



**Determinación del riesgo de inundación en la ciudad de Salamanca (España)
mediante análisis de peligrosidad, exposición y vulnerabilidad**

*Flood risk determination through hazard, exposure and vulnerability
analysis in the city of Salamanca (Spain)*

Criado, M. ⁽¹⁾; Martínez-Graña, A. ⁽¹⁾; Santos-Francés, F. ⁽²⁾

(1) Departamento de Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de Salamanca. Plaza de los Caídos s/n, 37008, Salamanca, España. Correo: marcocn@usal.es; amgranna@usal.es

(2) Departamento de Edafología, Facultad de Ciencias Agrarias y Ambientales, Universidad de Salamanca. Av. Filiberto Villalobos 119, 37007, Salamanca, España. Correo: fsantos@usal.es

Resumen

La población humana está cada vez más expuesta al riesgo de inundación debido al crecimiento de las ciudades, la expansión de las mismas hacia zonas ribereñas y la mayor incidencia de fenómenos climáticos extremos. Simular estos riesgos será útil para desarrollar acciones preventivas de planificación y ordenación de recursos. En el caso que nos ocupa, se establece un proceso de evaluación de la peligrosidad, exposición y vulnerabilidad de la población y de sus bienes respecto a las inundaciones en el río Tormes en Salamanca, a través de HEC-RAS, HEC-GeoRAS y ArcGis. Se estudiaron cuatro escenarios con períodos de retorno de 5, 50, 100 y 500 años de diferente probabilidad de ocurrencia e intensidad. Se calcularon los caudales de cada periodo, con la extensión, velocidad y profundidad del agua en cada evento, obteniéndose de la profundidad y de la velocidad la peligrosidad. Respecto a la exposición, se identifican las infraestructuras y edificaciones que quedarían anegadas en cada caso, cuantificándose su longitud o número, respectivamente. La vulnerabilidad de los edificios e infraestructuras expuestas está determinada por sus características. La conjunción de los tres factores determina el riesgo de inundación existente.

Palabras clave: riesgo de inundación; exposición; peligrosidad; vulnerabilidad; SIG; cartografía.

Abstract

More and more population is exposed to flood risk due to the increase in urban density, cities expansion through riverside areas and also higher incidence of extreme phenomenons. Then, simulating these risks will be of great help in developing planning and resource management preventive actions. In this case, a process



of evaluation of the danger, exposure and vulnerability of the population and its assets regarding the floods in the Tormes River in Salamanca is established, using as a base the programs HEC-RAS, HEC-GeoRAS and ArcGis. We studied four return periods with different probability of occurrence and intensity, corresponding to 5, 50, 100 and 500 years. The flow rates corresponding to each period were calculated, with the extension, speed and depth that would be achieved in each case. The danger of each event is also obtained from the depth and speed. Regarding the exhibition, the infrastructures and buildings that would be flooded in each case are identified, quantifying their length or number respectively. The vulnerability of the different buildings and infrastructure exposed is determined according to their characteristics. The conjunction of the three factors determines the flood risk.

Key words: flood risk; exposure; hazard; vulnerability; GIS; cartography.

1. Introducción

La población humana cada vez se aglutina más en grandes entornos urbanos, hecho que no parece detenerse (Angel *et al.*, 2011), y en 2050 el 68 % de la población mundial estará concentrada en grandes urbes, frente al 55 % actual, pasando en Europa del 74.4% al 83.7 %, y en España del 80.3 % al 88.0 % (Naciones Unidas, 2018). Luego, es vital incorporar análisis del medio y de los riesgos naturales en la planificación del uso de recursos y en la ordenación territorial, especialmente al delimitar áreas potencialmente urbanizables, con el objetivo de garantizar una mayor protección de la población y sus bienes (Criado *et al.*, 2017) y en el caso de las inundaciones evitar los daños derivados tales como pérdidas humanas, propagación de enfermedades, desalojo de viviendas, lesiones, pérdidas económicas, destrucción de mobiliario o anegación de cosechas (Fedeski y Gwilliam, 2007; Kaźmierczak y Cavan, 2011; Veleda *et al.*, 2017).

El proceso de expansión y aumento de densidad poblacional de las ciudades ha sido más rápido que la promulgación de normativas destinadas a salvaguardar a los ciudadanos de potenciales riesgos, lo que ha provocado una mayor exposición de la población a amenazas naturales (UNISDR, 2011; Martínez-Graña *et al.*, 2016; Mustafa, *et al.*, 2018). Según Walle-macq y Rowena (2018), entre 1998-2017 las inundaciones fueron los riesgos que provocaron un mayor número de desastres (3148

casos, un 43.4% de los desastres registrados), afectando a 2000 millones de personas de las que fallecieron 142088 (un 11% de las muertes totales, solo detrás de las causadas por terremotos, tormentas y temperaturas extremas), y contabilizándose hasta 65600 millones de pérdidas económicas (23% de las pérdidas por desastres naturales, tras tormentas tropicales y terremotos). La tendencia indica un descenso en las pérdidas humanas derivadas de inundaciones debido a la mejora de los sistemas de proyección meteorológica y de alerta, principalmente, aunque se prevén cada vez más número de este tipo de eventos y un aumento en las pérdidas económicas derivadas (Paprotny *et al.*, 2018).

El aumento de fenómenos meteorológicos extremos ligados al calentamiento global provoca un mayor número de inundaciones (IPCC, 2014), aumentando su peligrosidad, y con ello el riesgo al que está expuesta la población (Alfieri *et al.*, 2015; Winsemius *et al.*, 2016; Jenkins *et al.*, 2017). Jongman *et al.* (2014) predicen que en 2050 los eventos de inundaciones extremas se producirán en periodos cada vez más cortos, pasando de 50 a 30 años, mientras que los ciclos de daños se producirán cada 10 años en vez de cada 16. A esta circunstancia, estos autores añaden el incremento previsto del PIB mundial, con lo que su previsión es que la cuantía de los daños aumente, si bien indican que las pérdidas puedan reducirse un 30% si se invierte en medidas de prevención y mitigación. En contraposición a esta situación, se prevé una

disminución del riesgo de inundación en determinadas regiones de zonas frías ya que los modelos indican que el calentamiento global provocará menos acumulación de nieve, por lo que los episodios de deshielo serán de menor entidad (Dankers y Feyen, 2009; Rojas *et al.*, 2012; Vormoor *et al.*, 2016).

Una inundación consiste en el desbordamiento de un río fuera de su cauce natural, provocando el anegamiento temporal de las tierras aledañas (Ayala-Carcedo y Olcina-Cantos, 2002). Por su parte, el riesgo de inundación se corresponde con el conjunto de pérdidas (humanas, económicas, ecológicas...) que se prevén debido a la ocurrencia de un episodio de inundación (Directiva 60/2007/CE). El análisis del riesgo abarca tres fases: análisis de los factores de riesgo (en el que se centra este trabajo); evaluación del riesgo (en las que se estiman las pérdidas); y análisis y diseño de medidas de mitigación del riesgo (Ayala-Carcedo y González-Jiménez, 2006). Generalmente, los gobiernos centran esfuerzos en la gestión de los eventos catastróficos en detrimento de políticas preventivas como el estudio de riesgos, implantación de medidas mitigadoras o inclusión del análisis de riesgos en los estudios de planificación del territorio, encontrándonos cotidianamente con eventos catastróficos que podrían haber sido prevenidos con estos instrumentos (Martínez-Graña *et al.*, 2014; Martínez-Graña *et al.*, 2018).

Los factores de riesgo son: peligrosidad, exposición y vulnerabilidad. El resultado de su conjunción simultánea es precisamente el riesgo (UNDRO, 1999). La peligrosidad se relaciona con la magnitud o severidad y con la frecuencia con la que se manifiesta el evento. A la profundidad y velocidad que alcanza la inundación se denota como magnitud, cuya intensidad dependerá del tiempo de retorno: a mayor retorno (menor frecuencia temporal y, por tanto, menor probabilidad de manifestarse) más intenso será el evento. En cuanto a la exposición, se corresponde con el conjunto de bienes (humanos, materiales, ecológicos, económicos...) que pueden ser dañados por la acción del peligro de acuerdo a su ubica-

ción, y que actualmente debido al desarrollo económico, crecimiento de la población y al cambio climático, está aumentando (de Moel *et al.*, 2011). La exposición de los elementos al riesgo de inundación, se estima según su ubicación, principalmente de acuerdo con su distancia al cauce. Por otro lado, la vulnerabilidad se refiere a la pérdida esperable de un elemento concreto expuesto a la inundación, y depende de las características intrínsecas de cada elemento (Balica *et al.*, 2013; Rufat *et al.*, 2015; Zachos *et al.*, 2017).

El objetivo del presente trabajo es: 1.- analizar el riesgo de inundación provocado por el río Tormes a su paso por el entorno urbano del centro de la ciudad de Salamanca, 2.- delimitar las áreas, infraestructuras y edificaciones que podrían verse afectadas, y 3.-estimar la peligrosidad, exposición y vulnerabilidad existente para cada zona estudiada. Con ello, se podrán identificar las zonas no aptas para urbanizar y elaborarse medidas preventivas y planes de actuación en caso de inundación sobre los elementos vulnerables. Para lograrlo, proponemos un método fácil y de bajo coste basado en el software ArcMap y HEC-RAS que integra en sus fases gran parte de los parámetros involucrados en las inundaciones, y que junto con el uso de datos LIDAR de 1 m de resolución dota al método de mayor precisión (Pistrika *et al.*, 2010; Khattak *et al.*, 2016; Rahmati *et al.*, 2016).

El estudio se ha focalizado en el río Tormes, tributario del Río Duero, a su paso por la ciudad de Salamanca, en concreto en la parte más céntrica y cercana a la zona monumental, incluyendo también la confluencia con el mismo del Arroyo del Zurguén (Fig. 1). El Tormes divide Salamanca en dos mitades, determinando la configuración espacial de la ciudad y su alfoz, en el que habitan unos 200000 habitantes (INE, 2019). El Tormes nace en la Sierra de Gredos y recorre 150 kilómetros hasta Salamanca, drenando una cuenca de 4132 km². Históricamente, ha sido protagonista de múltiples episodios de inundación, teniendo constancia de hasta 35 inundaciones históricas entre los siglos XII-XIX. A mediados del S.

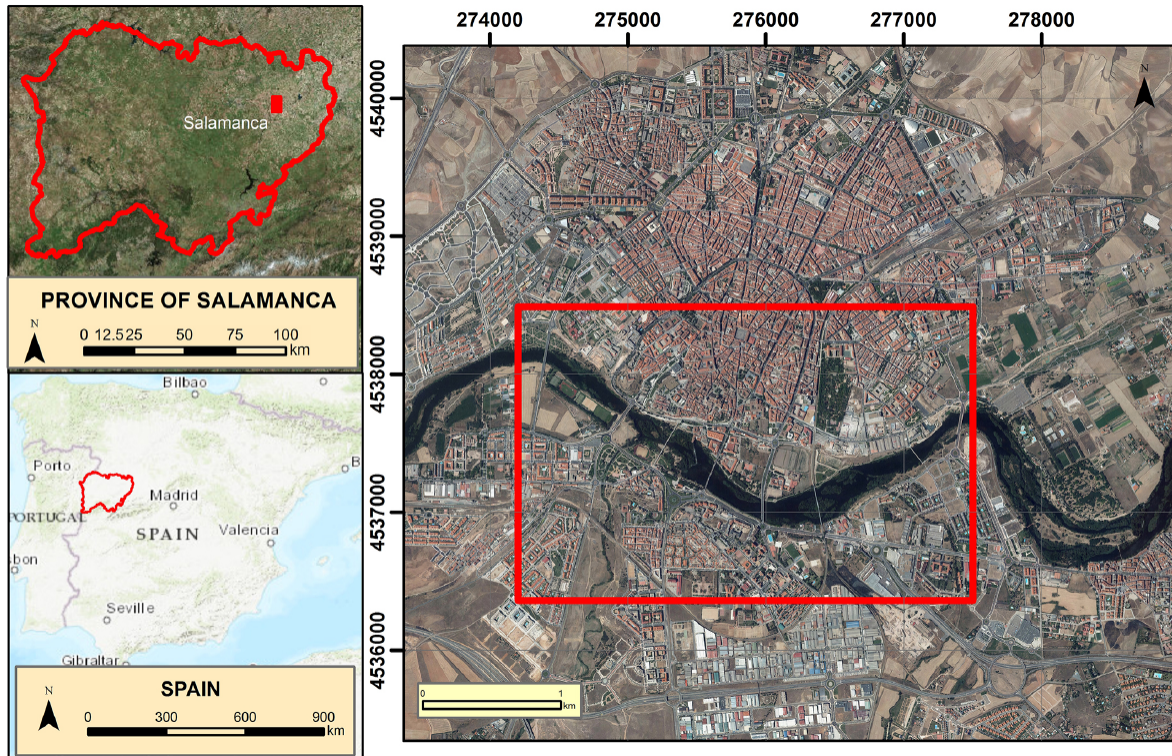


Figura 1. Tramo del río Tormes analizado a su paso por Salamanca.
 Figure 1. Tormes river section analyzed as it passes through Salamanca.

XX, comienza la construcción del embalse de Santa Teresa, que regula el caudal del Tormes, y disminuye la intensidad de las inundaciones. Sin embargo, la posterior expansión de la ciudad de Salamanca a lo largo de las llanuras aluviales del Tormes, hace que sea un buen escenario para el estudio de inundaciones.

2. Datos y metodología

En el trabajo se diferencian dos partes, una inicial basada en la caracterización de la inundación, y que a su vez se subdivide en dos etapas (hidrológica e hidráulica), y una segunda relativa al estudio del riesgo de inundación, con cuatro subfases. Para caracterizar las avenidas, tenemos una fase hidrológica en la que se estiman los caudales de retorno o de diseño máximos que existirán para cada evento o periodo de retorno estudiado, y una fase hidráulica en la que se modeliza la inunda-

ción y se obtiene la evolución de la lámina de agua a lo largo del proceso (extensión, profundidad y velocidad de la misma). A partir de la información de evolución de la lámina de agua, se estima el riesgo de inundación (fase final), previo estudio de los componentes que lo determinan (peligrosidad —subfase 1—; exposición —subfase 2—; y vulnerabilidad —subfase 3—).

Para determinar el riesgo de inundación, se estudian cuatro escenarios de hipotéticas inundaciones, que se corresponden con periodos de retorno de 5 (T5), 50 (T50), 100 (T100), y 500 (T500) años. El T5 se corresponde con episodios de alta probabilidad y baja magnitud, el T50 con aquellos de moderada probabilidad y media intensidad, el T100 con episodios de probabilidad media e intensidad moderada-alta, y el T500 con eventos de baja probabilidad pero muy alta intensidad.

En primer lugar, para el estudio de los caudales de diseño (fase hidrológica), se divide el estudio en tres tramos: tramo del Zurguén, tramo alto del Tormes y tramo bajo del Tormes. Los caudales de diseño del Tormes se obtienen a partir de una serie histórica de caudales anuales máximos registrados entre 1979-2014 en la estación de aforo de Salamanca (Fig. 2). Estos datos son tratados estadísticamente para obtener la media aritmética de la serie con su correspondiente medida de dispersión (desviación típica), y posteriormente, mediante el método Gumbel (Viessman y Lewis, 2003), se determina el caudal máximo para cada T en función de estos estadísticos. Por su parte, para el cálculo de los caudales máximos del Zurguén, debido a la ausencia de estaciones de aforo que arrojen datos de caudales, se emplea una estimación indirecta basada en el método racional (Chow *et al.*, 1988) que utiliza como parámetros la precipitación media máxima diaria para un determinado T, intensidad de la precipitación, coeficiente de escurrimiento del terreno y superficie de la cuenca.

En la parte hidráulica, en primer lugar se modeliza el cauce de los ríos (se delimita el canal principal, orillas, llanura aluvial, puentes, pasarelas, diques...) mediante ArcGis 10.4 y la extensión HEC-GeoRAS, empleando de base un MDT LIDAR de 1 m resolución y una imagen aérea suministradas por el Instituto Geográfico Nacional (IGN, 2018). Posteriormente,

se exporta la tipología del cauce al programa HEC-RAS. HEC-RAS, a partir de los caudales máximos obtenidos para cada escenario, y de la configuración del cauce, simula la extensión, la altura y la velocidad que presentará la lámina de agua en cada lugar en los diferentes T. Finalmente esta información es exportada de nuevo al SIG, y se elabora la cartografía relativa a la extensión, profundidad y velocidad que presenta la lámina de agua en cada escenario.

En relación con el análisis del riesgo de inundación, se analizan los distintos componentes que lo determinan: peligrosidad, exposición y vulnerabilidad. La peligrosidad se obtiene como resultado de combinar la profundidad y la velocidad que alcanza la lámina de agua de cada caso, la exposición se determina delimitando los edificios e infraestructuras afectadas por la inundación de cada escenario, y la vulnerabilidad de cada elemento expuesto se determina a partir del estudio de sus características.

Para determinar la peligrosidad, las capas raster de velocidad y profundidad obtenidas tras el análisis con el programa HEC-RAS, son reclasificadas de manera que se identifican tres rangos de intensidad tanto para velocidad como para profundidad: 1) bajo, si la profundidad es menor a 0,5 m y en el caso de la velocidad, menor a 1 m/s; 2) medio, cuando la profundidad oscila entre 0,5-2 m y la velocidad entre 1-2 m/s; y 3) alto, si la profundidad es mayor a 2 m y la velocidad superior a 2 m/s. Después, los modelos relativos a estas dos magnitudes son multiplicados (velocidad: 1, 2, 3 × profundidad: 1, 2, 3), y los resultados (1, 2, 3, 4, 6, 9) son reclasificados en niveles de alta (9), media (4, 6), y baja magnitud (1, 2, 3). Las zonas de baja peligrosidad no suponen en general afección a bienes, siendo únicamente vulnerables objetos de pequeño tamaño y los vehículos. Las zonas de peligrosidad media y moderada pueden afectar, además, a edificaciones de débil estructura. En las zonas de alta peligrosidad, cualquier tipo de construcción puede verse afectada.

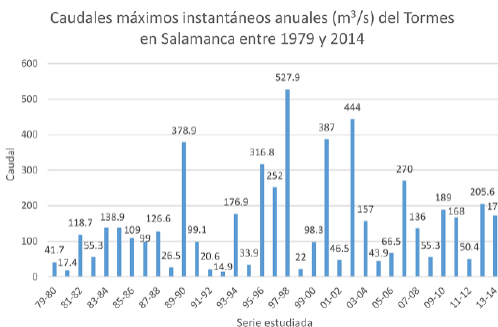


Figura 2. Caudales anuales máximos instantáneos de la serie temporal estudiada.

Figure 2. Maximum instantaneous flow for each year of the studied time interval.

En relación con la exposición de los elementos presentes en la ribera del Tormes, en primer lugar debe obtenerse una cartografía que incluya aquellos elementos que, de acuerdo a su ubicación, potencialmente podrían ser inundados. Del programa SIOSE se obtiene una clasificación de usos del suelo que es refinada a través del análisis de ortofotos y mediante trabajo de campo para precisar mejor los elementos expuestos a los diferentes escenarios, en este caso, vías de comunicación (donde diferenciamos carreteras o viales urbanos, carril bici y caminos no asfaltados) y edificios (se consideran naves agrícolas, casetas de aperos, pisos, adosados, industriales, educativos, deportivos y de tiempo libre y otros tipos). Una vez determinados estos elementos, es preciso averiguar si efectivamente están expuestos a los distintos eventos de inundación, o no. Para ello, la cartografía de peligrosidad para cada periodo de retorno se superpone a la cartografía de elementos expuestos. De esta manera, se identifican las infraestructuras y edificaciones que pueden verse afectadas en cada evento, y si están expuestas a peligrosidad alta, media o baja, dando lugar a exposiciones altas, medias o bajas, respectivamente. A continuación, mediante una operación de análisis espacial del SIG, se estima la longitud de infraestructuras y el número de edificios de cada tipo que serán afectados en cada escenario.

Tras evaluar la exposición, se analiza la vulnerabilidad de los elementos expuestos a inundación. Para insertar el valor de la vulnerabilidad en el análisis del riesgo, se agrupan los diferentes elementos expuestos en categorías

según su tipología y naturaleza constructiva, dando lugar a inmuebles con vulnerabilidad alta, media o baja (Tabla 1). De esta manera, la vulnerabilidad evalúa la respuesta de las edificaciones a la inundación, lo que dependerá de su robustez y resistencia, y en definitiva, de sus características constructivas.

Finalmente, se estima el riesgo de inundación del Tormes a su paso por Salamanca. Para estimar el riesgo final, se combinan las capas correspondientes a peligrosidad, exposición y vulnerabilidad, las cuales se reclasifican en tres niveles (Alto=3, Medio=2, Bajo=1) de acuerdo con la fórmula de estimación del riesgo (Ec. 1). Como resultado de la multiplicación, se obtienen valores de 1, 2, 3, 4, 6, 8, 9, 12, 18 y 27 unidades, que se reclasifican, dando lugar a categorías de riesgo de inundación: muy bajo (1 y 2 unidades), baja (3 y 4), media (6 y 8), alta (9 y 12) y muy alta (18 y 27).

Riesgo = Peligrosidad x Exposición x Vulnerabilidad Ec. 1

3. Resultados

3.1. Caudales de retorno estimados y modelización de la avenida

Para modelar las inundaciones en cada escenario, se determinan mediante el programa HEC-RAS la extensión de la lámina de agua, y su profundidad y velocidad. Previamente, deben insertarse los caudales de retorno correspondientes (Tabla 2) que estimamos a partir del método Gumbel y empleando los estadís-

Tabla 1. Tipos de elementos expuestos a las inundaciones y vulnerabilidad que presentan.

Table 1. Elements exposed to floods and related vulnerability.

Tipos de elementos expuestos		Vulnerabilidad
Infraestructura vial	Carreteras	Media
	Carril bici y caminos	Alta
Edificios	Pisos, adosados, industriales, educativos, deportivos y de tiempo libre y otros	Media
	Agroganaderos y casetas de aperos	Alta

Tabla 2. Caudales de diseño (m^3/s) para cada tramo en cada periodo de retorno.Table 2. Design flows (m^3/s) for each section in the different return periods.

Periodo de retorno (T, en años)	Tramo		
	Tormes I	Zurguén	Tormes II
T = 5	217,3	106,3	323,6
T = 50	524,4	187,9	712,3
T = 100	635,2	220,1	855,3
T = 500	926,0	307,6	1233,6

ticos de la serie histórica de caudales utilizados como datos (Media aritmética = 148,70 y desviación típica = 129,97). HEC-RAS simula la transición de estos caudales por el cauce, y la información resultante es procesada con el SIG y se obtienen las cartografías de profundidad (Fig. 3) y de velocidad (Fig. 4) de la lámina de agua para los periodos de retorno de 5, 50, 100 y 500 años. Obviamente, las mayores profundidades se alcanzan en las zonas correspondientes al cauce del río, similar a lo que ocurre con la velocidad, si bien esta pue-

de variar según la profundidad y el tipo de superficie (rugosidad del terreno) sobre la que discorra el agua en cada momento.

3.2. Peligrosidad

La probabilidad de que las diferentes zonas aledañas al cauce del Tormes se inundan depende de la intensidad del evento en cuestión. Las orillas y espacios inmediatos al río presentan mayores probabilidades, mientras que en

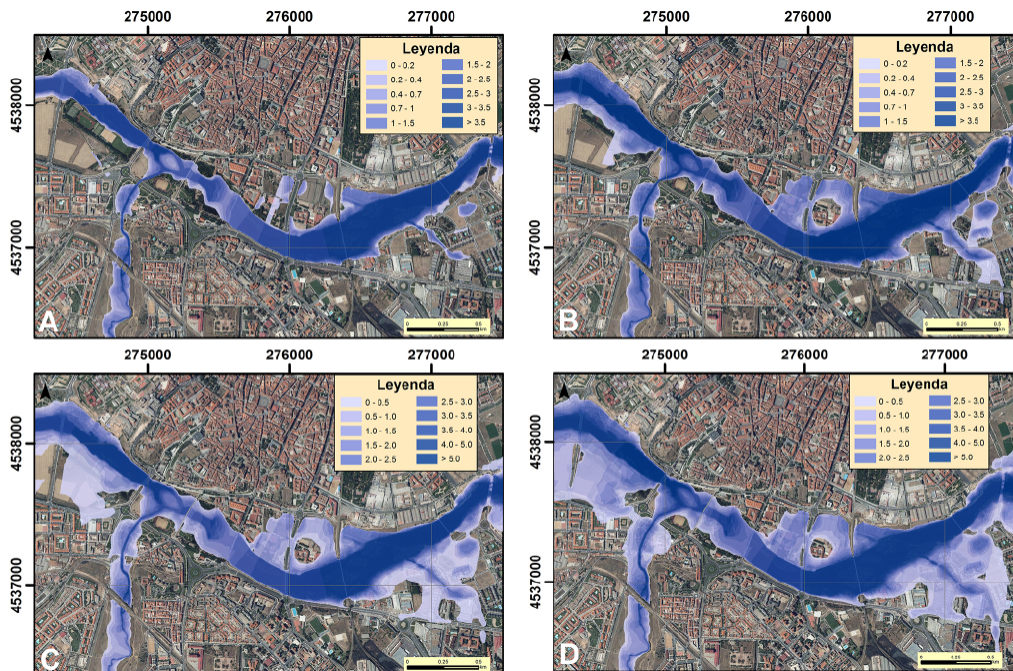


Figura 3. Profundidad del agua (m) en periodos de: A) T = 5 años; B) T = 50 a; C) T = 100 a; D) T = 500 a.

Figure 3. Water depth (m) in return period of: A) T = 5 years; B) T = 50 y; C) T = 100 y; D) T = 500 y.

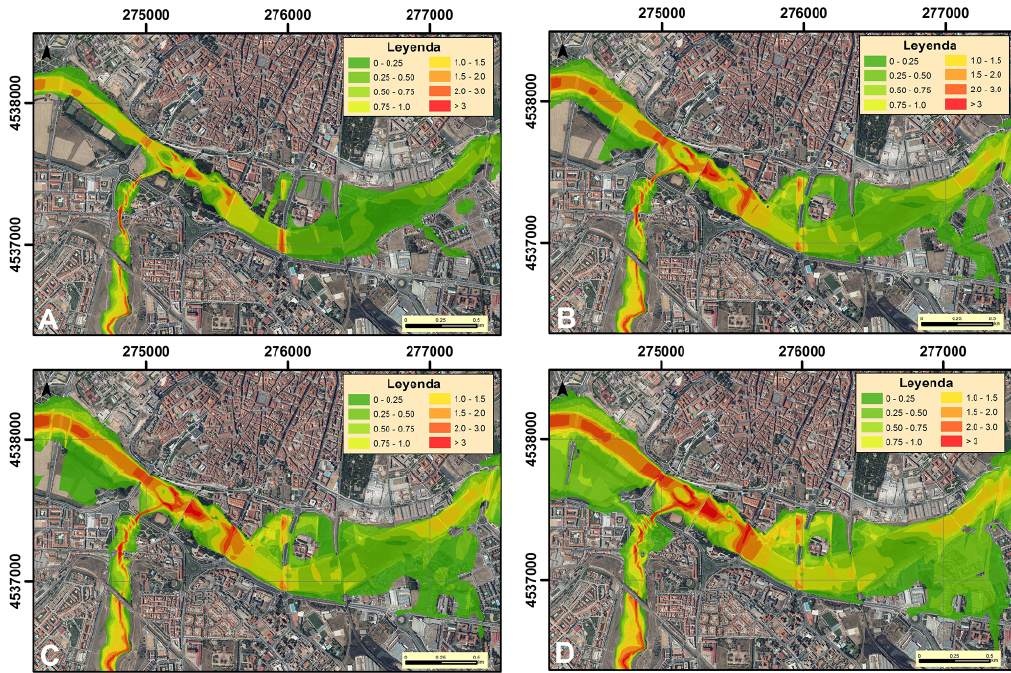


Figura 4. Velocidad del agua (m/s) en diferentes escenarios: A) T = 5 años; B) T = 100 a; C) T = 500 a; D) T = 500 a.

Figure 4. Water speed (m/s) for the different cases: A) T = 5 years; B) T = 50 y; C) T = 100 y; D) T = 500 y.

las más alejadas la probabilidad es menor al requerir la ocurrencia de un evento de mayor energía (Fig. 5). En lo referente a la magnitud, es siempre más elevada en las zonas cercanas al cauce, ya que la profundidad y la velocidad son más elevadas. La magnitud es menor en las llanuras de inundación, si bien en los even-

tos de mayor periodo de retorno se observa que las zonas de alta y media magnitud aumentan y se expanden hacia estas.

A partir de las magnitudes y probabilidades estudiadas, se realizan mapas de peligrosidad para cada periodo de retorno estudiado (Fig. 6). Estos mapas indican el peligro existente en cada escenario tanto para los diferentes bienes materiales como para las personas. El riesgo hacia las personas se corresponde con aquellas zonas de alta y media peligrosidad, si bien puede variar según las características del individuo en cuestión. Por su parte, la afección a los bienes se divide en tres intervalos coincidentes con los de la peligrosidad: bajo, que supone peligro para vehículos y elementos ligeros; medio, donde las construcciones débiles e inestables podrían sucumbir; y alto, donde todas las edificaciones e infraestructuras pueden verse dañadas. Como se observa en la cartografía, la mayor peligrosidad se da en zonas anejas al cauce, siendo generalmente media

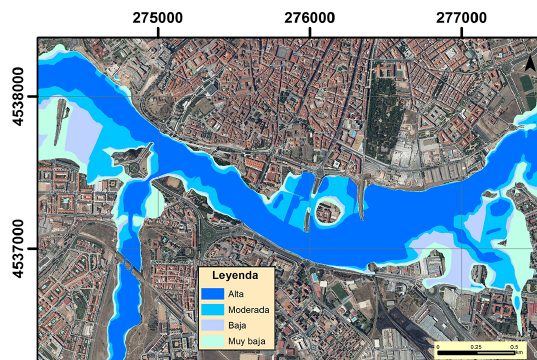


Figura 5. Probabilidad de inundación de las riberas del Tormes.

Figure 5. Flood probability of the areas surrounding the river.

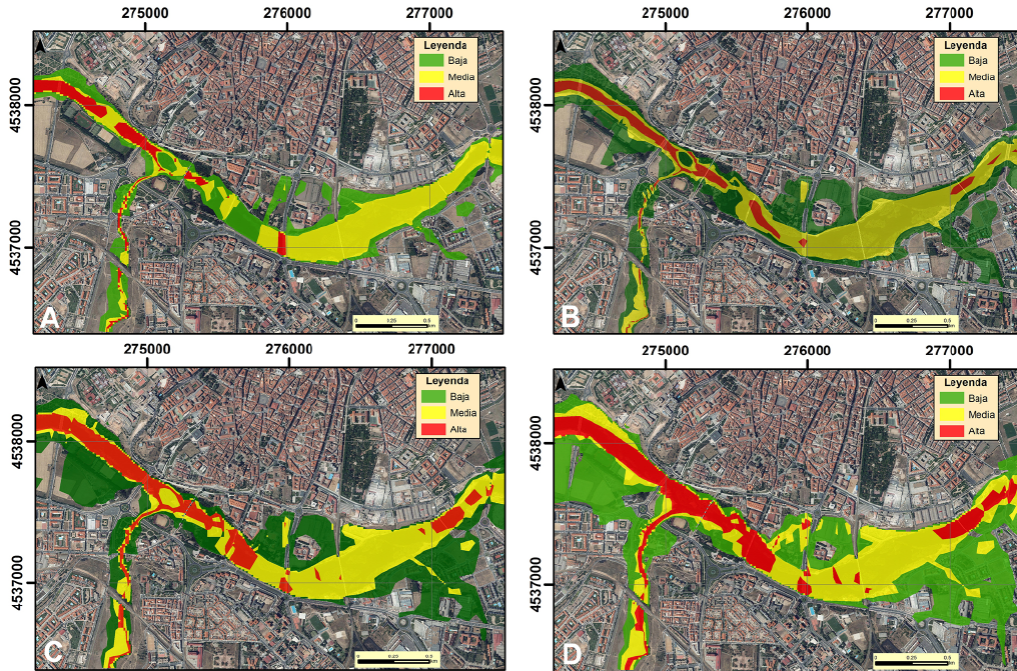


Figura 6. Peligrosidad estimada en cada periodo de retorno: A) $T = 5$ años; B) $T = 100$ a; C) $T = 500$ a; D) $T = 500$ a.

Figure 6. Estimated hazard in each return period: A) $T = 5$ years; B) $T = 50$ y; C) $T = 100$ y; D) $T = 500$ y.

o baja en zonas de la llanura aluvial, lo que es debido a la amplitud de la llanura aluvial del Tormes, que permite expandirse mucho a la lámina de agua.

3.3. Exposición de elementos

La exposición de infraestructuras y edificaciones relativa a cada escenario (Fig. 7) fue cuantificada al determinar la longitud de tramos de infraestructuras afectados (Tabla 3) y al contabilizar el número de tipos de edificaciones vulnerables (Tabla 4). En relación con las vías de comunicación, las carreteras son las más afectadas en su conjunto, sin embargo, en el carril bici y los caminos, el porcentaje de tramos afectados por exposiciones altas y medias es mayor, debido a su predominio en zonas cercanas al cauce. En lo relativo a los diferentes tipos de edificaciones, no se identificó ninguna en las zonas de alta exposición. No obstante, son frecuentes en zonas de media y baja exposición, especialmente edificio-

nes situadas en urbanizaciones de cierto nivel adquisitivo (adosados). En zonas del extrarradio cercanas al río también son habituales las viviendas unifamiliares, junto con pequeñas huertas, así como invernaderos, naves agrícolas y ganaderas y casetas de herramientas, siendo menor esta presencia en el área de estudio debido a su céntrica posición. Los pisos, y edificios de educación e industriales son poco habituales a orillas del Tormes. Las edificaciones catalogadas como "Otras" generalmente se refieren a inmuebles abandonados, o bien que presentan otras características que no les permiten ser clasificados en otra categoría al no ser representativos.

3.4. Vulnerabilidad

La vulnerabilidad varía en función de las características de cada tipo de edificación, por lo que los edificios más vulnerables son aquellos destinados a albergar aperos agrícolas y herramientas, relacionados todos

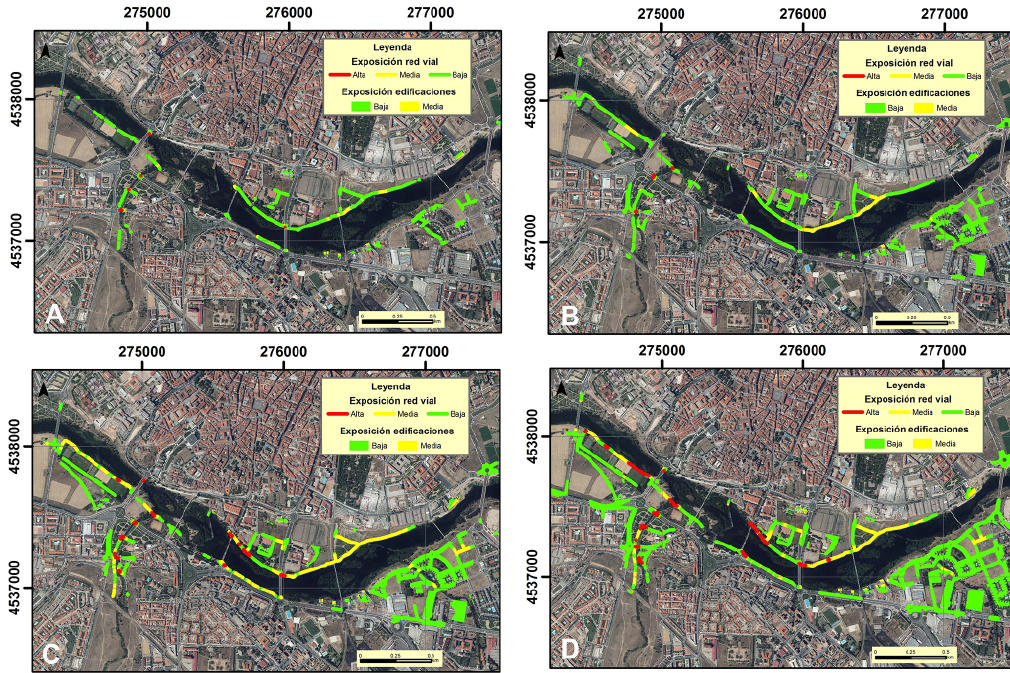


Figura 7. Exposición de los elementos estudiados en: A) T = 5 años; B) T = 50 a; C) T = 100 a; D) T = 500 a.
 Figure 7. Exposure of the studied elements in: A) T = 5 years; B) T = 50 y; C) T = 100 y; D) T = 500 y.

ellos con usos agrícolas y ganaderos. El resto de edificaciones se podrían considerar de vulnerabilidad baja-media, debido a su estructura más robusta, pero debido a que suelen ser lugares con presencia humana frecuente, son consideradas de vulnerabilidad media (Fig. 8).

3.5. Riesgo de inundación

Respecto al riesgo de inundación final (Fig. 9), las zonas de mayor riesgo (riesgo muy alto) abarcan una superficie de 46,01 ha, y se corresponden con las zonas de mayor peligrosidad, exposición y vulnerabilidad, mayorita-

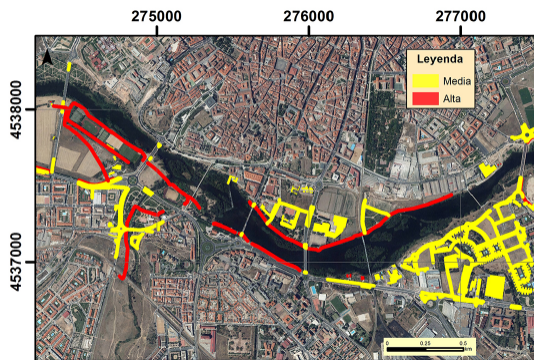


Figura 8. Vulnerabilidad de los elementos expuestos a las inundaciones.
 Figure 8. Vulnerability of elements exposed to floods

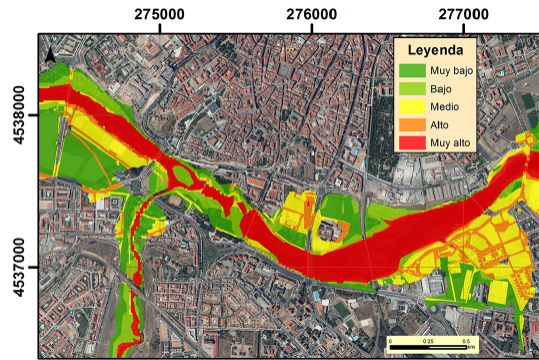


Figura 9. Riesgo de inundación estimado en el área de estudio.
 Figure 9. Flood risk estimated in the study area.

Tabla 3. Impacto (A —alto—; M —medio—; B —bajo—) de las inundaciones (km) en las infraestructuras viarias en cada episodio.

Table 3. Impact of floods (km) on different types of urban roads in each scenario (A —high—; M —medium—; B —low—).

Afección red vial	T = 5 años			T = 50 años			T = 100 años			T = 500 años		
	A	M	B	A	M	B	A	M	B	A	M	B
Carretera	0,02	0,07	1,54	0,02	0,30	4,51	0,06	0,58	6,95	0,14	1,08	11,82
Carril bici	-	0,45	1,49	0,01	0,94	1,74	0,18	1,39	1,16	0,36	1,71	1,77
Caminos	-	-	0,27	-	0,18	0,97	0,02	0,03	1,42	0,21	0,34	1,42
Total	0,02	0,52	3,30	0,03	1,44	7,22	0,26	2,00	9,53	0,71	3,11	15,01
	3,84			8,69			11,79			18,83		

Tabla 4. Número de edificios afectados según su tipología en los distintos escenarios (Impacto A —alto—; M —medio—; B —bajo—).

Table 4. Number of affected buildings according to their typology in the different scenarios (Impact A —high—; M —medium—; B —low—).

Afección edificios	T = 5 años			T = 50 años			T = 100 años			T = 500 años		
	A	M	B	A	M	B	A	M	B	A	M	B
Pisos	-	-	-	-	-	2	-	-	2	-	-	3
Adosados	-	1	11	-	1	46	-	1	55	-	1	94
Agroganadero	-	4	4	-	4	4	-	4	2	-	4	2
Caseta de aperos	-	2	1	-	2	2	-	2	1	-	3	1
Industrial	-	-	3	-	1	6	-	1	7	-	3	9
Educativo	-	-	8	-	2	9	-	2	9	-	6	5
Deportivo y ocio	-	-	2	-	-	5	-	1	5	-	3	6
Otros	-	1	2	-	2	9	-	2	11	-	2	12
Total	-	8	31	-		83	-	13	92	-	22	132
	39						105			154		

riamente ligadas al cauce del Tormes y zonas cercanas. Con riesgo alto encontramos aquellos elementos más expuestos y vulnerables a la inundación, que agrupan a parte de las vías de comunicación y a la mayoría de edificaciones, contabilizándose una extensión de 24,15 ha. Con riesgo moderado y un área de 45,12 ha, aparecen el resto de elementos expuestos, especialmente vías de comunicación, y las áreas circundantes a los mismos, especialmente aquellas zonas cuyo uso del suelo principal es el de albergar edificaciones, infraestructuras y servicios de distinto tipo. Con riesgos de inundación bajos y muy bajos

se catalogan el resto de extensiones (abarcando áreas de 21,33 ha y 54,60 ha, respectivamente) que se corresponden con zonas de la llanura de inundación del Tormes, generalmente alejadas del cauce, y en las cuales la actividad antrópica es baja, destacando las actividades agrícolas, si bien también aparecen pastizales, eriales o bosquetes de galería.

4. Discusión de los resultados

Los resultados obtenidos muestran los impactos que ocurrirán en la ribera del Tormes

a su paso por el centro de Salamanca en los diferentes escenarios simulados. Con el mapeo de riesgos, en primer lugar, se puede llevar a cabo una mejor gestión de los usos de la tierra en la zona ribereña, lo que se relaciona con dos conceptos: 1) mayor facilidad para que los planificadores limiten ciertas actividades o usos en las áreas expuestas al riesgo, si bien dependiendo del grado del riesgo, se pueden desarrollar actividades o usos compatibles con cada nivel de riesgo; y 2) mayor seguridad al permitir a los planificadores asignar usos del suelo de áreas cercanas al río pero no afectadas por riesgo de inundación.

La forma en que los resultados han sido expuestos ha sido mediante la cartografía de inundaciones, formato mapa, siendo este aspecto criticado por algunos autores que afirman la ineficiencia de esta cartografía debido a que no es estimada por los planificadores. Alternativamente, estos autores sugieren que la información sobre riesgos de inundación debe presentarse en imágenes reales y concretas en 2D y 3D, más atractivas y realistas (Leskens *et al.*, 2017), lo que, por otro lado, se puede lograr a través de la metodología propuesta, empleando las capas generadas y las imágenes en 2D, 3D y la herramienta "Vuelo de ArcGis" para su diseño. Otros autores realizan estudios en áreas específicas, utilizando escalas muy grandes, mejorando aún más los niveles de precisión (Ernst *et al.*, 2010). Macchione *et al.*, (2019) sostienen que la potencial utilización de la información sobre la inundación por parte de los gobiernos y los planificadores se debe más a la forma en que se intercambia la información con los planificadores que a la calidad del trabajo, por lo que se han propuesto sesiones de trabajo interactivas de investigadores y planificadores e integrar en el análisis otras características como las demandas de los grupos sociales afectados (Leskens *et al.*, 2014).

En cuanto al método empleado, aunque se basa en procedimientos clásicos, pero de reconocida solvencia, incluye nuevos elementos que permiten mejorar los resultados, como es el caso del programa Hec-GeoRas, que se implementa en el SIG, provocando una des-

cripción topográfica de las áreas inundadas más precisa debido a la resolución de 1 m del LIDAR (Costabile *et al.*, 2015), por lo que con ello también mejora la precisión del modelo (Shen *et al.*, 2015). Además, las diferentes barreras artificiales existentes en el río (como el caso de diques o puentes) se implementan en el modelo, de manera que aumenta la sensibilidad del mismo. Esta evaluación de la implementación de infraestructura se puede utilizar para estudiar el posible impacto que una infraestructura de un proyecto tendría en las inundaciones en una determinada llanura de inundación. También, es posible identificar aquellas infraestructuras que están más expuestas al riesgo, pudiéndose diseñar medidas de gestión preventivas.

5. Conclusiones

Los riesgos naturales causan grandes pérdidas para la sociedad, tanto en términos humanos como socioeconómicos, siendo las inundaciones uno de los riesgos que causan mayor impacto. El procedimiento seguido en este trabajo pretende instituirse como una herramienta de apoyo que facilite la protección adecuada de la población urbana y el manejo correcto del territorio y la tierra, así como el adecuado mantenimiento de los recursos socioeconómicos.

La metodología utilizada para la evaluación del riesgo de inundación es de fácil aplicación, rápida y económica, además de ser robusta y precisa en la caracterización topográfica de las áreas inundadas debido al uso de la información espacial de alta resolución y al diseño e implementación en el modelo de todos los elementos antrópicos ubicados en el canal que afectan la evolución de la inundación. La topografía y la estimación de los flujos de retornos permiten simular adecuadamente las características de la inundación en cada evento, lo que significa que el riesgo del evento se puede evaluar de manera efectiva. Con respecto a la exposición de los diferentes elementos, el método permite ahorrar recursos al analizar únicamente la exposición de aquellos expues-

tos al peligro, evaluándose también su vulnerabilidad. Por lo tanto, el método empleado en este trabajo se considera amplio y válido, ya que toma en cuenta varios factores involucrados en el análisis de riesgo y no se basa en análisis individualizados de cada factor. Respecto a la estimación de los caudales de retorno, el uso del caudal aforado reduce el error y aumenta la precisión. Definitivamente, es un método ad hoc, en el que se pueden simular multitud de casos debido a los parámetros e infraestructuras que se pueden diseñar y tomar en cuenta en el procedimiento, por lo que puede ser implementado en otras áreas. Por otro lado, puede emplearse con fines preventivos, ya que permite el diseño de escenarios posteriores a la instalación en el entorno fluvial de nuevos elementos que interfieren en la evolución de las inundaciones.

En la zona estudiada existen muchas edificaciones y una gran infraestructura que podría estar expuesta a las inundaciones porque están ubicadas en la llanura aluvial del río. Por esta razón, la metodología empleada proporciona la base y los criterios para que las autoridades y los gobiernos puedan regular el uso de la tierra y limitar la actividad humana en las planicies aluviales mediante una planificación territorial adecuada. Además, la existencia de esta cartografía de riesgo permitirá un mejor manejo de aquellas áreas de llanuras de inundación que no están afectadas por el riesgo de inundación. Debido a la integración de MDT LIDAR y ArcGis en el modelo, se podría generar información muy creativa, concreta y real con respecto a los episodios de la inundación, para lograr un mayor impacto en el receptor. Además, la cuantificación de los daños esperados para futuros eventos de inundación en diferentes escenarios será posible, y también permite la elaboración de planes de acción y medidas de mitigación de riesgos en áreas con edificios e infraestructuras vulnerables y expuestas.

Agradecimientos

Esta investigación ha contado con la ayuda del proyecto de la Junta Castilla y León

SA044G18.

Bibliografía

- Alfieri, L.; Burek, P.; Feyen, L.; Forzieri, G. (2015). Global warming increases the frequency of river floods in Europe. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19, 2247–2260. <https://doi.org/10.5194/hess-19-2247-2015>
- Angel, S.; Parent, J.; Civco, D.L.; Blei, A.; Potere, D. (2011). The dimensions of global urban expansion: Estimates and projections for all countries, 2000–2050. *Progress in Planning*, 75, 53–107. <https://doi.org/10.1016/j.progress.2011.04.001>
- Ayala-Carcedo, F. J.; Olcina-Cantos, J. O. (2002). *Riesgos naturales*. Ariel.
- Ayala-Carcedo, F. J.; González-Jiménez, Á. G. (2007). *Una aproximación al análisis de riesgo. Riesgos naturales y desarrollo sostenible: impacto, predicción y mitigación*, IGME (10), 19.
- Balica, S.F.; Popescu, I.; Beevers, L.; Wright, N.G. (2013). Parametric and physically based modelling techniques for flood risk and vulnerability assessment: A comparison. *Environmental Modelling & Software*, 41, 84–92. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.11.002>
- Chow, V.T.; D.R. Maidment y L.W. Mays (1988). *Hidrología aplicada*. McGraw-Hill, 584 pp.
- Costabile, P.; Macchione, F.; Natale, L.; Petaccia, G. (2015). Flood mapping using LIDAR DEM. Limitations of the 1-D modeling highlighted by the 2-D approach. *Natural Hazards*, 77, 181–204. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1606-0>
- Criado, M.; Martínez-Graña, A.; Santos-Francés, F.; Veleza, S.; Zazo, C. (2017). Multi-Criteria Analyses of Urban Planning for City Expansion: A Case Study of Zamora, Spain. *Sustainability*, 9, 1850. <https://doi.org/10.3390/su9101850>
- Dankers, R.; Feyen, L. (2009). Flood hazard in Europe in an ensemble of regional climate scenarios. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114, D16. <https://doi.org/10.1029/2008JD011523>
- De Moel, H.; Aerts, J.C.; Koomen, E. (2011). Development of flood exposure in the Netherlands during the 20th and 21st century. *Global Environmental Change*, 21, 620–627. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2010.12.005>
- Directiva 60/2007/CE—Comisión europea del Parlamento Europeo: Bruselas, Bélgica, 2007; p. 23.

- Ernst, J.; Dewals, B.J.; Detrembleur, S.; Archambeau, P.; Erpicum, S.; Piroton, M. (2010) Micro-scale flood risk analysis based on detailed 2D hydraulic modelling and high resolution geographic data. *Natural Hazards*, 55, 181–209. <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9520-y>
- Fedeski, M.; Gwilliam, J. (2007). Urban sustainability in the presence of flood and geological hazards: The development of a GIS-based vulnerability and risk assessment methodology. *Landscape and Urban Planning*, 83, 50–61. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2007.05.012>
- IGN (2018). Instituto Geográfico Nacional. Centro de descargas. Disponible en web (Consultado el 29 de diciembre de 2018): <http://centrodescargas.cnig.es/CentroDescargas/>
- INE (2019). Instituto Nacional de Estadística. Disponible en web (Consultado el 9 de enero de 2019): https://www.ine.es/dyngs/INEbase/es/operacion.htm?c=Estadistica_C&cid=1254736177011&menu=resultados&idp=1254734710990
- IPCC (2014). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; Barros, V.R.; Field, C.B.; Dokke, D.J.; Mastrandrea, M.D.; Mach, K.J.; Bilir, T.E.; Chatterjee, M.; Ebi, K.L.; Estrada, Y.O.; Genova, R.C.; Girma, B.; Kissel, E.S.; Levy, A.N.; MacCracken, S.; Mastrandrea, P.R.; White, L.L. Eds.; Cambridge University Press: Cambridge, UK; New York, NY, USA, 2014; 688p.
- Jenkins, K.; Surminski, S.; Hall, J.; Crick, F. (2017). Assessing surface water flood risk and management strategies under future climate change: Insights from an Agent-Based Model. *Science of the Total Environment*, 595, 159–168. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.242>
- Jongman, B.; Hochrainer-Stigler, S.; Feyen, L.; Aerts, J.C.; Mechler, R.; Botzen, W.W.; Bouwer, L.M.; Pflug, G.; Rojas, R.; Ward, P.J. (2014). Increasing stress on disaster-risk finance due to large floods. *Nature Climate Change*, 4, 264. <https://doi.org/10.1038/nclimate2124>
- Khattak, M.S.; Anwar, F.; Saeed, T.U.; Sharif, M.; Sheraz, K.; Ahmed, A. (2016). Floodplain mapping using HEC-RAS and ArcGIS: A case study of Kabul River. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41, 1375–1390. <https://doi.org/10.1007/s13369-015-1915-3>
- Kaźmierczak, A.; Cavan, G. (2011). Surface water flooding risk to urban communities: Analysis of vulnerability, hazard and exposure. *Landscape and Urban Planning*, 103, 185–197. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.07.008>
- Leskens, J.G.; Brugnach, M.; Hoekstra, A.Y.; Schuurmans, W. (2014). Why are decisions in flood disaster management so poorly supported by information from flood models? *Environmental Modelling & Software*, 53, 53–61. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.11.003>
- Leskens, J.G.; Kehl, C.; Tutenel, T.; Kol, T.; De Haan, G.; Stelling, G.; Eisemann, E. (2017). An interactive simulation and visualization tool for flood analysis usable for practitioners. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 22, 307–324. <https://doi.org/10.1007/s11027-015-9651-2>
- Macchione, F.; Costabile, P.; Costanzo, C.; De Santis, R. (2019). Moving to 3-D flood hazard maps for enhancing risk communication. *Environmental Modelling & Software*, 111, 510–522. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.11.005>
- Martínez-Graña, A.; Goy, J.L.; De Bustamante, I.; Zazo, C. (2014). Characterization of environmental impact on resources, using strategic assessment of environmental impact and management of natural spaces of “Las Batuecas-Sierra de Francia” and “Quilamas” (Salamanca, Spain). *Environmental Earth Sciences*, 71, 39–51. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2692-5>
- Martínez-Graña, A.; Goy, J.L.; Zazo, C. (2016). Geomorphological applications for susceptibility mapping of landslides in natural parks. *Environmental Engineering and Management Journal*. Volume 15, Issue 2, 327-338. <https://doi.org/10.30638/eemj.2016.033>
- Martínez-Graña, A.; Bajo, I.; González-Delgado, J.A.; Cárdenas-Carretero, J.; Abad, M.; Legoinha, P. (2018). G Virtual 3D Tour Applied to the Paleontological Heritage of the Neogene of Sevilla (Guadalquivir Basin, Spain). *Geoheritage*. Volume 10, Issue 3, 473-482. <https://doi.org/10.1007/s12371-017-0247-y>
- Mustafa, A.; Bruwier, M.; Archambeau, P.; Erpicum, S.; Piroton, M.; Dewals, B.; Teller, J. (2018). Effects of spatial planning on future flood risks in urban environments. *Journal of Environmental Management*, 225, 193–204. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.07.090>
- Naciones Unidas (2018). Disponible en web (Consultado el 11 de enero de 2019): <https://www.un.org/development/desa/es/news/>

- population/2018-world-urbanization-prospects.html
- Paprotny, D.; Sebastian, A.; Morales-Nápoles, O.; Jonkman, S.N. (2018). Trends in flood losses in Europe over the past 150 years. *Nature Communications*, 9, 1985. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04253-1>
- Pistrika, A. (2010) Flood damage estimation based on flood simulation scenarios and a GIS platform. *European Water*, 30, 3–11.
- Rahmati, O.; Zeinivand, H.; Besharat, M. (2016). Flood hazard zoning in Yasooj region, Iran, using GIS and multi-criteria decision analysis. *Geomatics Natural Hazards & Risk*, 7, 1000–1017. <https://doi.org/10.1080/19475705.2015.1045043>
- Rojas, R.; Feyen, L.; Bianchi, A.; Dosio, A. (2012). Assessment of future flood hazard in Europe using a large ensemble of bias-corrected regional climate simulations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117, D17. <https://doi.org/10.1029/2012JD017461>
- Rufat, S.; Tate, E.; Burton, C.G.; Maroof, A.S. (2015). Social vulnerability to floods: Review of case studies and implications for measurement. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 14, 470–486. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2015.09.013>
- Shen, D.; Wang, J.; Cheng, X.; Rui, Y.; Ye, S. (2015). Integration of 2-D hydraulic model and high-resolution lidar-derived DEM for floodplain flow modeling. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19, 3605-3616. <https://doi.org/10.5194/hess-19-3605-2015>
- UNDRO. Mitigating Natural Disasters; Phenomena, Effects and Options United Nations: New York, NY, USA, 1991.
- UNISDR. Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction (2011). *Revealing Risk, Redefining Development. Summary and Main Findings*; United Nations: New York, NY, USA, 2011.
- Veleda, S.; Martínez-Graña, A.; Santos-Francés, F.; Sánchez-San Roman, J.; Criado, M. (2017). Analysis of the Hazard, Vulnerability and Exposure to the Risk of Flooding (Alba de Yeltes, Salamanca, Spain). *Applied Sciences*, 7, 157. <https://doi.org/10.3390/app7020157>
- Viessman, W.; Lewis, G.L. (2003). *Introduction to Hydrology*. Prentice-Hall, 612 pp.
- Vormoor, K.; Lawrence, D.; Schlichting, L.; Wilson, D.; Wong, W.K. (2016). Evidence for changes in the magnitude and frequency of observed rainfall vs. snowmelt driven floods in Norway. *Journal of Hydrology*, 538, 33–48. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.03.066>
- Wallemacq, P.; Rowena, H. (2018). *Economic losses, poverty and disasters (1998-2017)*. United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNISDR) and Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CREED). 31 p.
- Winsemius, H.C.; Aerts, J.C.; Van Beek, L.P.; Bierkens, M.F.; Bouwman, A.; Jongman, B.; Ward, P.J. (2016). Global drivers of future river flood risk. *Nature Climate Change*, 6, 381. <https://doi.org/10.1038/nclimate2893>
- Zachos, L.G.; Swann, C.T.; Altınakar, M.S.; McGrath, M.Z.; Thomas, D. (2016). Flood vulnerability indices and emergency management planning in the Yazoo Basin, Mississippi. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 18, 89-99. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2016.03.012>

Recibido el 29 de enero de 2019
 Aceptado el 18 de mayo de 2019

