



## INTRODUCCIÓN

Recientemente, el paradigma de "lucha contra" las inundaciones ha demostrado ser inefectivo y ha dado paso a lo que se denomina "gestión del riesgo de inundaciones". Este nuevo paradigma reconoce que no hay protección total, un proceso continuo y holístico de análisis, valoración y reducción del riesgo. Existen medidas que intentan modificar alguna de las componentes del riesgo, entendido éste como "la combinación de la probabilidad de que se produzca un evento de inundación y sus posibles consecuencias negativas". Las recientes normativas aprobadas para ello (Unión Europea/Estado Español), sugieren que una de las medidas adecuadas para la gestión del riesgo es la "mejora de la retención de agua" en la cuenca, también conocidas como medidas de "retención de agua en el territorio". Éstas son acciones descentralizadas en el territorio para el control en origen de las avenidas, evitando a su vez la generación de fuertes impactos negativos en el medio ambiente.

En este trabajo se comparan los efectos de dos estrategias enmarcadas dentro del concepto de "mejora de la retención de aguas": i) control de generación de la escorrentía; ii) control de la propagación de la escorrentía. Ejemplos típicos de éstas pueden ser, la reforestación y los embalses, respectivamente.

## METODOLOGÍA

A continuación se presenta brevemente la propuesta metodológica desarrollada para los escenarios de medidas planteados en el caso de estudio. Ésta se basa en la integración de los avances de diferentes líneas de investigación del GIMHA-UPV. Mayores detalles pueden verse en Salazar (2013). Una aplicación de la misma en un análisis comparativo de la respuesta hidrológica para diferentes medidas de gestión del riesgo, escalas y regiones hidroclimáticas en Europa puede verse en Salazar et al. (2012) y Francés et al. (2008).

**Determinación de la peligrosidad:** la peligrosidad está definida como la probabilidad de ocurrencia de una inundación, dentro de un período de tiempo determinado y en un área dada. Para el análisis de frecuencia se ha propuesto un enfoque compuesto por las siguientes tareas: i) generación de tormentas sintéticas (utilizando el modelo estocástico RAINGEN, Salsón y García-Bartual, 2003) y su función de distribución de probabilidad; ii) establecimiento del modelo hidrológico (utilizando el modelo hidrológico distribuido TETIS, Francés et al., 2007) tanto a escala diaria como de evento, obteniéndose respectivamente, las función de distribución de las Condiciones de Humedad Antecedente del Suelo (en adelante "CHAS") y un modelo evaluado para la generación de las avenidas sintéticas; iii) generación de avenidas sintéticas sobre la base de los resultados de las anteriores fases; iv) análisis trivariado de frecuencia teniendo en cuenta: los caudales máximos obtenidos en la generación de avenidas sintéticas y las funciones de distribución de probabilidad de las tormentas y de las CHAS. Para el análisis de la magnitud de la inundación se ha utilizado la modelación hidráulica acoplada en 1D/2D para la obtención de los caudales máximos (ver HIDROGAIA, 2008 en Francés et al., 2008).

**Determinación de la vulnerabilidad económica:** la vulnerabilidad está en función: del grado de exposición, indicador de los potenciales receptores al evento de inundación, y de la susceptibilidad, indicador del grado de daño que pueden experimentar los receptores en función de su valor social. Aquí se expresa como daños directos tangibles utilizando funciones de daños potenciales (curvas calado-daño), diseñadas para el caso de estudio, mediante el uso de diferentes fuentes de información (ver EXIMENIS, 2008 en Francés et al., 2008). Se utilizaron: curvas detalladas para los daños en coches y edificaciones y sus contenidos en suelos de uso residencial; curvas aproximadas para los costos producidos por la limpieza de sedimentos en la red de alcantarillado y calles, así como daños en suelos de uso industrial y terciario; desde Camarasa et al. (2011) se han obtenido valores de daño para suelos de uso agrícola.

**Determinación del riesgo:** aquí se integran los resultados de la cuantificación de la peligrosidad y la vulnerabilidad económica a través de herramientas SIG, siguiendo la Ecación [1] calculada en su forma discreta.

$$R(t) = \int_{h_0}^{\infty} D(h)f_H(h)dh \quad [1]$$

dónde,  $R$  es el Riesgo expresado como Daño Anual Esperado (DAE en €/año);  $D$  es el daño económico directo;  $h$  es el caudal máximo;  $f_H(h)$  es la función de densidad de probabilidad del caudal máximo; y  $h_0$  es umbral de daño.

## CASO DE ESTUDIO

La Rambla del Poyo, Valencia (Figura 1), tiene una cuenca de aportación hasta L'Albufera de 429.55 km<sup>2</sup>. Ésta es un caso representativo para la gestión del riesgo de inundaciones en el mediterráneo español.



Figura 1. Localización de la Rambla del Poyo (Valencia)

En ella confluyen los factores desencadenantes para la generación de inundaciones de tipo relámpago:  
 i) lluvias convectivas de alta intensidad;  
 ii) soporte físico caracterizado por fuertes pendientes y amplios valles aluviales, cauces cortos y trencados, lechos rocosos y secciones transversales estrechas en cabecera y amplias en la desembocadura, vegetación poco densa, suelos poco profundos con sustratos permeables;  
 iii) fuerte alteración antrópica de los cauces y llanuras inundables, donde en estas últimas suele existir una alta exposición de personas y bienes, producto de la expansión urbanística e industrial del cinturón metropolitano de la ciudad de Valencia.

## ESCENARIOS

**Reforestación:** Este escenario se refiere a cambios en las coberturas vegetales que pueden ser reforestadas (matorral, secano y secano y arbollado), de acuerdo con las tendencias de cambios de usos del suelo en la cuenca.

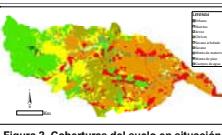


Figura 2. Coberturas del suelo en situación actual

Como cobertura de referencia se ha asumido la de monte pinar maduro, que respecto a la superficie total de la cuenca es pequeña (0.59%), lo cual facilita la caracterización de los parámetros del modelo hidrológico. El escenario analizado es el máximo potencial de área forestal: 55.27% del área de aportación (categorías de secano, secano arbollado y matorral de la Figura 2 se convierten en la categoría de monte pinar).



Figura 3. Localización de los 184 embalses distribuidos

En Salazar (2013) puede verse un análisis del efecto diferenciado de distintas capacidades de retención en el territorio. Por otro lado, en Salazar et al. (2012) se presenta: i) un análisis de este mismo escenario de embalses distribuidos pero atendiendo a criterios ambientales (presas menores de 15m con volúmenes menores de 100,000m<sup>3</sup>) y su comparación con medidas homologas en otras regiones hidroclimáticas de Europa; ii) un análisis sobre el efecto de la localización de estas hidrotecnias en la reducción de los caudales máximos a escala de cuenca.



Figura 4. Localización del embalse único equivalente

## EFFECTIVIDAD DE LAS MEDIDAS

La "efectividad" expresa la consecución del efecto deseado de reducción del riesgo de inundaciones. La reducción puede darse mediante la afectación de las variables que componen el riesgo: la peligrosidad y/o la vulnerabilidad. Las medidas aquí introducidas, afectan sólo la peligrosidad, en la medida en que se están alterando únicamente los procesos de generación y propagación de la escorrentía, más no se está alterando, ni la susceptibilidad ni la exposición de los elementos en riesgo en la zona inundable.

Para realizar un análisis comparativo homogéneo de la efectividad de las diferentes medidas propuestas, se ha introducido el indicador "MAISC" ("Mean Areal Increase of Storage Capacity") presentado en Salazar et al. (2012). Teniendo en cuenta los escenarios potenciales máximos descritos anteriormente, éstos tienen valores del índice MAISC (referenciados al área cubierta hasta la Autovía V-31) iguales a 12, 41 y 41 mm, respectivamente. La cuantificación del riesgo para estos escenarios da como resultados las curvas Daño-Frecuencia mostradas en la Figura 5. En dicha figura, se ha presentado la curva homóloga en situación actual, lo cual brinda una primera percepción del grado de cambio del riesgo, es decir, la efectividad de las medidas analizadas. Para cuantificar, la efectividad de los escenarios analizados a través de la reducción del riesgo, denominada  $R_r$  y expresada en porcentaje, se ha seguido la siguiente expresión:

$$R_r = \frac{R_0 - R_i}{R_0} \cdot 100\% \quad [2]$$

donde,  $R_0$  es el riesgo estimado en la condición actual, expresado como Daño Anual Esperado (DAE) en €/año; y  $R_i$  es el riesgo estimado en cada escenario, expresado como DAE en €/año.

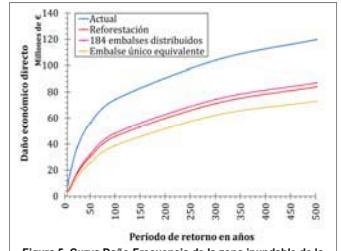


Figura 5. Curva Daño-Frecuencia de la zona inundable de la Rambla del Poyo para escenarios máximos de "retención de agua en el territorio"

La aplicación de la expresión anterior muestra los resultados que se presentan a continuación, los cuales están ordenados de mayor a menor efectividad. La comparación de la efectividad ( $R_r$ ) de escenarios con diferentes incrementos en la capacidad de retención hídrica en la cuenca no es justa. Por ello, se ha utilizado la relación efectividad ( $R_r$ )/MAISC. Como se aprecia adelante, el orden de mayor efectividad cambia

Efectividad (R <sub>r</sub> )/MAISC:	Reforestación:	Embalse único equivalente:	Embalse único equivalente:
	4.0 %/mm	1.4 %/mm	1.4 %/mm
	Embalses distribuidos:	1.1 %/mm	1.1 %/mm

La Figura 6 muestra la relación ( $R_r$ )/MAISC. De la comparación, la reforestación se ha mostrado como la más efectiva. Esta medida es relativamente efectiva en condiciones en las que el suelo está seco, además de lograr afectar más áreas productoras de escorrentía que las que pueden afectar los escenarios de embalses (distribuidos y único equivalente) en cabecera. La comparación entre los dos escenarios de embalses, los cuales tienen similar índice MAISC, muestra el mismo efecto de la localización de las medidas. En Salazar et al. (2012) se ha demostrado que la ubicación de los embalses distribuidos es un factor determinante de la efectividad de esta tipología de medidas. En dicha publicación se mostró que para diferentes juegos de embalses distribuidos con similar MAISC, pero diferentes localizaciones, los juegos con localizaciones más cercanas a la desembocadura fueron más efectivos que sus homólogos con localizaciones en cabecera.

## CONCLUSIONES

- La efectividad entendida como el logro del efecto deseado (reducción del riesgo), se ha visto condicionada por varios factores, entre ellos: la variabilidad espacio-temporal de las tormentas, condición de humedad antecedente del suelo (CHAS), magnitud de la avenida, medida de mitigación adoptada en función de su afectación espacial y su grado de afectación en los procesos de producción o propagación de la escorrentía. Los anteriores factores condicionantes son de crucial importancia en la elección de los métodos a utilizar en el análisis de la reducción del riesgo de inundaciones. En esta propuesta, el uso de la integración de métodos, que tienen en cuenta la variabilidad espacio-temporal de las componentes del ciclo hidrológico, ha mostrado ser de gran utilidad y fiabilidad.
- Reducciones en la magnitud de eventos de inundación de alta frecuencia e ineffectividad en los de baja, puede traducirse en reducciones significativas del riesgo, es decir mayor efectividad. Un análisis comparativo de las diferentes medidas propuestas (utilizando la relación efectividad/índice MAISC) ha mostrado una mayor efectividad de la reforestación, debido a que esta medida logra reducir en mayor grado los eventos de menor magnitud y alta frecuencia, lo cual influye directamente en la curva daño-frecuencia.
- A pesar de lograrse reducir en promedio la mitad del DAE, con la implementación de esta tipología de estrategias analizadas, el DAE se mantiene en una magnitud considerable. Este resultado pone de relieve que la intervención exclusiva de la variable peligrosidad no es suficiente para la reducción del riesgo, inclusive para escenarios que conllevan grandes inversiones económicas e impactos ambientales, como los que podrían producir esta tipología de medidas.
- El análisis de la efectividad sobre el riesgo ha brindado una mejor herramienta de análisis, que sólo sobre el caudal máximo (o peligrosidad) como suelo ser habitual en este tipo de estudios. Lo anterior se debe a que se ha podido cuantificar el grado de reducción del riesgo de cada una de las medidas analizadas en la zona inundable, tarea imprescindible en las fases del ciclo de gestión del riesgo de inundaciones.

## AGRADECIMIENTOS

El desarrollo de este trabajo fue financiado por los proyectos Room for the River (CGL2006-27077-E/HID) y Floodmed (CGL2008-06474-C02-02/BTE). Los datos de precipitación y temperatura diarias han sido proporcionados por la AEMET, mientras que los datos hidrometeorológicos cinqueminutales fueron proporcionados por el SAIH de la CHJ.

## REFERENCIAS

- Camarasa A. M., López M. J., Soriano J. 2011. Mapping temporally-variable exposure to flooding in small Mediterranean basins using land-use indicators. *Appl. Geogr.*, 31, 136-145.
- Francés F., Vélez, J. I., Vélez, J. 2007. Split-parameter structure for the automatic calibration of distributed hydrological models. *J. Hydrol.*, 332, 226–240. doi:10.1016/j.jhydrol.2006.06.032.
- Francés F., García-Bartual R., Ortiz E., Salazar S., Blöschl G., Komma J., Habereder C., Bronstert A., Blume T. 2008. CRUE Research Report No I-6. CRUE Funding Initiative on Flood Risk Management Research. <http://www.cruce-eranet.net/> (último acceso: 14 de abril de 2013).
- Salazar S. 2013. Metodología para el análisis y la reducción del riesgo de inundaciones: Aplicación en la Rambla del Poyo (Valencia) usando medidas de "retención de agua en el territorio". Editorial Universitat Politècnica de València, ISBN 978-84-9048-074-8, 362 pp.
- Salazar S., Francés F., Komma J., Blume T., Francke T., Bronstert A., Blöschl G. 2012. A comparative analysis of the effectiveness of flood management measures based on the concept of "retaining water in the landscape" in different European hydro-climatic regions. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12, 3287–3306. doi:10.5194/nhess-12-3287-2012.
- Salón S., García-Bartual R. 2003. A space-time rainfall generator for highly convective Mediterranean rainstorms. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 3, 103–114.
- Valdes J. B., Marco J. B. 1995. Managing reservoirs for flood control. US-Italy Research Workshop on the Hydrometeorology, Impacts, and Management of Extreme Floods. Perugia (Italy). November 1995.