

# Reconstrucción paleohidráulica de caudal, escorrentía y precipitación durante inundaciones torrenciales en una pequeña subcuenca del río Guadalquivir

del Moral-Erencia, J.D.<sup>a1</sup> y Bohorquez, P.<sup>a2</sup>

<sup>a</sup>Área de Mecánica de Fluidos, Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera, CEA Tierra, Universidad de Jaén, Campus de Las Lagunillas, 23071, Jaén. E-mail: <sup>a1</sup>jd moral@ujaen.es, <sup>a2</sup>patricio.bohorquez@ujaen.es.

Línea temática M | Tema monográfico

---

## RESUMEN

El presente trabajo analiza la inundación repentina ocurrida en la cuenca del Arroyo de Ibros en el año 2009. En primer lugar, se realiza una reconstrucción paleohidrológica de dicho evento mediante la combinación del uso de paleohidrología y modelización bidimensional. Posteriormente, se efectúa una estimación de la intensidad de precipitación en diferentes sectores de la cuenca de drenaje y se reconstruye el desarrollo del proceso de inundación a través del módulo de procesos hidrológicos distribuido del software IBER y se analizan las causas. La inundación torrencial del año 2009 fue un evento extraordinario en la cuenca de estudio dada la magnitud de los daños producidos, el caudal generado, superior a  $150 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ; y la alta precipitación registrada. La combinación de procesos de cambio climático, alta pendiente y prácticas agrícolas inadecuadas provocan un incremento del caudal y de la carga sedimentaria que están incrementando el riesgo por inundación y la activación de procesos geomorfológicos como, por ejemplo, la degradación y migración del cauce.

**Palabras clave** | inundación repentina; reconstrucción paleohidrológica; estimación de precipitación; simulación bidimensional; erosión hídrica.

---

## INTRODUCCIÓN

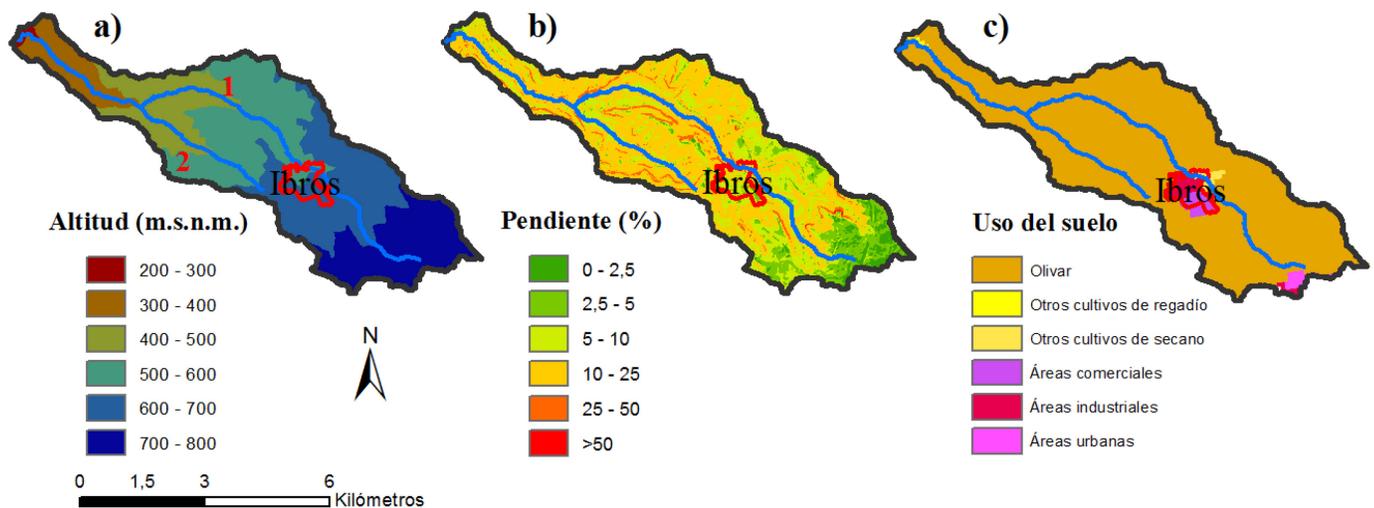
En el presente trabajo se realiza un análisis de la inundación torrencial de mayor magnitud observada en la cuenca del Arroyo de Ibros (Ibros, Jaén) entre los años 1997 y 2011, correspondiente al día 16 de septiembre del 2009. En este período se produjeron tres inundaciones de gran magnitud, ocurridas en 1997, 2009 y 2011. En el registro histórico de inundaciones no existen eventos de tal magnitud. El evento de mayor importancia (2009) causó una víctima mortal en Ibros y daños materiales superiores al millón de euros en la cuenca de drenaje, concentrándose mayoritariamente en la localidad de Ibros, aunque se extendieron a infraestructuras y explotaciones agrícolas situadas próximas al cauce.

Se plantea como objetivo principal la reconstrucción paleohidrológica de los parámetros de inundación más significativos (calado, caudal o velocidad de flujo) mediante el uso de paleoindicadores de inundación (Bohórquez, 2016; Bohórquez y del Moral-Erencia, 2017) y simulaciones bidimensionales con el software IBER 2.4.3 (Cea y Bladé, 2015). Como objetivos específicos se establece la estimación de la intensidad de precipitación en diferentes localizaciones de la cuenca para dicho evento y su posterior reconstrucción mediante la resolución del proceso de transformación lluvia-escorrentía realizado a través del módulo de procesos hidrológicos distribuido (Cea et al., 2015) incluido en el software IBER utilizando los datos obtenidos anteriormente y los existentes de diferentes redes pluviométricas y la base de datos *Spain02* (Herrera et al., 2016). Finalmente, se identifican los factores que han incrementado el riesgo por inundación observado a día de hoy y han producido el desarrollo de cambios morfológicos en los cauces principales de la cuenca de drenaje, inexistentes desde el comienzo de la era fotogramétrica (año 1945). Paralelamente, se recopilan e incluyen documentos históricos que corroboran las evidencias encontradas, aportando así información adicional y de interés.

## MATERIAL Y MÉTODOS

### Zona de estudio

La zona de estudio se localiza en la cuenca de drenaje del Arroyo de Ibros, dentro de los términos municipales de Ibros y Baeza (Jaén, Andalucía, España), próxima al centro geográfico de dicha provincia. Se trata de una cuenca no aforada con un área reducida (25.6 km<sup>2</sup>) en la que existe un importante gradiente altitudinal (Figura 1-a) con una cota máxima de 783.9 m.s.n.m. (38° 0' 10.60" N - 3° 27' 24.28" O) y una cota mínima de 255.6 m.s.n.m. (38° 3' 3.47" N - 3° 35' 2.27" W). Este hecho confiere un notable desnivel y alta pendiente, presentando un valor medio y máximo de 11.9% y 50%, respectivamente. La zona de pendiente menor se encuentra en la cabecera de la cuenca con unos valores entre 2.5 y 10% (Figura 1-b). Una amplia superficie (91%) está dedicada al cultivo de olivar bajo manejo tradicional, existiendo otros usos minoritarios como el urbano (4.1%), concentrado en la localidad de Ibros, y el dedicado al cultivo del cereal (2.5%), entre otros (Figura 1-c).



**Figura 1** | (a) Mapa físico, (b) mapa de pendientes y (c) clasificación del uso del suelo de la cuenca del arroyo de Ibros. Los dos arroyos localizados aguas arriba de la confluencia se denominan (1) Ibros y (2) Moreras.

La cuenca de drenaje presenta una alta densidad de barrancos y cárcavas en el sector medio y alto que confluyen para dar lugar a la formación de dos cauces de mayor envergadura: el Arroyo de las Moreras y el Arroyo de Ibros. El Arroyo de las Moreras (denominado “Moreras” en la presente comunicación) posee una longitud de 10.47 km y drena el sector oriental/suroriental de la cuenca. Por otro lado, el Arroyo de Ibros (nombrado “Ibros alto” en el presente estudio) tiene una longitud de 4.23 km, recibiendo las aguas de la zona meridional de la misma. Estos dos cauces concurren cerca de la desembocadura con el río Guadalimar formando un cauce principal denominado Arroyo de Ibros (designado “Ibros bajo”). El caudal en la cuenca tiene un marcado carácter estacional, encontrándose generalmente seco el cauce principal durante la estación seca estival y en periodos de sequía.

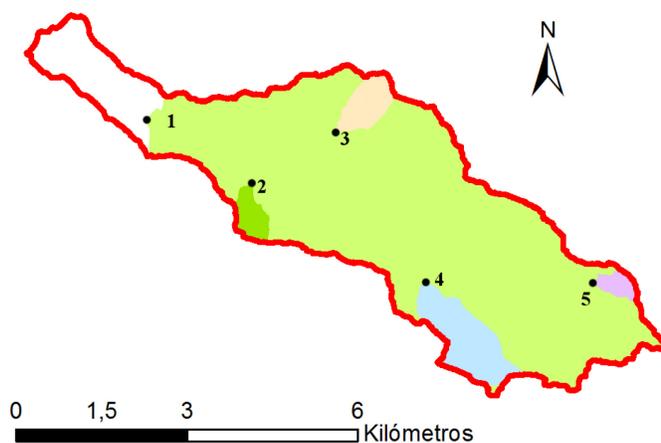
El clima de la cuenca es de carácter mediterráneo continental, con una temperatura media de 17°C (estación 5220 de la red de AEMET) y una precipitación media anual de 528.2 mm para el período 1961-2003. La distribución es irregular, con una marcada sequía estival, siendo los meses más lluviosos diciembre y febrero, y los más secos julio y agosto (Tabla 1).

**Tabla 1** | Precipitación media mensual (mm) en la estación meteorológica de Canena (5220), próxima a la zona de estudio (años 1961-2003)

Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Anual
61.5	66.4	52.7	56.7	40.7	22.1	2.7	4.9	30.4	55.5	62.7	72	528.2

## Metodología

En primer lugar, se realizó una reconstrucción paleohidrológica del evento de mayor magnitud ocurrido entre los años 1997 y 2013. Para ello se emplearon las series de ortofotografías históricas disponibles en la zona de estudio correspondientes a los años 1997, 1998-99, 2001, 2004-05, 2006-07, 2008-09, 2010-11, 2013 y 2016. La totalidad de las imágenes fueron obtenidas de la Red de Información Ambiental de Andalucía (REDIAM), salvo la correspondiente al año 2016 que fue descargada a través del software gratuito Google Earth™ 7.1.7 y posteriormente georreferenciada con ArcMap™ 10. La resolución espacial de las ortofotos es alta, alternando entre 0.5 m (imágenes entre 2001-2016) y 1 m (imágenes entre 1997-1999), lo que permitió identificar y procesar sobre ellas las tipologías de las evidencias de inundación existentes, tales como arrastre de vegetación o erosión en los márgenes del cauce. De esta forma, se identificó el evento de mayor magnitud en el período estudiado y se reconstruyeron las variables hidráulicas en cinco tramos de la cuenca (Figura 2), infiriendo los caudales mediante la comparación con las velocidades y los calados simulados con el software IBER 2.4.3. (Cea y Bladé, 2015). La resolución espacial de las simulaciones es muy alta, ya que se generó una malla triangular fina con un tamaño inferior al metro y se empleó como base altitudinal un modelo digital del terreno de alta resolución construido a partir de ficheros con formato LAZ obtenidos mediante la técnica LiDAR (Light Detection and Ranging) empleada por el Instituto Geográfico Nacional (IGN). Así se asegura una precisión adecuada (Fraile-Jurado y Ojeda-Zújar, 2013). Para garantizar una mayor fiabilidad de las simulaciones en presencia de flujo turbulento se empleó el modelo de turbulencia  $k-\varepsilon$  (Rastogi y Rodi, 1978) integrado en el software IBER. Paralelamente, las evidencias de inundación halladas a partir de las ortofotografías fueron confirmadas mediante estudios de campo. Finalmente, se recopiló e incluyó documentos históricos que corroboraban las evidencias encontradas, aportando así información adicional de interés.



**Figura 2** | Subcuencas en las que se realizó la reconstrucción del proceso de transformación lluvia-escorrentía mediante el software IBER. Se definen como: 1. Ibros bajo, 2. Cárcava 1, 3. Cárcava 2, 4. Ibros alto y 5. Valdehermoso.

Posteriormente, en la segunda fase del trabajo, se obtuvo la intensidad de precipitación y la escorrentía generada en diferentes áreas de drenaje de la cuenca. La intensidad de precipitación se estimó a partir de correlaciones disponibles entre los caudales y el área de drenaje, donde los caudales procedieron de la reconstrucción realizada en primera fase del estudio. La duración de la precipitación se fijó en 3 horas en base a la información aportada por un medio local, por lo que la intensidad de precipitación fue recalculada a este rango temporal. La elevada incertidumbre de los datos de precipitación, debido a la baja densidad espacio-temporal de las estaciones pluviométricas, imposibilitó la obtención de los valores del hietograma en un evento inferior a una hora. A continuación, se realizó una comparación espacial de los valores obtenidos con los datos pluviométricos existentes en el Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH) de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (CHG) y de la Red de Alerta e Información Fitosanitaria (RAIF) de la Junta de Andalucía. La obtención de la escorrentía se realizó mediante simulaciones bidimensionales empleando el módulo de procesos hidrológicos distribuido del

software IBER, posibilitando la reconstrucción del proceso de transformación lluvia-escorrentía en diferentes subcuencas de la zona de estudio (Figura 2). En él se tuvo en cuenta el incremento de la hidrofobicidad del suelo tras el período seco estival característico del clima mediterráneo (Tabla 1) y bajo el tipo de cultivo agrícola existente, despreciando por tanto el valor de la infiltración (Doerr y Thomas, 2000; Miyata et al., 2010).

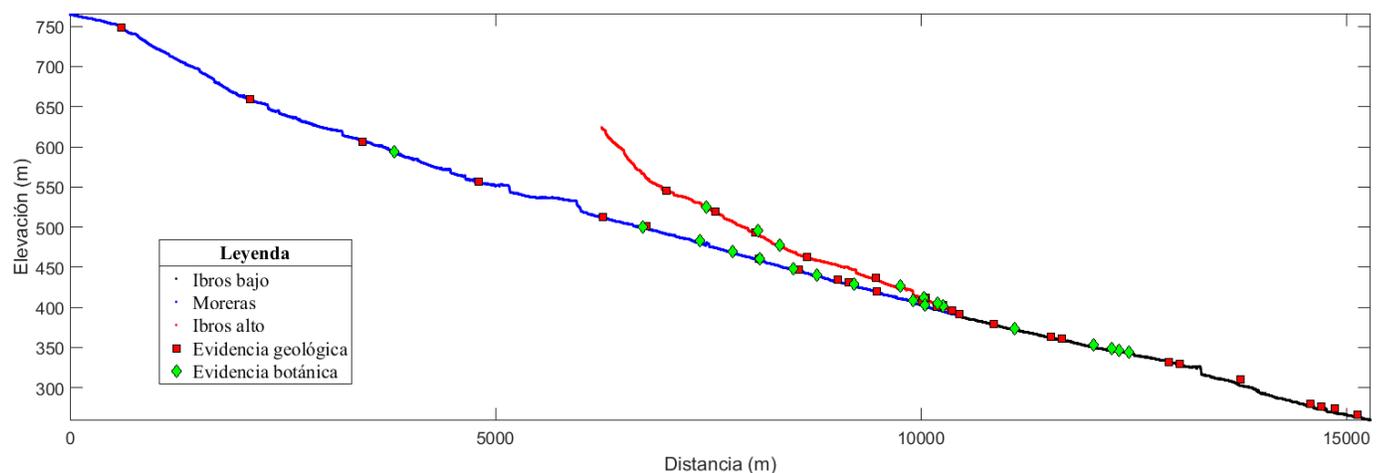
## RESULTADOS

Los resultados obtenidos en la presente comunicación se han subdividido atendiendo a las etapas y sub-etapas de trabajo que se han realizado, presentándose a continuación los siguientes apartados: identificación y análisis de evidencias de inundación, reconstrucción paleohidrológica del evento de mayor magnitud, proceso de transformación lluvia-escorrentía y comparación de la precipitación obtenida.

### Identificación y análisis de evidencias de inundación

En primer lugar, el análisis de las evidencias de inundación existentes en las series de ortofotografías durante el período 1997-2016 permitió identificar el evento de inundación de mayor magnitud mediante el estudio y la comparación de la altura de la marca sobre el cauce en un mismo punto geográfico. Tras realizar la comparación se corroboró con datos de precipitación existentes, noticias de prensa y recursos web, determinando que la inundación que presentó una mayor magnitud en el período considerado fue la ocurrida el día 16 de septiembre del año 2009.

Para dicho evento, se identificaron un total de 52 evidencias en la cuenca de drenaje del Arroyo de Ibros, de las cuales el 59.6% fueron de tipología geológica, siendo inferiores las de carácter botánico (40.4%). La gran mayoría de las evidencias geológicas correspondían a superficies erosivas formadas sobre los márgenes del cauce durante la inundación. En el caso de las botánicas, se presentaban al producirse el arrastre de olivos (*Olea Europaea*) situados próximos al cauce debido a la alta velocidad del flujo de agua. La distribución espacial de las evidencias tuvo un carácter irregular, encontrándose en gran proporción en zonas bajas y medias de la cuenca (Figura 3). En el tramo “Ibros alto” se contabilizaron 14 evidencias y en “Ibros bajo” 15, siendo mayores en el tramo “Moreras” en el que se identificaron un total de 23 evidencias.



**Figura 3** | Perfil longitudinal de los tramos “Moreras” (azul), “Ibros alto” (rojo) e “Ibros bajo” (negro). Se superponen las evidencias encontradas y su tipología.

## Reconstrucción de parámetros hidráulicos

La reconstrucción de los parámetros hidráulicos (calado, velocidad y caudal) proporcionó diferentes valores en función de la zona considerada.

En el tramo 1 (Figura 1), situado en la parte baja del Arroyo de Ibros, se obtuvo un valor estimado de caudal de  $170 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  para la inundación de septiembre de 2009. El calado resultante presentó valores medios entre 3.5 y 4 m sobre el thalweg, con máximos superiores a 4.5 metros. En los extremos de la lámina de agua simulada, el agua inundó explotaciones agrícolas de olivar produciendo las marcas de inundación botánicas comentadas en el apartado anterior. En gran parte de la sección longitudinal se observó la formación de ondas de flujo con amplitudes medias en torno a 0.5-1 m. Las velocidades resultantes fueron altas, adquiriendo un valor próximo a  $7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  en el área más profunda de la inundación (Tabla 2), siendo variables en función de la geometría del cauce. La velocidad media fue de  $3.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . El régimen de flujo presentó un carácter mayoritariamente supercrítico, con un valor medio del número de Froude de 1.5, en excepción de sectores de baja velocidad en los que predominaba un régimen subcrítico (Figura 4).

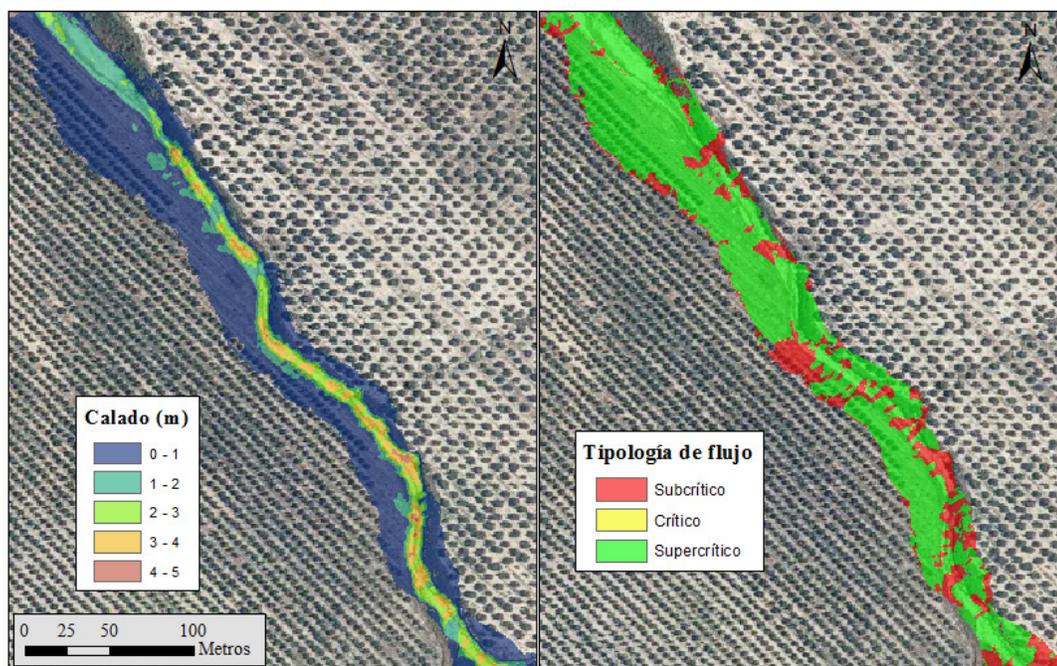


Figura 4 | Calado (izquierda) y tipología de flujo (derecha) resultante de la simulación en el tramo 1 para un caudal pico de  $170 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

Tabla 2 | Valores medios de caudal, número de Froude y velocidad para los diferentes tramos de estudio.

	Caudal ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	Número de Froude	Velocidad ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )
Tramo 1	170	1,5	3,8
Tramo 2	2,7	1,7	1,8
Tramo 3	4,5	1,3	2,5
Tramo 4	1,5	1,1	1,4
Tramo 5	4,1	1,1	1,9

En los cuatro tramos restantes, situados en cauces fluviales de menor entidad y cárcavas, se obtuvieron valores de caudal en un intervalo entre  $4.5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (Cárcava 1) y  $1.5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (Cárcava 2) para la inundación estudiada. Las velocidades simuladas fueron inferiores a las obtenidas en el tramo 1, presentando un valor máximo de  $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  y un valor medio entre  $2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (Cárcava 2) y  $1.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (Ibros Alto). El régimen de flujo fue de carácter supercrítico en todas las zonas consideradas, estando próximo a un régimen crítico en los tramos 4 y 5.

## Reconstrucción de precipitación y escorrentía

La reconstrucción de precipitación y escorrentía posibilitó la obtención de la intensidad de precipitación en diferentes áreas de la cuenca, así como el análisis de su distribución y la estimación del valor máximo local.

Los valores de intensidad de precipitación estimada para el evento de septiembre de 2009 mediante la reconstrucción paleohidrológica mostraron una distribución zonal marcada por un fuerte gradiente. Los tramos situados al noreste presentaron unos valores de intensidad de precipitación mayores que los localizados al suroeste. El valor máximo de intensidad de precipitación obtenido en la presente reconstrucción se localizó en Valdehermoso (figura 5) con  $112 \text{ mm} \cdot 3\text{h}^{-1}$ . En los lugares 2 y 3 (Cárcava 1 y 2) se obtuvieron unas intensidades de  $39 \text{ mm} \cdot 3\text{h}^{-1}$  y  $73.8 \text{ mm} \cdot 3\text{h}^{-1}$ , respectivamente. El valor mínimo resultante correspondió al Barranco Ibros Alto, localizado al suroeste de la cuenca, con  $28.8 \text{ mm} \cdot 3\text{h}^{-1}$ . La reconstrucción de la intensidad de la precipitación en el tramo 1, correspondiente al 91% del total íntegro de la cuenca, aportó un valor de  $78.7 \text{ mm} \cdot 3\text{h}^{-1}$ . Dicho resultado se puede asumir como la precipitación media de la cuenca del Arroyo de Ibros para el evento estudiado.

Los datos de precipitación existentes en la zona de estudio, medidos a través de pluviómetros, mostraron una distribución espacial similar a la existente en la reconstrucción anterior. Los datos superiores se localizaron en el este y noreste de la cuenca y los menores hacia el suroeste y oeste, siendo mayores los registrados en la localidad de Baeza ( $98.5 \text{ mm} \cdot 3\text{h}^{-1}$ ) y Canena ( $80,6 \text{ mm} \cdot 3\text{h}^{-1}$ ). Dichos valores fueron el dato máximo de precipitación en un día para las series de ambas localidades, iniciadas en 1945 y 1955, respectivamente.

No se emplearon los valores de precipitación proporcionados por la base de datos *Spain02* debido a que la resolución que presentaba ( $0.11^\circ$ ) era muy superior al carácter local e irregular del fenómeno estudiado.

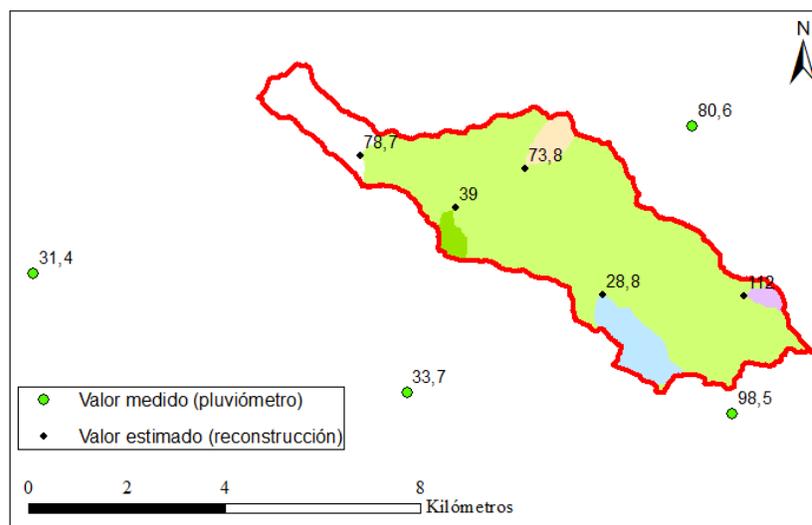


Figura 5 | Valores de precipitación medidos y reconstruidos en el evento de septiembre de 2009.

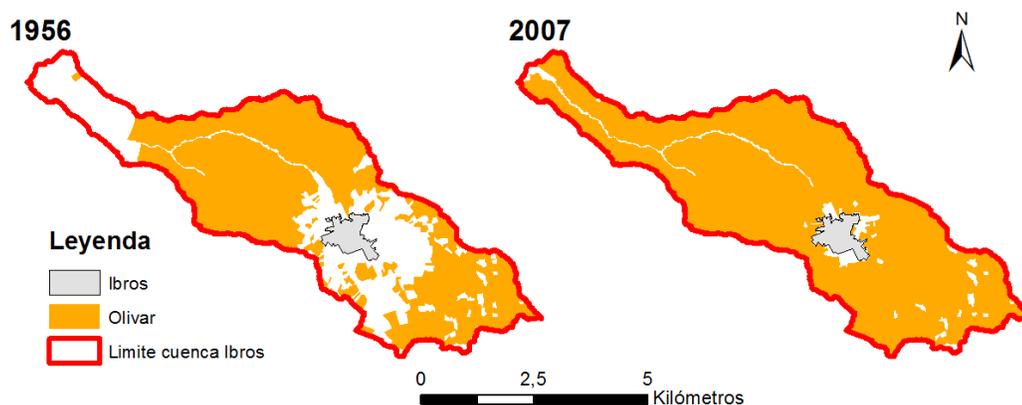
## Reconstrucción del proceso de transformación precipitación-escorrentía

La reconstrucción del proceso de transformación lluvia-escorrentía para el evento de septiembre de 2009 mediante el módulo de procesos hidrológicos de Iber 2.4.3 permitió analizar la evolución del evento a nivel de cuenca y subcuencas, así como el estudio de la contribución de cada una al caudal total de la inundación.

El caudal estimado en la confluencia del Arroyo de Ibros y el Arroyo de las Moreras mostró un valor de  $166 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . La subcuenca del Arroyo de las Moreras aportó el 78% de dicho caudal para el evento estudiado, presentando el curso fluvial un valor de  $129 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  aguas arriba de la confluencia comentada anteriormente. Al paso por la localidad de Ibros se obtuvo un caudal de  $58 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , que provocó el desbordamiento en el núcleo urbano, generando numerosos daños materiales y 1 víctima mortal. La subcuenca del Arroyo de Ibros adquirió un papel secundario en la contribución al caudal total del presente evento de inundación, aportando el 22% a la descarga total. El caudal total estimado del Arroyo de Ibros en el tramo previo a la confluencia con el Arroyo de las Moreras fue de  $37 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

## DISCUSIÓN

La inundación de septiembre de 2009 ocurrida en la cuenca de Ibros fue un fenómeno de inundación súbita extraordinario a tenor de los datos registrados, los daños acaecidos en la localidad de Ibros y fincas agrícolas anexas al cauce, así como la generación de multitud de cambios morfológicos, deslizamientos y generación de cárcavas a lo largo de la cuenca. Los datos existentes de precipitación acumulada, con una longitud superior a 50 años, presentan los valores máximos diarios en el evento estudiado. Adicionalmente, no se tenía constancia de una inundación de tal magnitud en la localidad de Ibros en la época reciente, donde los daños provocados por inundación y sedimentación fueron superiores al millón de euros. Estos daños se extendieron a infraestructuras como la vía agrícola provincial JV-3045 y a las explotaciones de olivar situadas próximas al cauce del Arroyo de Ibros, en las que la inundación eliminó centenares de olivos con edades superiores a 50 años a tenor de las ortofotografías existentes. Otros factores que muestran la excepcionalidad del evento estudiado son el súbito desarrollo de deslizamientos, cambios morfológicos y generación-profundización de cárcavas a lo largo de la cuenca de drenaje que se muestra en las ortofotos existentes en el intervalo 2008-2010, inexistentes anteriormente hasta la fecha del primer vuelo fotogramétrico (1945).



**Figura 6** | Ocupación del cultivo de olivar en la cuenca del Arroyo de Ibros en los años 1956 y 2007.

Las fotografías existentes de la inundación de septiembre de 2009 muestran una descarga de flujo hiperconcentrado de sedimento (Pierson, 2005). Las causas de la generación de este flujo residen, en primer lugar, en la erosión existente en la cuenca de drenaje debido a la alta pendiente media existente, que se ve agravada por la ocupación del suelo por cultivo de olivar convencional en el 91% de la superficie de la cuenca. Las características de esta técnica agrícola (no mantenimiento de la cobertera vegetal) favorece los procesos de erosión laminar y en cárcavas, así como el incremento de la hidrofobicidad del suelo

(Burguet et al, 2016). El incremento del 25% en superficie de este tipo de cultivo durante los últimos 30 años (Figura 6), en detrimento del cultivo de cereal, está causando un aumento significativo de la erosión en la cuenca de drenaje en los momentos de alta precipitación. Cerdà y Doerr (2007) demostraron que el cultivo de olivar convencional puede aumentar la erosión en un factor potencial de 300 respecto al cultivo de cereal a alta intensidad de precipitación. La confluencia de estos dos factores conlleva un incremento de la descarga de agua y de la carga sedimentaria asociada que incrementan la erosión sobre el cauce y sus márgenes, causando la generación de los súbitos cambios morfológicos y deslizamientos ocurridos durante la última década.

El efecto del cambio climático sobre la zona de estudio es otro factor importante a tener en cuenta ya que proporciona mayor cantidad de agua a drenar por los cauces fluviales. Este hecho se corrobora con las series de precipitación existentes desde hace más de medio siglo, cuyos dos valores máximos diarios corresponden a dos años recientes (2009 y 2011, respectivamente).

La combinación de la paleohidrología y del uso de un software de modelización bidimensional como IBER 2.4.3 permite la reconstrucción del evento de inundación repentina del año 2009 acaecido en la cuenca de drenaje del Arroyo de Ibros, así como la obtención de diferentes parámetros hidráulicos como caudal o velocidad de flujo, entre otros. Adicionalmente, la correlación del caudal resultante con el área de drenaje posibilita la obtención de la intensidad de precipitación estimada en el evento estudiado para dicha área considerada, pudiéndose calcular la distribución zonal de la misma y el valor máximo estimado, paliando la baja densidad de estaciones pluviométricas existentes en la zona de estudio. Posteriormente, la precipitación obtenida en diferentes sectores de la zona de estudio permite reconstruir con precisión el proceso lluvia-escorrentía que da lugar a la inundación mediante el software IBER.

En los últimos años está cobrando interés la realización de este tipo de estudios en la región mediterránea a raíz de la publicación de diversos informes sobre la tendencia futura de la precipitación debido a los procesos de cambio climático, que indican una concentración de las precipitaciones en un tiempo menor en el área comentada (European Environmental Agency, 2017), teniendo como consecuencia un incremento notable de este tipo de inundaciones durante las próximas décadas. Este hecho requiere de un conocimiento profundo de la dinámica de los procesos de inundación repentina, teniendo como consecuencia la mejora de las herramientas de prevención, llevando asociado un beneficio económico traducido en la reducción de los costes destinados a paliar los daños provocados por estos fenómenos naturales por parte de las Administraciones. El método desarrollado en el presente estudio puede contribuir a su análisis, siendo extrapolable a su empleo para realizar la reconstrucción hidráulica de eventos de inundación repentinos, estimación de la precipitación asociada y simulación del proceso de transformación lluvia-escorrentía en cuencas de drenaje agrícolas no aforadas, de pequeño tamaño y con déficit y/o inexistencia de mediciones pluviométricas situadas en la región mediterránea.

---

## CONCLUSIONES

El evento de inundación rápida ocurrido en septiembre de 2009 en la cuenca del Arroyo de Ibros fue un evento extraordinario en base a los datos aportados por las simulaciones hidráulicas, los datos de precipitación existentes, los daños producidos en la localidad de Ibros y fincas agrícolas anexas al cauce, así como la reactivación de procesos que no operaban durante las últimas décadas como cambios morfológicos, deslizamientos y generación de cárcavas a lo largo de la cuenca.

El incremento de superficie de olivar durante las últimas décadas, unido a la alta pendiente media de la cuenca, provoca un incremento de la descarga de agua con una concentración sedimentaria superior que da lugar a la generación de flujos hiperconcentrados de sedimento durante la inundación. Dicho incremento está relacionado con la generación de multitud de cambios morfológicos y deslizamientos en el cauce ocurridos durante la inundación estudiada. El efecto del cambio climático se manifiesta en el aumento de la precipitación acumulada en un tiempo menor durante las últimas décadas.

La combinación de técnicas de paleohidrología y modelización hidráulica es un método eficaz para el estudio de inundaciones repentinas, siendo aplicable en cuencas análogas. El análisis de dicho tipo de inundación está ganando interés en los últimos años debido a las proyecciones de cambio climático. El conocimiento de la dinámica de estos riesgos geológicos se

vuelve una herramienta fundamental para la prevención por parte de las Administraciones con el objeto de reducir los costes provocados por inundación.

---

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Economía, Industria y Competitividad del Gobierno de España (MINECO/FEDER, UE) en el marco del proyecto SEDRETO CGL2015-70736-R. J.D.d.M.E. agradece el contrato predoctoral BES-2016-079117 (MINECO/FSE, UE) del Programa Estatal de Promoción del Talento y su Empleabilidad (convocatoria del año 2016).

---

## REFERENCIAS

- Bohorquez, P. 2016. Paleohydraulic reconstruction of modern large floods at subcritical speed in a confined valley: proof of concept. *Water* 8(12), 567, doi:10.3390/w8120567.
- Bohorquez, P., del Moral-Erencia, J.D. 2017. 100 Years of Competition between Reduction in Channel Capacity and Streamflow during Floods in the Guadalquivir River (Southern Spain). *Remote Sensing* 9. In press.
- Burguet, M., Taguas, E. V., Cerdà, A., & Gómez, J. A. 2016. Soil water repellency assessment in olive groves in Southern and Eastern Spain. *Catena* 147, 187-195, doi:10.1016/j.catena.2016.07.005
- Cea, L., Bladé, E. 2015. A simple and efficient unstructured finite volume scheme for solving the shallow water equations in overland flow applications. *Water Resources Research* 51(7), 5464-5486, doi:10.1002/2014WR016547.
- Cea, L., Fraga, I., Puertas, J., Álvarez, M., Bermúdez, M., Coquerez, S., Salsón, S., Petazzi, A. 2015. Influencia de la densidad espacial de estaciones pluviométricas y de la disponibilidad de datos radar en los hidrogramas de tormenta calculados con un modelo hidrológico distribuido. *Actas de las IV Jornadas de Ingeniería del Agua*, October 20-23, Córdoba, Spain, 1237-1246.
- Cerdà, A., Doerr, S. H. 2007. Soil wettability, runoff and erodibility of major dry-Mediterranean land use types on calcareous soils. *Hydrological Processes* 21(17), 2325-2336, doi:10.1002/hyp.675.
- Doerr, S. H., Thomas, A.D. 2000. The role of soil moisture in controlling water repellency: New evidence from forest soils in Portugal. *Journal of Hydrology* 231-232, 134-147, doi:10.1016/S0022-1694(00)00190-6.
- European Environment Agency. *Climate Change, Impacts and Vulnerability in Europe 2016: An Indicator-Based Report*; 2017; Publications Office of the European Union: Luxembourg; Available online: <https://www.eea.europa.eu/publications/climate-change-impacts-and-vulnerability-2016> (accessed on 26 January 2017).
- Fraile-Jurado, P., Ojeda-Zújar, J. 2013. The importance of the vertical accuracy of digital elevation models in gauging inundation by sea level rise along the Valdelagrana beach and marshes (Bay of Cádiz, SW Spain). *Geo-Marine Letters* 33(2-3), 225-230, doi:10.1007/s00367-012-0317-8.
- Herrera, S., Fernández, J., Gutiérrez, J.M. 2016. Update of the Spain02 gridded observational dataset for EURO-CORDEX evaluation: Assessing the effect of the interpolation methodology. *International Journal of Climatology* 36(2), 900-908, doi:10.1002/joc.4391.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M.M.B., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M., Eds.; Cambridge University Press: Cambridge, UK; New York, NY, USA, 2013.

- Miyata, S., Kosugi, K., Nishi, Y., Gomi, T., Sidle, R.C., Mizuyama, T. 2010. Spatial pattern of infiltration rate and its effect on hydrological processes in a small headwater catchment. *Hydrological Processes* 24(5), 535-549, doi:10.1002/hyp.7549.
- Pierson, T. 2005. Hyperconcentrated flow – transitional process between water flow and debris flow. *In: Debris-flow Hazards and Related Phenomena* (M. Jakob and O. Hungr, eds.). Springer Praxis Books. Springer, Berlin, Heidelberg, Germany, 159-202.
- Rastogi, A.K., Rodi, W. 1978. Predictions of heat and mass transfer in open channels. *Journal of the Hydraulics Division* 104(HY3), 397-420.