

# ***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)***

*Gianbattista Bussi* <sup>(1),(3)</sup>, *Enrique Ortiz* <sup>(1),(2)</sup>, *Félix Francés* <sup>(3)</sup>, *Lucas Pujol* <sup>(1)</sup>, *Rafael Gabaldón* <sup>(1)</sup>, *Vicente Guna* <sup>(1),(2)</sup>, *Vicente Bellver* <sup>(5)</sup>, *José Antón Sempere* <sup>(4)</sup>

*(1) Hidrogaia SL, Av. Juan de la Cierva 46980- Paterna (Valencia)*

*(2) Idrologia e Ambiente srl, Riviera di Chiaia 72 80122 - Napoles (Italia)*

*(3) Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 - Valencia.*

*(4) Confederación Hidrográfica del Júcar, Avenida Blasco Ibañez 48, 46010 - Valencia*

*(5) Ingeniería y Promoción Bellver SL, C/Ronda del Castell s/n 46100 - Burjassot (Valencia)*

*eortiz@hidrogaia.com, gbussi@hidrogaia.com*

## **1 Introducción**

En el ámbito del análisis y gestión del riesgo de inundación, la Directiva Europea Marco del Agua (2007/60) fija algunos pasos a seguir en la redacción de un Plan Director de defensa contra las avenidas a escala de cuenca o a escala de división administrativa. Las principales directrices son las siguientes: análisis preliminar de inundación, con el objetivo de identificar las zonas con riesgo potencial de inundación, cartografía de detalle de daños y riesgos en las zonas inundables, y redacción de un plan director con el fin de reducir el riesgo de inundación donde se hayan detectado conflictos o problemas.

El presente trabajo aborda la temática del análisis hidráulico, de vulnerabilidad y de riesgo de inundación de 23 zonas con riesgo potencial de inundación, en el marco del estudio para la redacción de un Plan Director de defensa contra las avenidas de la Marina Alta y la Marina Baja, encargado por la Confederación Hidrográfica del Júcar. Estas zonas se conocen en toda España por su elevada vulnerabilidad, debido a las numerosas infraestructuras relacionadas con el turismo y la elevada densidad de población, y por la alta torrencialidad de los fenómenos meteorológicos que las afectan, como por ejemplo el denominado efecto de la “Gota Fría”.

La primera cuestión afrontada en el presente estudio es la modelación hidráulica bidimensional de las 23 zonas seleccionadas. Como descrito en otras ponencias del presente congreso, las condiciones de contorno de los modelos (hidrogramas de entrada) han sido determinadas a partir del acople de un modelo de generación sintética de tormentas extremas (RAINGEN – Salsón y García Bartual, 2003) y un modelo hidrológico conceptual y distribuido (TETIS, Francés et al., 2007). Los resultados son varios hidrogramas en cada punto de simulación; a través de una metodología estadística se ha asignado una probabilidad a la variable “caudal máximo” de cada hidrograma, expresada en términos de periodo de retorno.

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. Se han seleccionado los hidrogramas resultantes de la simulación hidrológica a utilizar en la simulación hidráulica en función del periodo de retorno del caudal pico en un punto de control del modelo hidráulico, situado aguas abajo del modelo mismo (por ejemplo, la desembocadura del curso de agua principal, en el caso de modelos hidráulicos situados en la costa). 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

calado por cada zona de simulación, correspondientes a 10, 25, 50, 100 y 500 años de periodo de retorno, por un total de 110 mapas de inundación.

El segundo tema abordado en el presente trabajo es el análisis de vulnerabilidad y riesgo asociado a la probabilidad de inundación. Para llevar a cabo esta fase del estudio, se han seguido las directrices de la Directiva Europea Marco del Agua: el riesgo de inundación se ha evaluado considerando variables de tipo hidráulico (en este caso, el calado máximo de inundación), teniendo en cuenta variables de tipo económico, social y medioambiental (Barroca et al, 2006).

Para realizar esta tarea, se han determinado curvas de vulnerabilidad elemental (Merzl et al, 2004; Büchele et al, 2006), es decir gráficos y tablas que relacionan el calado máximo de la inundación con el porcentaje de daño con respecto al daño máximo, en función del uso del suelo. Para poder transformar el daño elemental (entre 0 y 1) en daño monetario (en euros), estas curvas se han calibrado utilizando datos de daños observados en la avenida del Río Girona de 2007 en los pueblos de El Verger, Ondara y Beniarbieg. Estos datos provienen de informes de los ayuntamientos y de las empresas aseguradoras. Una vez obtenidas curvas calado (m) – daño (€), distintas en función de uso del suelo y densidad residencial, y a partir de los mapas de inundación (modelación hidráulica bidimensional) y de mapas de uso del suelo (CORINE), se han computado los daños monetarios correspondientes a cada uno de los cinco periodos de retorno considerados, obteniendo así mapas de vulnerabilidad. Dado que se conoce la probabilidad de ocurrencia de cada evento de inundación considerado, es posible caracterizar el riesgo, expresado en términos monetarios, asociado a cada zona de inundación.

Los resultados de la evaluación del riesgo se utilizarán para la siguiente fase de la redacción del Plan Director de defensa contra avenidas, es decir el estudio de soluciones. Los valores de riesgo en euros asociados a cada zona de inundación ayudarán a afinar el nivel de inversión económica al que es preciso actuar, y permitirán priorizar actuaciones en función del nivel de protección que proporcionan, de su coste, y de los daños que evitan (Bussi et al, 2010).

## 2 Metodología

El objetivo del presente estudio es la redacción de un plan director de defensa contra las avenidas de las comarcas de la Marina Alta y de la Marina Baja. Para poder alcanzar este propósito se identifican cuatro fases a seguir:

- 1) Estudio de la pluviometría;
- 2) Estudio de los procesos de transformación de la precipitación en escorrentía;
- 3) Estudio de la propagación de las crecidas en las zonas vulnerables;
- 4) Evaluación de los daños que las crecidas pueden causar.

En el presente estudio se ha seguido una metodología basada en el acople de distintos modelos, cada cual se utiliza para evaluar los procesos listados anteriormente. Se ha estructurado el estudio en los siguientes pasos:

- 1) Generación de tormentas sintéticas (en este caso 368) sobre todo el dominio de estudio a través del modelo RAINGEN (Salsón y García-Bartual, 2003) y análisis probabilístico de los cuantiles de precipitación a través de técnicas estadísticas, a partir de los datos de precipitación SAIH y AEMET.
- 2) Modelación hidrológica (transformación lluvia – escorrentía) a través del modelo TETIS (Francés et al, 2002; Francés et al, 2007), generación de hidrogramas de crecidas correspondientes a los 368 eventos de precipitación sintéticos por tres estados iniciales de humedad (1104 hidrogramas) en varias subcuencas distribuidas en el territorio estudiado, y asignación estadística de periodos de retorno a los caudales máximos en función de la precipitación diaria media areal del evento y de la probabilidad de ocurrencia del estado de humedad inicial.
- 3) Modelación hidráulica bidimensional de las 23 zonas más vulnerables (zonas densamente pobladas y potencialmente afectadas por problemas de inundación) a través del modelo hidráulico bidimensional INFOWORKS RS (Wallingford) y generación de mapas de calados correspondientes a caudales de distintos periodos de retorno (10, 25, 50, 100 y 500 años).
- 4) Evaluación de los daños por zona inundable y por periodo de retorno en función de curvas daños – calados calibradas en un evento real (Octubre 2007), en función de los calados proporcionados por la modelación hidráulica y de los usos del suelo, y evaluación del riesgo en función de los daños por periodo de retorno y su probabilidad.

El objetivo del presente artículo es describir las fases 3 y 4, ya que los primeros dos pasos se describen con más detalle en otros trabajos presentados en las II Jornadas de Ingeniería del Agua. No se procederá entonces a la descripción de las fases 1 y 2, cuyos resultados son los hidrogramas correspondientes a cada evento sintético y el periodo de retorno asociado al caudal máximo de cada evento. Los resultados de la fase 1 y 2 son el input de la fase 3.

## 2.1 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, que es un software para la gestión de sistemas hídricos en zonas fluviales, urbanas y rurales. Este programa ha sido desarrollado por Wallingford Software (MWH Soft). InfoWorks RS 2D combina una serie de características importantes, como la integración de modelación 1D – 2D y las múltiples posibilidades para el diseño de mallas de cálculo que permite optimizar la flexibilidad y precisión del modelo. El módulo InfoWorks RS 2D utiliza el método de volúmenes finitos para resolver las ecuaciones de flujo de aguas someras. Utiliza mallas triangulares, rectangulares e irregulares con elementos escalonados planos horizontales para modelar el terreno, lo cual permite una alta flexibilidad para describir geometrías complejas. También es posible seleccionar zonas de mayor precisión, zonas donde no se desea mallar como en los edificios (voids), líneas de rotura para modelar con mayor precisión zonas de cambios bruscos de pendiente, muros con una altura o cota fijada, muros porosos que permiten el paso parcial del agua y muros infinitos. La cota de cada triángulo se calcula a partir de las cotas de cada uno de sus vértices. Los resultados son los calados en el centro de cada celda de la malla y las velocidades en los lados.

Los modelos digitales del terreno utilizados han sido realizados por medio de tecnología LIDAR (Light Detection and Ranging), basada en la emisión de pulsos por parte de un Láser aerotransportado. LIDAR utiliza los mismos principios que la tecnología RADAR, si bien la longitud de onda de la señal utilizada difiere en gran medida. Los productos generados por los vuelos LIDAR, y utilizados en la modelación hidráulica son 23 modelos digitales del terreno con una resolución de 1x1 m, ya tratados, sin vegetación ni infraestructuras de paso (sobre todo puentes que obstruyan los cauces de la zona de estudio), capas de cobertura de edificios y coberturas con las estructuras de paso eliminadas.

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

- *Composición de la topología del modelo:* durante esta fase se importa el modelo de elevación digital, se define un dominio del modelo, se identifican los edificios, que serán tratados como polígonos impermeables de altura infinita, se definen las características del mallado (dimensión de los triángulos, zonas con mallados más finos, etc.), se definen las líneas de rotura para reproducir los cambios de pendiente, se introducen elementos restantes, como por ejemplo los muros porosos, y se genera la malla triangular del modelo.
- *Modelación de las estructuras hidráulicas:* en el caso de que existan alcantarillas, puentes o sifones invertidos que afecten los flujos principales se incorporarán como elementos unidimensionales. Estas estructuras se modelan 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.
- *Definición de la rugosidad del suelo:* se definen dentro de la zona de simulación unos polígonos de rugosidad homogénea indicando el número de Manning correspondiente a cada zona. A partir de los usos de suelo del CORINE (2006) y actualizado con las ortofotos del PNOA se identifican las zonas y se le asigna un valor de rugosidad. Para la estimación de la rugosidad se ha hecho uso de la clasificación presentada por Chow (1982) donde se establecen valores mínimos, normales y máximos del coeficiente de Manning ( $n$ ) para diferentes tipos de canal y planas de inundación.
- *Definición de las condiciones de contorno (hidrogramas):* en las entradas de los ríos a modelar se introduce el hidrograma correspondiente al periodo de retorno a simular. 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).
- *Definición de las condiciones de contorno (niveles de marea):* se utilizan los niveles de marea del mar Mediterráneo en la provincia de Alicante propuestos por 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.

## 2.2 Evaluación del riesgo

Se define como vulnerabilidad los daños que potencialmente se pueden producir en un punto del territorio y en una determinada época del año. Los daños provocados por una inundación pueden agruparse en las siguientes categorías:

- Daños Tangibles: medibles en términos económicos, que se dividen en daños directos (los daños físicos sobre los bienes, los costes de las medidas de emergencia adoptadas, el coste de limpieza de calles, casas, etc.) y daños indirectos, de difícil determinación, debido a su gran variabilidad (pérdidas por paralización de estructuras viarias, centros de producción y servicios, desaparición de puestos de trabajo, los sobrecostes financieros y la desvalorización de los terrenos inundados;
- Daños Intangibles: la pérdida de vidas humanas, los daños en monumentos, restos arqueológicos, etc., y los daños psicológicos en la población.

A los efectos de este trabajo sólo se van a considerar los daños directos. La vulnerabilidad depende del uso del suelo (bien actual o bien planificado) y varía con la magnitud de la inundación. La variable de magnitud más importante en la determinación de la vulnerabilidad frente a una inundación es el nivel (o calado) máximo alcanzado por las aguas, de tal forma que para cualquier uso del suelo se puede determinar una curva de porcentaje de daño sobre el valor total en función de ese calado (Figura 1 – Izquierda).

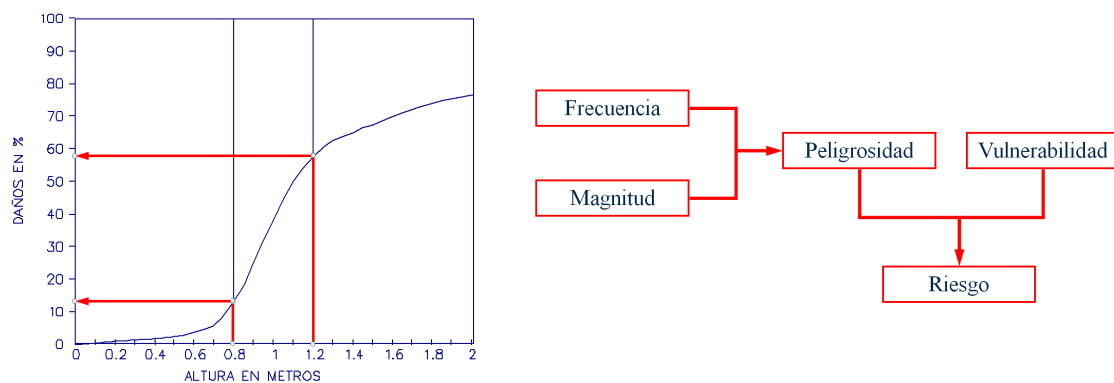


Figura 1 Curva de daños en función del calado y esquema de cálculo del riesgo

Una inundación es un fenómeno natural no permanente, durante el cual una parte del territorio es ocupada temporalmente por las aguas. El riesgo que provocan las inundaciones en una zona concreta del territorio se obtiene por la combinación en el espacio de la peligrosidad y la vulnerabilidad. El riesgo es, por tanto, el daño medio que potencialmente pueden producir las inundaciones, y será mayor en la medida en que la vulnerabilidad y la peligrosidad también lo sean. La peligrosidad vendrá dada a su vez, por la combinación de la frecuencia y magnitud de la inundación (Figura 1 - derecha).

Desde el punto de vista matemático, puede procederse al cálculo del riesgo en una zona determinada. Asumiendo que el riesgo es el daño medio en cada punto del territorio, la densidad espacial de riesgo será:

$$D = \int_{F=0}^{F=1} V(h) dF_H = \int_{h=0}^{h=\infty} V(h) f_H(h) dh \quad (1)$$

Donde  $V(h)$  representa los daños,  $h$  representa el calado máximo,  $F_H$  la función de distribución acumulada del calado y  $f_H$  la función de densidad de probabilidad del calado. El presente estudio se limita a valorar los daños directos causados por la inundación, dejando de lado los daños indirectos e intangibles, que en ocasiones pueden alcanzar una gran importancia, pero sin embargo son difícilmente evaluables por su propia concepción. Los daños directos van a ser obtenidos por aplicación de curvas de vulnerabilidad para los diversos tipos de usos del suelo.

Para poder obtener la curva de vulnerabilidad de cada una de las tipologías en las que se ha dividido el territorio en función del uso del suelo, es necesario disponer de una serie de curvas elementales. Estas curvas elementales representan los daños en porcentaje respecto de un valor máximo de daño posible para cada uno de los elementos que pueden sufrir daños. Esto significa que dentro de una misma zona residencial existen viviendas, garajes en planta de sótano, comercios, vehículos, etc., y, lógicamente, los daños que se produzcan en una vivienda no podrán ser evaluados de la misma forma que los producidos sobre un local comercial. Es necesario disponer, como punto de partida, de curvas elementales que relacionan la evolución de los daños en porcentaje con respecto de la lámina de agua para cada uno de los bienes afectados por la inundación.

El siguiente paso es uno de los más sensibles, puesto que se trata de valorar los daños máximos que pueden producirse sobre cada uno de los bienes afectados por una inundación. En función de esos daños máximos, se pueden obtener los daños para el resto de calados por aplicación de las curvas de vulnerabilidad elementales dadas anteriormente. El módulo adoptado será distinto para cada uno de los bienes que pueden sufrir daños durante una inundación, y que son los que se han individualizado para la obtención de las curvas de vulnerabilidad elementales. Este módulo es el valor medio (a lo largo de todo el territorio analizado) de los daños máximos (para calados superiores a 3 m) que provoca una inundación sobre un metro cuadrado del bien analizado. Estos módulos han sido obtenidos tras un profundo análisis en el que se han tenido en cuenta el valor del metro cuadrado de techo según diversos organismos, el precio de las viviendas de protección oficial, la información contenida en la base de datos de siniestralidad del Consorcio de Compensación de Seguros, el estudio del programa Europeo Interreg IIIB Medocc para el cálculo de daños producidos por grandes catástrofes, la información de Seguros Agrarios y normativa que los regula, las valoraciones aportadas por agricultores en activo y la calibración de las curvas. Una vez obtenidas las curvas elementales y los módulos, se pueden calcular las curvas de vulnerabilidad.

Se procede entonces a la calibración de las curvas de vulnerabilidad. Para realizar la calibración se necesita conocer los daños que realmente se han producido en un evento determinado y compararlos con los resultados obtenidos por aplicación de las curvas de vulnerabilidad sobre la zonificación territorial. El evento más significativo del que se dispone en la zona es el desbordamiento del Riu Girona en octubre de 2007, ya que por proximidad en el tiempo e información disponible de todo tipo va a ser el más representativo. Para la calibración se van a emplear los datos facilitados por el Consorcio de Compensación de Seguros en las poblaciones afectadas y por el Ayuntamiento de El Verger.

El resultado de este procedimiento es la evaluación del riesgo cuantificado en términos monetarios (en €); por cada mapa de calados máximos resultante de la simulación hidráulica se calcula el total de daños estimados causados por el evento de crecida. Luego se procede a la evaluación del riesgo en términos de coste anual, con el objetivo de proporcionar un valor en €/años que se podrá utilizar, por ejemplo, para un análisis coste – beneficios en la evaluación de la viabilidad de una obra de defensa contra las avenidas. La ecuación presentada anteriormente (1) puede ser aproximada por la siguiente expresión:

$$D \approx \frac{V_{10}}{2} \cdot \left[ \frac{1}{T_{\min}} - \frac{1}{10} \right] + \frac{V_{10} + V_{25}}{2} \cdot \left[ \frac{1}{10} - \frac{1}{25} \right] + \frac{V_{25} + V_{50}}{2} \cdot \left[ \frac{1}{25} - \frac{1}{50} \right] + \frac{V_{50} + V_{100}}{2} \cdot \left[ \frac{1}{50} - \frac{1}{100} \right] + \frac{V_{100} + V_{500}}{2} \cdot \left[ \frac{1}{100} - \frac{1}{500} \right] + V_{500} \left[ \frac{1}{500} \right] \quad (2)$$

Siendo  $V_i$  el valor del daño obtenido por aplicación de las curvas de vulnerabilidad y  $T_{\min}$  el periodo de retorno mínimo para el que no se produce el desbordamiento del cauce analizado, obtenido de la simulación hidráulica.

### 3 Caso de estudio

El presente trabajo se ha aplicado a las comarcas de la Marina Alta y de la Marina Baja (Alicante). Las comarcas de la Marina Alta y de la Marina Baja se sitúan en la parte norte de la provincia de Alicante, en la Comunidad Valenciana (Figura 2 – izquierda). Se encuentra, desde el punto de vista administrativo, en la Demarcación Hidrográfica del Júcar, y su territorio está repartido entre distintas cuencas de tamaño medio a pequeño. Las cuencas más importantes que vierten a la Marina Alta son las cuencas del río Girona, del río Gorgos, del río Algar y del río Amadorio, de 111, 264, 214 y 220 km<sup>2</sup>.

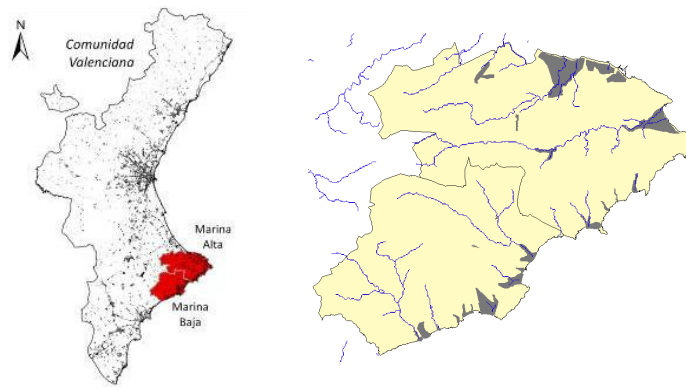


Figura 2 Localización de la zona de estudio y zonas inundables modeladas

Las Marinas poseen una orografía bastante compleja, ya que las surcan numerosas montañas, valles y una costa muy accidentada. La altitud de la zona varía de los 0 m s.n.m. a 1550 m s.n.m. Los relieves más importantes se sitúan en la zona noroeste, en el interior, sobre todo en la divisoria entre la Cuenca de los Ríos Gallinera y Vedat y la cuenca del Río Gorgos.

La climatología de esta zona se caracteriza por la ocurrencia de fenómenos torrenciales extremos, debidos en principal medida al fenómeno mediterráneo de la Gota Fría, que genera episodios de tormentas relativamente breves (la duración media de una tormenta es de 24 – 36 horas) y muy intensos (hasta 978 mm acumulados en el evento de 1957 en el pluviómetro de Jávea), incrementándose la torrencialidad de sur a norte. Desde un punto de vista hidrológico, las cuencas vertientes a las Marinas se caracterizan por la presencia de fenómenos de tipo kárstico, principalmente en sus cabeceras. La escorrentía directa representa la componente principal del flujo, aunque las componentes subsuperficial y subterránea pueden adquirir cierta importancia, debido a la relevancia del karst en estas cuencas. Las zonas más sensibles desde el punto de vista de la inundabilidad están localizadas principalmente en la costa, donde se encuentran algunas planas de tipo aluvial (la plana del río Girona y la plana de Jávea), aunque la geomorfología es bastante accidentada y las zonas inundables quedan a menudo bien definidas por la topografía.

Desde un punto de vista socio-económico, la gran mayoría de la población y de las actividades económicas se encuentra en la costa, debido al elevado desarrollo del turismo, que ha causado una presión urbana considerable en prácticamente todo el tramo litoral de las Marinas. La elevada exposición de personas e infraestructuras, junto a las características torrenciales de la climatología local, hacen que las Marinas sean una zona de vulnerabilidad elevada frente a fenómenos hidrometeorológicos extremos.

## 4 Resultados: calados

### 4.1 Simulación hidráulica

En este apartado solo se presentará uno de los 23 modelos analizados a título de ejemplo; en la modelación de las otras situaciones se ha seguido la misma metodología. Se ha decidido presentar el modelo de la plana del Río Girona, por su complejidad y por la disponibilidad de datos para la calibración de las curvas de vulnerabilidad. La plana del Río Girona está situada en la parte septentrional de la Marina Alta, en correspondencia de los territorios municipales de Beniarbeig, El Verger, Els Poblets y Denia. Los principales cursos de agua vertientes a esta zona son el Río Girona (110 km<sup>2</sup>), el barranco de la Alberca (47 km<sup>2</sup>) y el barranco Portelles (9 km<sup>2</sup>). El dominio del modelo hidráulico del río Girona tiene una extensión de 20.6 km<sup>2</sup>. En la Figura 3 se puede ver un esquema del modelo.

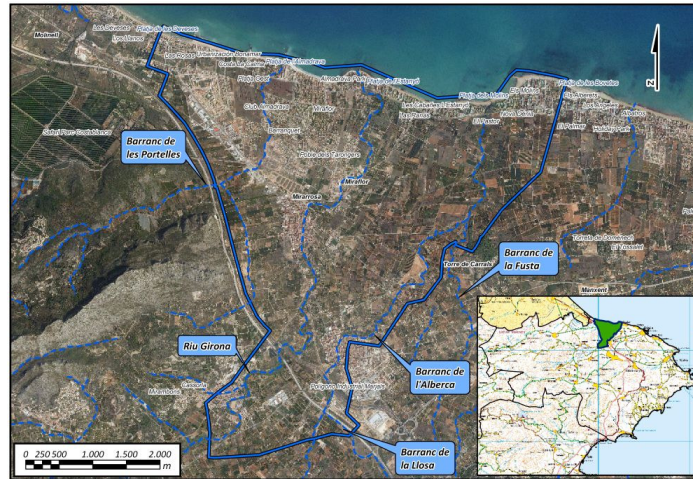


Figura 3 Esquema del modelo

El polígono de simulación (extensión del modelo) define la extensión de simulación hidráulica y los tamaños máximos y mínimos de los elementos del mallado ( $200 \text{ m}^2$  y  $40 \text{ m}^2$  respectivamente). Se definen también algunos polígonos de malla sobre las zonas que requieren de mayor precisión con elementos triangulares menores con un máximo de  $10 \text{ m}^2$  y un mínimo de  $2 \text{ m}^2$  para el polígono de malla del Portelles y río Alberca con sus afluentes y de  $20 \text{ m}^2$  y  $4 \text{ m}^2$  para el del Girona. También se ha definido una capa de edificio (*voids*), tratados como polígonos impermeables de altura infinita, y una capa de líneas de rotura, para reproducir con mayor precisión los cambios de pendiente, como se muestra en la Figura 4.

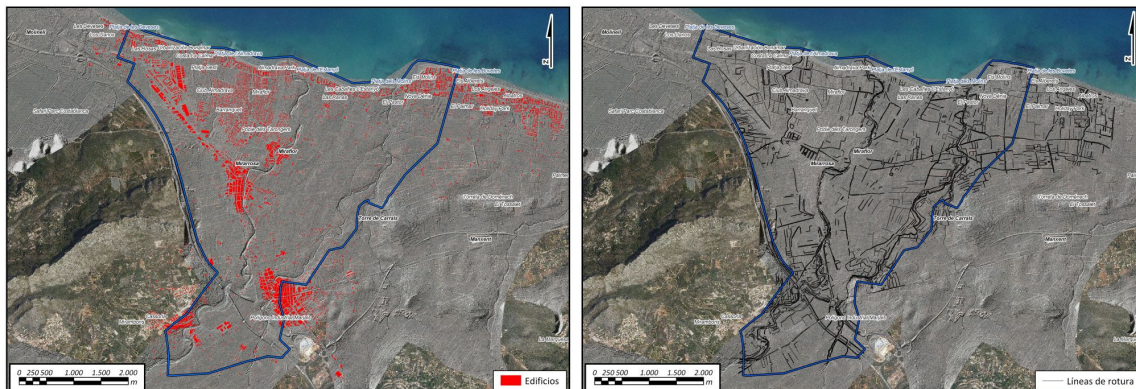


Figura 4 Edificios y líneas de rotura

El mallado del modelo general tiene un total de utilizado para la modelación con un total de 365012 triángulos y 191957 vértices.

La rugosidad de Manning se define en toda la extensión del modelo partiendo de la información obtenida de los usos del suelo del Corine 2006 adaptándola según la ortofoto de la zona.

El modelo tiene como entradas los caudales en el Río Girona, en del barranc de les Portelles, en el Barranc de la Alberca, en el Barranc de la Llosa (afluente de la Alberca) y en el Barranc de la Fusta (afluente de la Alberca). Los hidrogramas utilizados en la simulación hidráulica provienen del estudio hidrológico; se han simulado 5 periodos de retorno (10, 25, 50, 100 y 500 años).

Como condición de contorno en el perímetro del polígono de simulación se define la condición de calado normal, y en el mar se definen los siguientes niveles de marea para los 5 periodos de retorno analizados: 70, 72, 74, 75, 80 cm para 10, 25, 50, 100 y 500 años de periodo de retorno respectivamente. En la Figura 5 se muestran los resultados de la simulación hidráulica.

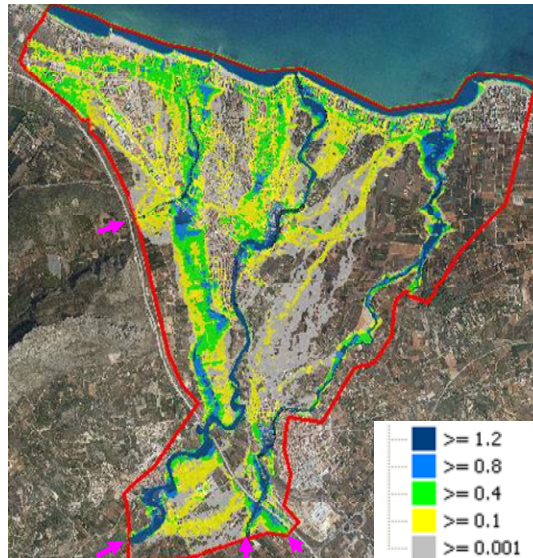


Figura 5 Resultados de calados en metros para la simulación hidráulica de 100 años de periodo de retorno

Se observan importantes calados desbordados, sobre todo provenientes del río Girona. En particular, se observa como existe un desbordamiento muy relevante en margen izquierda del río Girona, en correspondencia de un meandro, y que los flujos desbordados toman una dirección preferente hacia el barranco de Portelles, debido a la presencia de un paleocauce llamado Clot del Francés.

#### 4.2 Evaluación del riesgo

Los mapas de calados obtenidos en la simulación hidráulica son el input del proceso de evaluación de la vulnerabilidad. El primer paso de este proceso es la evaluación de curvas de vulnerabilidad elementales, que representan los daños en porcentaje respecto de un valor máximo de daño posible para cada uno de los elementos que pueden sufrir daños. Siguiendo la metodología presentada en los capítulos anteriores, se han obtenido curvas de vulnerabilidad elementales por cada tipo de uso del suelo. También se ha estimado el módulo del daño máximo por cada uso. Este módulo es el valor medio (a lo largo de todo el territorio analizado) de los daños máximos (para calados superiores a 3 m) que provoca una inundación sobre un metro cuadrado del bien analizado. A partir de estos datos se pueden obtener las curvas de vulnerabilidad por uso. La Figura 6 muestra un ejemplo.

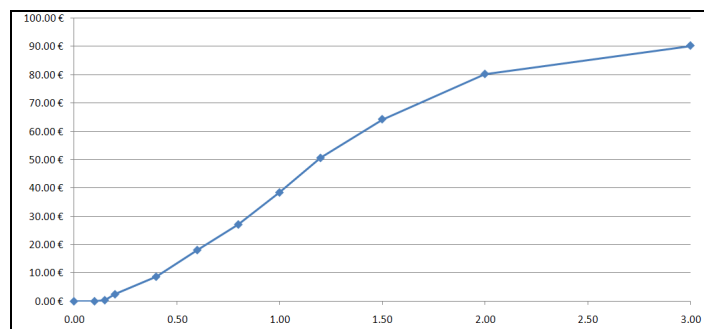


Figura 6 Curva de Vulnerabilidad por daños directos del uso Residencial de Media Densidad

El siguiente paso es la calibración de estas curvas, siguiendo los datos proporcionados por el Consorcio de Compensación de Seguros y por el Ayuntamiento de El Verger para los daños relativos al evento de crecida de octubre 2007. En la Tabla 1 se muestran los daños registrados por el Consorcio en cinco poblaciones tras los sucesos de octubre de 2007.



Tabla 1 Daños directos provocados por el evento de octubre 2007

Población	TOTAL	VIVIENDAS	COMUNIDADES	COMERCIO	VEHÍCULOS	RESTO
BENIARBEIG	767,177	525,938		24,804	131,348	85,088
DENIA	2,536,880	1,353,949	640,104	169,342	368,885	4,600
EL VERGER	2,807,359	1,849,639	45,100	302,116	610,504	
ELS POBLETS	8,535,456	6,026,854	119,362	1,341,177	1,042,752	5,311
ONDARA	378,373	180,657		150,135	6,881	40,700

Para efectuar una correcta calibración, se ha utilizado también un informe emitido por el Ayuntamiento de El Verger en el que se procede a la valoración de los daños producidos por el desbordamiento por parte de técnicos municipales y con un criterio de tasación establecido por el propio consistorio basado en criterios objetivos. El resultado de este informe refleja unos daños en El Verger de 4.274.087 €.

Los resultados de los informes disponibles se han comparado con los resultados obtenidos aplicando las curvas de vulnerabilidad a la reconstrucción del mapa de calados máximos del evento de Octubre 2007. Esta reconstrucción se basa en la modelación hidráulica del evento, hecha a partir de los caudales proporcionados por una simulación hidrológica del modelo TETIS con los datos de precipitación de Octubre 2007. El importe obtenido tras todas estas operaciones es de 4.529.330 €.

A la vista de los resultados, se puede considerar que los daños obtenidos por la aplicación de las curvas de vulnerabilidad sobre los calados del modelo hidráulico del evento del Río Girona son superiores a los del Consorcio y muy similares a los facilitados por el Ayuntamiento de El Verger. Se considera que los daños reflejados por el Ayuntamiento son más próximos a la realidad (los datos del Consorcio solo reflejan daños en bienes que cuentan con un seguro contratado), por lo que se estima que las curvas son adecuadas.

Otra validación efectuada es la comparación con los datos proporcionados por el estudio PATRICOVA (Plan de Acción Territorial de carácter Sectorial sobre prevención del riesgo de inundación en la Comunidad Valenciana). En este Plan Territorial, redactado en el año 1998, se valoran los daños máximos para la tipología “residencial de muy alta densidad” y el valor que adopta Patricova para estos daños es de 13.700 ptas/m<sup>2</sup>, o 82,34 €/m<sup>2</sup>, es decir 113 €/m<sup>2</sup> actualizados a 2010. La cifra con la obtenida en el presente estudio para el mismo uso residencial de alta densidad, sin considerar los daños y limpieza de viales (ya que en el estudio de Patricova no se tenían en cuenta), es casi exactamente igual (110 €). Esta comprobación permite validar los resultados de una forma alternativa a la calibración anterior.

A este punto, se puede proceder al cálculo de los daños directos. Tras la aplicación de las curvas de vulnerabilidad a los mapas de calados máximos proporcionados por la simulación hidráulica, se obtienen los daños totales por periodo de retorno. Utilizando la ecuación (2), se puede calcular la densidad espacial de daños directos. La Figura 7 muestra la densidad de riesgo por daños directos para la plana del río Girona, donde se puede apreciar la mayor concentración del mismo en las zonas urbanas.

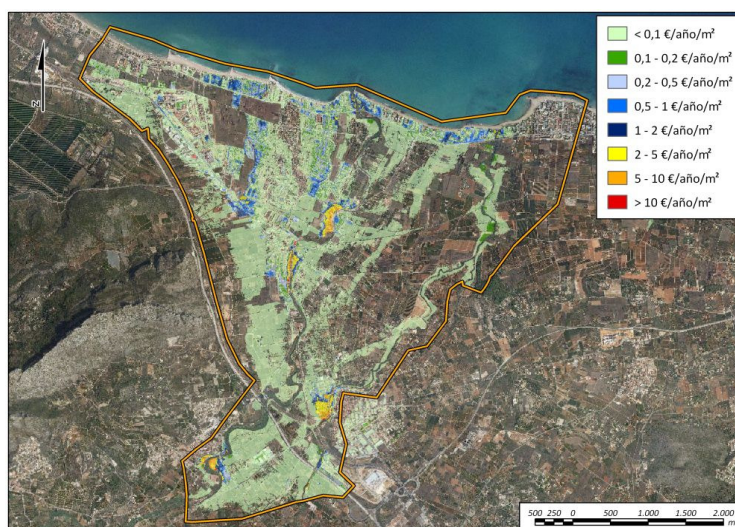


Figura 7 Densidad del riesgo de inundación por daños directos en euros/año/m<sup>2</sup> en la plana del río Girona

## 5 Conclusiones

En este trabajo se ha presentado una evaluación del riesgo de inundación de las comarcas de la Marina Alta y de la Marina Baja (Alicante), llevado a cabo según las pautas dictadas por la Directiva Marco del Agua. El estudio integra distintos modelos en las diversas fases del proceso (generación sintética de lluvia, análisis estocástico de la pluviometría, transformación lluvia-escorrentía, análisis estocástico de los caudales máximos generados, modelación hidráulica bidimensional y evaluación de la vulnerabilidad), con el objetivo de definir el riesgo en las zonas inundables de las Marinas.

Los resultados proporcionan unos mapas de calados máximos con un valor de probabilidad asociado, 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.

Además, se ha proporcionado una evaluación monetaria del riesgo de inundación, que, a través de unas curvas de vulnerabilidad por uso del suelo, calibradas con datos reales, facilita un valor del daño en euros/año, que resulta indispensable a la hora de evaluar la viabilidad de una obra o de un conjunto de medidas de defensa de las avenidas, a través de un análisis costes – beneficios y, muy especialmente, la priorización de actuaciones entre distintas zonas de inundación.

En este trabajo se ha seguido una metodología sencilla pero a la vez robusta, compuesta por distintos pasos, de fácil aplicación en muchas zonas inundables de España, para alcanzar los objetivos propuestos para la redacción del Plan Director de las comarcas de la Marina Alta y la Marina Baja.

## 6 Referencias

- Barroca B, Bernardara P, Mouchel JM y Hubert G. 2006. Indicators for identification of urban flooding vulnerability. *Natural Hazards Earth System Sciences*, 6, pp. 553–561
- Büchle B, Kreibich H, Kron A, Thielen A, Ihringer J, Oberle P, Merz B y Nestmann F. 2006. Flood-risk mapping: contributions towards an enhanced assessment of extreme events and associated risks. *Natural Hazards Earth System Sciences*, 6, pp. 485–503
- Bussi G, Bellver V, García-Bartual R, Francés F, Pujol L, Gabaldón R, Ortiz E, Guna V y Anton J. 2011. 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, EGU2011-13049, 2011. EGU General Assembly, Vienna (Austria).
- Chow V. T. 1982. Hidráulica de los Canales Abiertos. *Diana*.
- 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.
- Merz B, Kreibich H, Thielen A y Schmidtke R. 2004. Estimation uncertainty of direct monetary flood damage to buildings. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4, pp. 153–163
- Salsón S y Garcia-Bartual R. 2003. A space-time rainfall generator for highly convective Mediterranean rainstorms, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3, 103–114.
- Universidad de Cantabria. 2007. Atlas de inundación del litoral peninsular español, 59 pp, *Ministerio de Medio Ambiente; Universidad de Cantabria*.