina Alta y la Marina Baja (Alicante). *II Jornadas de Ingeniería del Agua*. Barcelona (España), Octubre de 2011.
- Calenda, G, E Gorgucci, F Napolitano, A Novella y E Volpi** (2005). Multifractal analysis of radar rainfall fields over the area of Rome. *Advances in Geosciences*, 2, 293-299.
- Chow V. T.** 1982. *Hidráulica de los Canales Abiertos*. Diana.
- Francés, F** (1998). Using the TCEV distribution function with systematic and non-systematic data in a regional flood frequency analysis. *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, v 12 (4), 267-283.
- Francés, F, J J Vélez, J I Vélez y M Puricelli** (2002). Distributed modelling of large basins for a real time flood forecasting system in Spain. En *Proceedings Second Federal Interagency Hydrologic Modelling Conference*. Las Vegas, USA. July 2002.
- Francés, F, J I Vélez y J J Vélez.** (2007). Split-parameter structure for the automatic calibration of distributed hydrological models. *Journal of Hydrology* 332, 1: 226–240.
- Francés, F, R García-Bartual y G Bussi** (2011a). High return period annual maximum reservoir water level quantiles estimation using synthetic generated flood events. *Proceedings of the 3rd International Forum on Risk Analysis, Dam Safety, Dam Security and Critical Infrastructure Management*. Valencia (España). Octubre de 2011.
- Francés, F, R García Bartual, G Bussi, J L Salinas y E Fernández** (2011b). Diseño hidrológico de alto período de retorno mediante generación sintética de eventos de crecida. *II Jornadas de Ingeniería del Agua*. Barcelona (España), Octubre de 2011.
- Qin, J** (2011). A high- resolution hierarchical model for space-time rainfall. *Phd Thesis. Univ. of Newcastle*.
- Rodríguez-Iturbe, I y P S Eagleson** (1987). Mathematical models of rainstorm events in space and time. *Water Resources Research*, 23 (1) pp. 181-190.
- Rossi, F, M Fiorentino y P Versace.** (1984). Two-Component Extreme Value Distribution for Flood Frequency Analysis. *Water Resources Research*, 20 (7), 847-856.
- Salsón, S y R Garcia-Bartual** (2003). A space-time rainfall generator for highly convective Mediterranean rainstorms. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3, 103–114.
- Sivapalan, M y E F Wood.** (1987). A multidimensional model of non stationary space-time rainfall at the catchment scale. *Water Resources Research*, 23 (7) pp. 1289-1299.
- Vandenbergh, S, N E C Verhoest, E Buyse, y B De Baets** (2010). A stochastic design rainfall generator based on copulas and mass curves. *Hydrology and Earth System Science*, 14, 2429-2442.
- Wheater, H S, R E Chandler, C J Onof, V S Isham, E Bellone, C Yang, D Lekkas, G Lourmas y M L Segond** (2005). Spatial-temporal rainfall modelling for flood risk estimation. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 19. 403-416.
- GIOC. Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas** (2001). *Atlas de inundación del litoral peninsular español. Documento complementario*. Ministerio de Medio Ambiente y Universidad de Cantabria.