ESTUDIOS DE PALEOINUNDACIONES EN ESPAÑA: ORIGEN, EVOLUCIÓN Y ESTADO ACTUAL

G. BENITO
Museo Nacional de Ciencias Naturales, CSIC, Serrano 115bis, 28006 Madrid, Benito@mncn.csic.es

RESUMEN

Las inundaciones son el tipo más frecuente de desastre natural en España, y sus costes económicos han crecido de forma notable durante las últimas décadas. El estudio de la peligrosidad de las crecidas está limitado por la escasez de datos instrumentales. La hidrología de paleo-inundaciones tiene como objetivo el estudio de la magnitud y frecuencia de las inundaciones recientes y pasadas (periodos de siglos y milenios) usando evidencias geológicas, principalmente sedimentos o marcas de erosión dejados por el flujo de agua. En las últimas dos décadas, los estudio de las paleo-inundaciones en España han proporcionado una mejora de nuestro conocimiento en temas como (1) la estimación de la peligrosidad de las inundaciones; (2) la determinación del límite máximo de la magnitud de las crecidas en diferentes regiones; (3) las relaciones entre la variabilidad climática y el régimen de inundaciones; (4) la estimación del papel de las crecidas en la recarga de los acuíferos aluviales. En este trabajo se describe el origen, evolución y estado actual de los estudios de paleoinundaciones en España basados en evidencias morfosedimentarias.

Palabras clave: *Paleohidrología, hidrología de paleo-inundaciones, riesgo de crecidas, variabilidad climática, recarga de acuíferos*

ABSTRACT

Floods are the most common type of natural disaster in Spain and, in terms of economic damage, costs are increasing spectacularly with time. Besides de use of conventional hydrological data, the pre-instrumental flood record can be completed from palaeoflood hydrology or from documentary flood information, or through the combined use of both these tools. Palaeoflood hydrology aims at the reconstruction of the magnitude and frequency of recent and past floods using geological evidence, namely flood sediments and/or evidence of flood erosion. Recent developments in palaeoflood hydrology in Spain provide: (1) major improvements in flood risk assessment; (2) determination of the maximum limit of flood magnitude and non-exceedences as a check of the probable maximum flood (PMF); (3) a better understanding of long-term flood-climate relationships, and (4) assessing sustainability of water resources in dryland environments where floods are an important source of water to alluvial aquifers. This paper describes the origin, development and current state of the Spanish research on palaeoflood hydrology, focused on those studies based on morpho-sedimentary evidences of past floods.

Key words: *Palaeohydrology, paleoflood hydrology, floods hazard, climatic variability, groundwater recharge*

1. INTRODUCCIÓN

El estudio de la peligrosidad de las inundaciones es una de las principales tareas de la hidrología aplicada. El problema más común en la estimación de la peligrosidad de crecidas es la falta de información sobre caudales instantáneos que sean representativos de las grandes crecidas de las cuencas de estudio. La extensión de estos registros hacia el pasado se puede abordar mediante información no convencional, bien procedentes de datos históricos (basados en documentos o en observaciones directas), o a partir de información de registros sedimentarios depositados por las inundaciones (Baker *et al.,* 2002). Los archivos sedimentarios presentes a lo largo de los ríos almacenan evidencias del paso de las inundaciones registradas durante milenios, y su estudio ha dado lugar al desarrollo de una subdisciplina conocida como "Hidrología de Paleoinundaciones" (Paleoflood hydrology; c.f. Kochel & Baker, 1982). La hidrología de paleoinundaciones persigue la reconstrucción de la magnitud y frecuencia de crecidas pasadas usando evidencias geológicas y/o botánicas (Baker *et al.,* 2002). En el estudio de las paleoinundaciones se aplican principios de la geología, botánica, hidrología y la dinámica de fluidos para inferir aspectos cuantitativos y cualitativos de crecidas no observadas, o de las que se carezca de registro, en base a evidencias físicas dejadas por el paso del flujo de agua (Baker *et al.,* 2002). Los indicadores dejados en los cursos fluviales por las inundaciones incluyen evidencias morfo-sedimentarias, tales como arenas y limos depositados en zonas de remanso (slackwater flood deposits) y elementos geomorfológicos (barras, depósitos aterrazados o bancos, marcas de erosión), así evidencias botánicas que incluyen descortezados y marcas en la vegetación. Las inferencias que se pueden llegar a realizar en estos estudios incluyen un registro de las crecidas extremas, su edad (mediante datación geocronológica), así como conclusiones en relación con la magnitud y frecuencia de las inundaciones. El estudio de paleoinundaciones basadas en evidencias botánicas se ha desarrollado en España principalmente por el grupo del IGME liderado por Andrés Díez-Herrero (Díez-Herrero *et al.,* 2013). Debido a la limitación de espacio de este trabajo nos centraremos en los estudios de paleoinundaciones basados en evidencias morfo-sedimentarias. Los objetivos de este trabajo son: (1) describir los antecedentes y estudios actuales sobre paleocrecidas desarrollados en España, con énfasis en los registros morfosedimentarios, y (2) mostrar algunos ejemplos y aplicaciones del estudio de las inundaciones extremas del pasado encaminados a la mejora de la estimación de riesgos, la estimación de caudales de diseño de infraestructuras sensibles como las presas, y en la estimación de recursos hídricos en regiones semiáridas.

2. ANTECEDENTES

Los estudios de paleoinundaciones se orientan tradicionalmente a resolver uno de estos dos temas: (1) análisis centrado en la información cuantitativa de eventos específicos, tales como la fecha, caudal punta, y el calado máximo de una crecida(s) concreta(s); y (2) estudios que investigan los patrones espaciales y temporales de las crecidas, principalmente para establecer relaciones entre clima, uso de suelo, frecuencia y magnitud de las crecidas, y

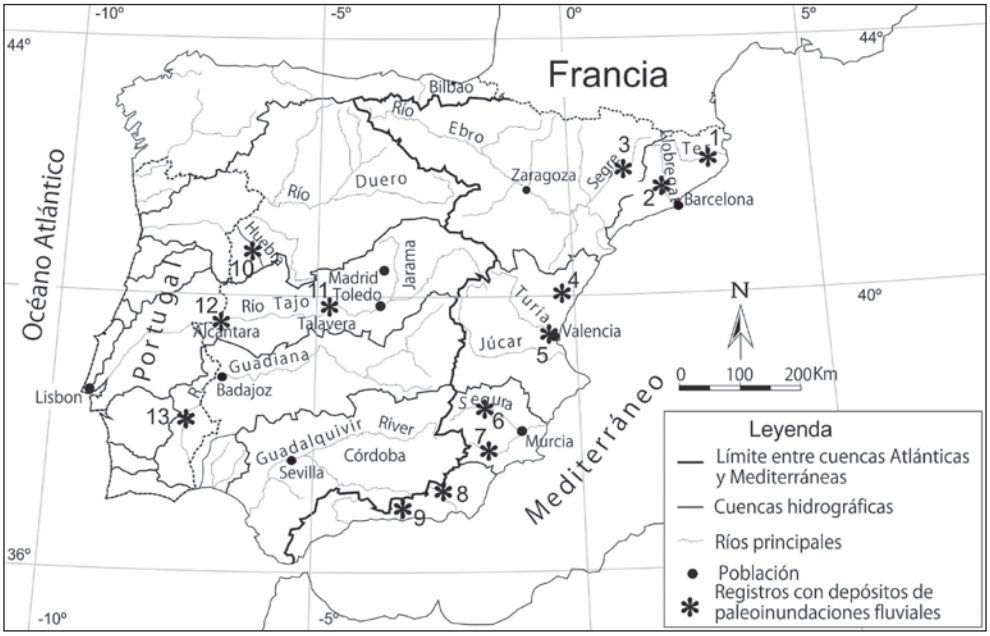

Figura 1. Localización de los principales estudios de paleoinundaciones en la Península Ibérica basados en el análisis de depósitos de remanso (slackwater flood deposits, cf. Kochel and Baker, 1982). 1: Rio Ter (Thorndycraft et al., 2006); 2: Río Llobregat (Thorndycraft et al., 2005; 2006); 3: Río Segre (Rico, 2004); 4: Rambla de la Viuda (Machado et al., 2012); 5: Río Turia (Carmona et al., 1990; Butzer et al., 1983a,b); 6: Río Segura (García-García et al., 2013); 7: Río Guadalentín (Benito et al., 2010); 8: Río Andarax (Lorenzo et al., 2007); 9; Rio Guadalhorce (sin publicar); 10: Río Huebra (sin publicar); 11: Río Tajo en Puente del Arzobispo (Benito et al., 1998; 2003); 12: Río Tajo en Alcántara (Benito et al., 2003); 13: Río Guadiana (en Portugal; Ortega & Garzón, 2009).

su respuesta geomorfológica (tales como morfología del canal, sedimentación en la llanura y procesos de erosión). Ambos tipos de investigación comparten métodos y técnicas y, en general, la mayor parte de estos estudios se realizan en cañones o en ríos confinados en los que la preservación de los registros sedimentarios y geomorfológicos de crecidas individuales resulta frecuente (Kochel & Baker, 1982). A nivel internacional, los estudios de paleoinundaciones toman auge durante la década de 1980 en el SW de Estados Unidos, auspiciados por el grupo ALPHA liderado por el Prof. Victor Baker (Universidad de Arizona), presentando el atractivo de combinar técnicas estratigráficas y geomorfológicas, con modelos hidrológico-hidráulicos que permiten cuantificar los patrones de magnitud y frecuencia de los eventos extremos a largo plazo (desde siglos a milenios).

En España la mayor parte de los estudios de paleoinundaciones (Fig. 1) se han realizado en los últimos veinte años, impulsados por proyectos Nacionales (Benito 1995; Benito *et al.,* 1998a, 2003a; Ortega & Garzón, 2009; Díez-Herrero *et al.,* 2013) y Europeos, siendo de destacar el Proyecto SPHERE (Benito *et al.,* 2004) que

estuvo centrado en los ríos Llobregat, Ter y Segre (Thorndycraft *et al.,* 2005; 2006; Rico, 2004). Sin embargo, el estudio de las precipitaciones e inundaciones extremas actuales y pasadas como agente dinamizador de los procesos hidro-morfosedimentarios tiene numerosos antecedentes (e.g. García-Ruiz *et al.,* 1983). En relación con registros sedimentarios de paleocrecidas, entre los trabajos pioneros se encuentran los desarrollados en ríos de la Comunidad de Valenciana (Butzer *et al.,* 1983ab; Carmona, 1990). Carmona (1990) distingue dos momentos críticos por el número de desbordamientos del río Turia que coinciden con la época Romana, y la Islámica y Medieval, separados por un breve periodo de inactividad (sin inundaciones en el registro sedimentario), correspondiente a la época visigoda. Entre los primeros estudios que combinan la estratigrafía y datación de los depósitos de remanso, con estimaciones hidráulicas se encuentran los realizados en el sector central del río Tajo por Benito *et al.,* (1998, 2003; Fig. 1, puntos 11 y 12). En estos estudios se constata la existencia de periodos con una elevada frecuencia de crecidas en torno a ~9500 años BP, ~8500 BP, ~6700 BP, ~1000 BP, ~450 BP y ~150 BP (edad radiocarbono), asociados a periodos de transición climática con elevada varianza hidrológica. Los estudios de paleoinundaciones en ríos de montaña despertaron gran interés tras la catástrofe del Barranco de Arás (García-Ruiz *et al.,* 1996). La falta de registros instrumentales hidrológicos y pluviométricos otorgaban protagonismo a las evidencias morfo-sedimentarias que permiten la reconstrucción de esta avenida catastrófica, así como inferir la existencia de eventos pasados con magnitud similar y su papel generador del abanico aluvial de Arás (White *et al.,* 1997; Alcoverro *et al.,* 1999; Benito *et al.,* 1998b; Gutiérrez *et al.,* 1998). El interés por las crecidas súbitas se fue extendiendo a otros ríos de montaña del Pirineo y Sistema Central, particularmente centrados en el estudio de los registros morfo-sedimentarios y la hidráulica asociada a las crecidas (Rico *et al.,* 2001; Ruiz-Villanueva *et al.,* 2013), así como en los registros dendrogeomorfológicos (Díez-Herrero *et al.,* 2007; Ballesteros *et al.,* 2011).

En el ámbito mediterráneo, los ríos y ramblas presentan condiciones óptimas para el estudio de las paleoinundaciones debido a su régimen torrencial, dominado por avenidas relámpago, y sus características geomorfológicas, con frecuentes tramos fluviales encajados en roca o sustrato resistente. Dentro del Proyecto SPHERE se combinaron registros morfosedimentarios con datos históricos para reconstruir crecidas extremas y su aplicación en la estimación de la peligrosidad, particularmente en los ríos Llobregat (Thorndycraft *et al.,* 2005), Segre (Rico, 2004) y Ter (Thorndycraft *et al.,* 2006). El estudio de inundaciones "raras" o de muy baja frecuencia permite determinar el límite máximo de caudal que se genera en diferentes cuencas fluviales. Los caudales asociados a las inundaciones extremas constituye una información valiosa para la determinación estadística de la avenida de diseño (periodo de retorno >1000 años) de infraestructuras sensibles como las presas, tema abordado en los ríos Guadalentín y Guadalhorce (Benito *et al.,* 2006). En otros trabajos se han constatado que los patrones de frecuencia y magnitud de las inundaciones en el pasado han estado influenciados tanto por la variabilidad del clima (Thorn-

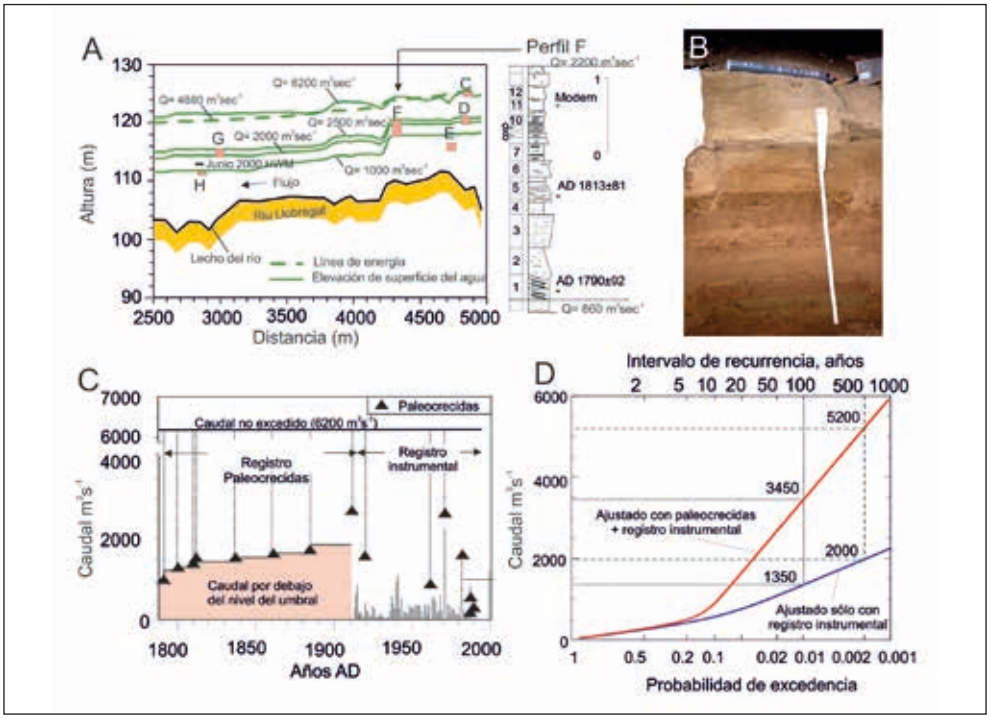

Figura 2. A. Perfil longitudinal del río Llobregat en Monistrol de Monserrat con la situación de los perfiles estratigráficos, y los niveles de superficie de agua estimados por el modelo HEC-RAS para varios caudales (líneas continuas verdes). Los sedimentos se asocian a caudales comprendidos entre 1.000 m^3s^{-1} y 4.680 m^3s^{-1}. A la derecha, el perfil estratigráfico F con 12 unidades y dataciones realizadas con carbono-14 (Thorndycraft et al., 2005). B: Detalle de los depósitos de remanso en el perfil H de Monistrol de Monserrat. C: Organización de los datos de las paleocrecidas (triángulos) y series anuales de aforo (desde 1907). Modificado de Botero (2006). D: Análisis de frecuencia con ajuste de una distribución de tipo TCEV para datos de aforos (línea azul), y para datos de paleocrecidas mas series de aforo (rojo). Los cuantiles obtenidos para la curva que incluye datos de paleocrecidas son superiores a los obtenidos con el ajuste de datos sólo instrumentales.

dycraft & Benito, 2006; Benito *et al.,* 2008), como por los cambios históricos de uso de suelo (Benito *et al.,* 2010; Machado *et al.,* 2012). En ríos Mediterráneos, los registros sedimentarios de las paleoinundaciones tienen baja preservación, y en la mayor parte de los casos se limitan a los últimos 3000 años (Thorndycraft & Benito, 2006). Sin embargo, en ambientes sedimentarios protegidos, como abrigos o cavidades en roca, se puede encontrar registros excepcionales de crecidas más antiguas, que en el caso del río Segura tienen relación con asentamientos Neolíticos y de la Edad del Bronce (García-García *et al.,* 2013). En ocasiones, la identificación de los registros de paleoinundaciones y su continuidad en el tiempo se encuentra afectada y alterada por asentamientos humanos y la agricultura que históricamente han estado

ligados a las zonas de ribera. Igualmente, la carencia de materia orgánica en muchos registros sedimentarios de ambientes semiáridos dificulta la datación precisa de los sedimentos mediante radiocarbono, aunque el reciente avance de las técnicas de datación por OSL (Optically Stimulated Luminiscence) constituyen un paso importante en la cronología de las crecidas (Medialdea *et al.,* 2014). En la actualidad se están desarrollando nuevas metodologías para obtener registros de tormentas e inundaciones en lagos varvados que contienen intercalaciones de láminas detríticas indicativas de eventos extraordinarios de escorrentía. Este es el caso del Lago de Montcortés (Lleida) con un registro de resolución anual para los últimos 3.500 años (Corella *et al.,* 2014). La ventaja de estos depósitos de mayor precisión cronológica reside en establecer de forma detallada la respuesta de las precipitaciones intensas a la variabilidad climática, y por tanto los cambios temporales de diferentes patrones de circulación atmosférica (Benito *et al.,* 1996; Corella *et al.,* 2014).

3. APORTACIÓN DE LAS PALEOINUNDACIONES AL ESTUDIO DE LOS RIESGOS NATURALES EN ESPAÑA

3.1. Estimación de la peligrosidad de inundaciones

Entre las principales aportaciones del estudio de las paleoinundaciones se encuentra su contribución a la estimación de la peligrosidad asociada a inundaciones de baja frecuencia. Desde el punto de vista determinístico, el conocimiento de las crecidas extremas que han ocurrido con anterioridad a los registros instrumentales constituye una valiosa información en la delimitación de zonas inundables, y contribuyen a mejorar la percepción pública de los riesgos. En el río Llobregat el registro de paleocrecidas permite comprobar la existencia de inundaciones pasadas con magnitudes superiores a las registradas durante el periodo instrumental (Thorndycraft *et al.,* 2005). En la Figura 2 se muestra los datos de caudal de las paleocrecidas durante los últimos 200 años, y la estimación de caudal (6200 m^3s^{-1}) de la mayor crecida histórica del río Llobregat ocurrida en el año 1617, conocido como "L'any del Diluvi" (Thorndycraft *et al.,* 2006). Durante el periodo instrumental la mayor avenida se produjo en 1971, con un caudal pico de 2300 m^3s^{-1}, cuyo valor se estimó en la estación de aforo de Castellvell que fue inundada y dañada durante el evento. El río Llobregat dispone de las series instrumentales más largas registradas en ríos Mediterráneos españoles (comienzo en 1907). Sin embargo, la comparación con los registros de paleocrecidas muestra que los datos de la estación de aforos no son representativos de las grandes inundaciones (Figs. 2 y 3). El registro de paleocrecidas incluye al menos ocho eventos de inundación que han excedido un caudal mínimo de 3500 m^3s^{-1} durante los últimos 3000 años, muy por encima de la mayor crecida registrada en 1971 (Thorndycraft *et al.,* 2005; 2006). Los datos de las paleocrecidas se pueden combinar con datos registrados en las estaciones de aforo para el cálculo de los estadísticos de diferentes funciones de distribución (e.g. Gumbel, TCEV, etc) utilizados convencionalmente en la estimación de la peligrosidad, produciéndose una mejora sustancial en la determinación de caudales con periodos de retorno superiores a los 100 años (Fig. 2D).

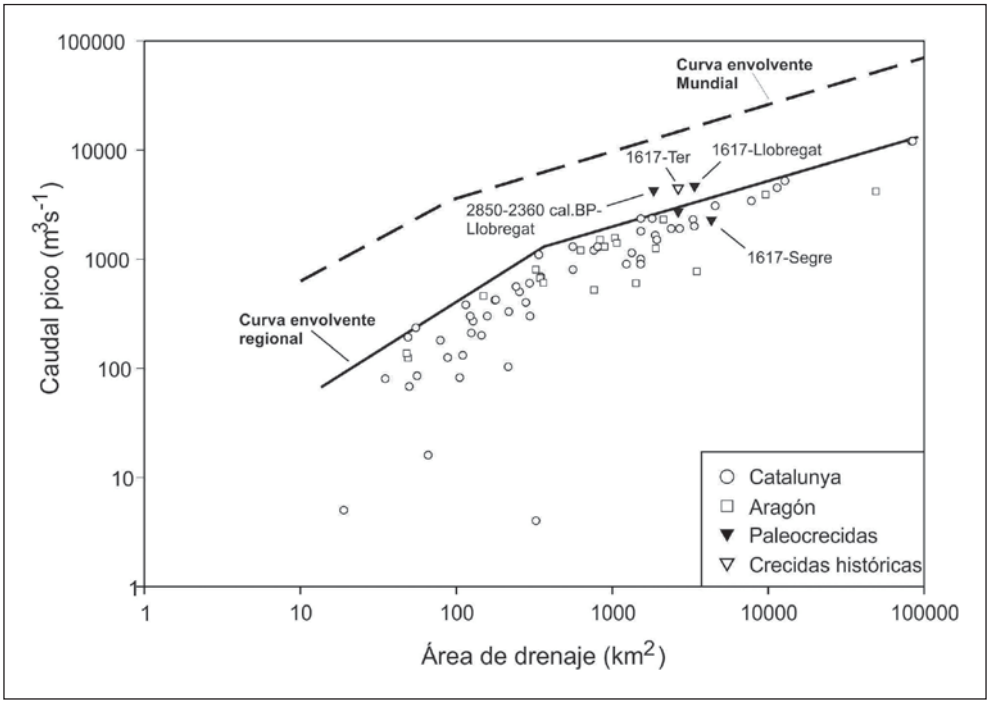

Figura 3. Curva envolvente regional de caudales máximos registrados en estaciones de aforos del NE de España, sobrepasada por los caudales estimados para las paleocrecidas en los ríos Llobregat y Ter, mientras que en el Segre los registros de paleocrecidas correspodientes a los últimos dos milenios tendrían una magnitud similar a la inundación de 1982 (Modificado de Thorndycraft et al., 2006).

3.2. Palaeocrecidas y seguridad de presas

El concepto de la existencia de un límite máximo en la cantidad de precipitación que se puede producir en una cuenca hidrográfica para unas determinadas condiciones climáticas y tamaño de cuenca, es la base para la construcción de las curvas envolventes globales y regionales (Wolman & Costa, 1984). En teoría esta curva envolvente marca el máximo de caudal que se puede registrar regionalmente (Fig. 3). Este concepto se ha usado igualmente para el cálculo de la máxima inundación probable (PMF del inglés Probable Maximum Flood), muy utilizada como criterio determinístico de peligrosidad en el diseño de infraestructuras sensibles. Los datos de paleocrecidas pueden incrementar los registros disponibles sobre estos eventos extremos y contrastar la validez de este límite máximo de las inundaciones en la construcción de las curvas envolventes regionales (Enzel *et al.,* 1993).

De forma similar, los datos de paleocrecidas pueden usarse para comprobar las estimaciones de la Máxima Crecida Probable (PMF). La PMF se ha usado durante décadas como estándar en el análisis hidrológico de los parámetros característicos de la seguridad de presas (Natio-

*Tabla 1. Datos instrumentales y paleocrecidas máximas, caudal para periodo de retorno de 10.000 años, y caudal calculado para Máxima Crecida Probable (PMF) en diversoss ríos de Estados Unidos y España. El caudal para periodo de retorno de 10.000 años se ha estimado a partir de los datos de paleocrecidas en cada cuenca. Datos de: 1 Ostenaa et al., 1994 en Levish et al., 1997; 2 Ostenaa y Levish, 1996; 3 Levish et al., 1997; 4 Thorndycraft et al., 2005, 2006; 5 Benito et al., 2010; * datos de Francés (comunicación escrita, 2003); ** Botero, 2006.*

LOCALIZACIÓN	ÁREA DE LA CUENCA DE DRENAJE (KM^2)	CRECIDA INSTRUMENTAL MÁXIMA (M^3/S)	PERIODO DEL REGISTRO DE PALEOCRECIDAS (YEARS)	CAUDAL DE PALEOCRECIDA MÁXIMA (M^3/S)	Q PARA T= 10.000 AÑOS BASADO EN PALEOCRECIDAS (M^3/S)	MÁXIMA CRECIDA PROBABLE (PMF) (M^3/S)
Río Santa Ynez California (USA)[1]	1080	2265	2900	2550	2690	13,060
Río Ochoco, Oregon (USA)[2]	764	-	10,000-15,000	285	285	4785
Río Crooked, Oregon (USA)[3]	6825	-	8000-10,000	<1100	1100	7225
Río South Fork Ogden, Utah (USA)[3]	210	53	400	70	<215	3075
Río Llobregat[4]	3370	2,500	2800	4680	6921**	18,985*
Río Caramel[5] (Guadalentín)	372	170	1985	1616	3450	5786

nal Research Council, 1985). Por definición, la PMF no tiene periodo de retorno, aunque se le atribuye de forma arbitraria un periodo de retorno de entre 10.000 y 1.000.000 de años, en los límites de confianza inferior y superior, para el análisis de frecuencia de las crecidas (National Research Council, 1985). Los estudios de paleoinundaciones, incluidos aquellos realizados a propósito de la seguridad de presas por el U.S. Bureau of Reclamation muestran que el límite superior en la magnitud de las paleocrecidas es de hasta un orden de magnitud inferior que el obtenido por los cálculos de la PMF (Enzel *et al.,* 1993; Levish *et al.,* 1997). Los estudios realizados en España revelan unas conclusiones muy similares en las cuencas de los ríos Llobregat y Caramel (Benito *et al.,* 2006). En los Estados Unidos, los caudales para el periodo de retorno de 10.000 años incorporando datos de paleocrecidas son entre un 5 y 20% inferiores a los calculados para la PMF (Levish *et al.,* 1997) y del orden del 60% para los casos de estudio españoles (Benito *et al.,* 2006; Tabla 1). De esto se concluye que los caudales calculados para las PMF se encuentran altamente sobreestimados. El valor calculado mediante el método de la PMF para los estudios de seguridad de presas es incierto debido a la falta de potencial físico de estas cuencas para generar los caudales pico calculados. Los caudales estimados para las evidencias físicas dejadas por las crecidas en periodos de miles de años proporcionan resultados más realísticos, utilizando herramientas estadísticas adecuadas y subsecuentemente utilizadas en la planificación de proyectos hidrológicos y de infraestructuras sensibles (e.g. Ostenaa *et al.,* 1994; Ostenaa & Levish, 1996).

3.3. Relaciones clima-inundaciones

En diversos trabajos se ha sugerido que pequeños cambios en el clima pueden afectar a los patrones de frecuencia y magnitud de las inundaciones, aunque el análisis de las series de registros observados resulta insuficiente para demostrar la existencia de tendencias significativas. Las acciones futuras para la adaptación al cambio climático necesitan considerar los impactos del clima en los eventos extremos, y a este respecto, la hidrología de paleocrecidas proporciona una información relevante a considerar en los estudios de peligrosidad de las inundaciones. Las proyecciones de los modelos de circulación general (MCG) en relación a los cambios en la magnitud y frecuencia de las inundaciones son todavía muy inciertas y poco concluyentes. Los registros centenarios de las paleoinundaciones permiten extraer algunas conclusiones sobre la respuesta de las inundaciones a la variabilidad natural del clima, y por tanto, se puede inferir la dirección y/o tendencia de los cambios esperables en situación de incremento de la temperatura. En primer lugar, se ha comprobado que la magnitud y frecuencia de las crecidas muestran una elevada sensibilidad a las alteraciones en la circulación atmosférica a largo plazo, tal y como se demuestra de los registros históricos (Benito *et al.,* 1996) y de paleocrecidas (Thorndycraft & Benito, 2006). Durante los últimos tres mil años, los ríos españoles muestran periodos con concentración en el número de crecidas en concreto entre 1000-600 BC, AD 900-1100, AD 1450-1500 y AD 1600-1900 (Benito *et al.,* 2003, 2008; Thorndycraft & Benito, 2006). En sentido amplio, estos periodos con concentración de grandes crecidas se produjeron durante momentos de enfriamiento global como se desprende de la comparación entre las paleocrecidas en los ríos españoles con la curva de detritos depositados por icebergs en el Atlántico frío, y que estarían relacionados con periodos fríos (Bond *et al.,* 2001). Sin embargo, si tenemos presente lo ocurrido durante el último periodo frío, conocido como la Pequeña Edad del Hielo (entre AD 1450 y ca. AD 1900), mediante su correlación con registros de crecidas históricos se observan unas relaciones clima-inundaciones más complejas (Llasat *et al.,* 2005). Durante la Pequeña Edad del Hielo, los episodios con mayor frecuencia de crecidas coincidieron con cambios en, por ejemplo, la actividad solar, periodos de erupciones volcánicas y avances de los glaciares en los Alpes (Starkel, *et al.,* 2006; Macklin *et al.,* 2006). De manera general, los registros centenarios de paleocrecidas muestran una reducción de la peligrosidad en la segunda mitad del siglo XX e inicios del XXI, aunque el riesgo de inundaciones se ha incrementado como consecuencia de una mayor exposición y vulnerabilidad de personas y bienes (Benito & Machado, 2012).

3.4. Estimaciones de la sostenibilidad de los acuíferos a largo plazo en ambientes áridos e hiperáridos

En ambientes áridos, las crecidas son vistas no sólo como un peligro natural, sino también como una fuente importante de recurso hídrico, debido a que el agua de crecida se infiltra hacia los acuíferos aluviales incrementando los volúmenes subterráneos almacenados. En los últimos años se han desarrollado nuevas metodologías, combinando los registros de crecidas y paleocrecidas con datos de pérdidas

de transmisión en cauces superficiales, para estimar los procesos de recarga de los acuíferos aluviales someros (Benito *et al.,* 2011). Esta aproximación fue primeramente aplicada con éxito en al Desierto del Negev, con datos cuantitativos proporcionados sobre el volumen de agua perdida durante las avenidas fluviales como consecuencia de las pérdidas de transmisión (Greenbaum *et al.,* 2002). Dentro del proyecto Europeo WADE se desarrolló un sistema para la medida de humedad en profundidad mediante sondas TDR flexibles (Flexible Time Domain Reflectometry) que permite la cuantificación de la recarga del acuífero aluvial debido a que las pérdidas de transmisión pueden ser directamente medidas a través de la zona vadosa profunda (Dahan *et al.,* 2003). La cuantificación de estas tasas de recarga del acuífero durante crecidas actuales se puede combinar con datos de eventos de recarga pasadas a través del estudio de la huella isotópica del agua subterránea y de la información de paleocrecidas, que pueden estimar la frecuencia y magnitud de las inundaciones responsables de la recarga del acuífero. Esta metodología se ha aplicado a diferentes ríos y cuencas de Israel, España (río Andarax), Namibia y Sudáfrica dentro de proyecto WADE (Lorenzo *et al.,* 2007; Benito *et al.,* 2011).

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se describe los antecedentes de los estudios hidrológicos de paleoinundaciones en España, centrados en aquellos que utilizan evidencias del registro sedimentario, y su aplicación en la determinación de la frecuencia y magnitud de las crecidas. En muchas cuencas, por ejemplo en el río Llobregat, existen evidencias de crecidas pasadas con mayor magnitud que las registradas durante el periodo instrumental. En otras cuencas, como por ejemplo en el río Segre, los estudios de paleocrecidas muestran que alguna de las crecidas ocurridas durante periodo instrumental presenta magnitudes similares a las mayores registradas en los sedimentos durante los últimos dos milenios. En términos de los efectos hidrológicos del Cambio Climático, las predicciones pueden mejorarse con la incorporación de registros de crecidas a largo plazo (varios milenios) en la modelización climática y el análisis estadístico. Los estudios regionales de las relaciones clima-inundaciones incluyen la calibración de las relaciones, las tendencias de detección (cuando existen) y las estimaciones de revisión de periodos de retorno. Los datos de paleocrecidas también pueden proporcionar evidencia física de los límites superiores de las inundaciones en una cuenca sin depender de extrapolaciones estadísticas de los registros instrumentales cortos, mejorando así las estimaciones de caudal de diseño para infraestructuras hidrológicas sensibles, tales como las presas. Las aplicaciones más recientes de la hidrología de paleocrecidas ayudan a cuantificar las tasas de recarga de los acuíferos aluviales a largo plazo, permitiendo mejorar las estimaciones de los recursos hídricos disponibles en ambientes áridos y semiáridos, y por tanto garantizar su sostenibilidad.

5. AGRADECIMIENTOS

El autor agradece el apoyo económico del proyecto CLARIES (ref. CGL2011-29176), financiado por CICYT. A lo largo de los años los estudios sobre paleoinundaciones realizados por el Laboratorio de Paleohidrología y Cambio Global del CSIC se ha beneficiado de las interacciones con

numerosos colegas, estudiantes y colaboradores que han participado en tareas de campo, laboratorio, discusiones y publicaciones. Entre los colegas internacionales, no puedo dejar de mencionar a Vic Baker, padre de la temática y principal mentor de estos estudios, y a mis colegas Y. Enzel, J.E. O'Connor, T. Grodek, K.J. Gregory, M.G. Macklin, O. Dahan, N.A., Sheffer, L. Ely, L. Starkel, V.S. Kale. En España, los trabajos y la inspiración han llegado de la mano de M.J. Machado, A. Sopeña, Y. Sánchez-Moya, V.R. Thorndycraft, M. Rico, A. Díez-Herrero, M.A. Casas Planes, A. Medialdea, M. Barriendos, C. Sancho, J.L. Peña Monné, F. Francés, B.A. Botero, P. Corella, X. Rodriguez-Lloveras, M. Calle, D. Uribelarrea, A. Lorenzo, J.P. Martín Vide y A. Pérez-González. Por último, agradecer y reconocer el papel de José María García Ruiz como maestro y referente profesional y personal, y su constante apoyo como consejero y compañero en las tareas relacionadas con el CSIC.

6. REFERENCIAS

Alcoverro, J., Corominas, J. & Gómez, M. (1999): The Barranco de Arás flood of 7 August 1996, Biescas, Central Pyrenees, Spain). *Eng. Geol.*, 51: 237-255.

Baker, V.R., Webb, R.H., & House, P.K. (2002): The scientific and societal value of paleoflood hydrology. En: *Ancient Floods, Modern Hazards: Principles and Applications of Paleoflood Hydrology* (P.K. House, R.H., Webb, V.R. Baker, D.R. Levish, eds.), American Geophysical Union Water Science and Application, vol. 5: 1-19 Washington, D.C.

Ballesteros Cánovas, J.A., Bodoque, J.M., Díez-Herrero, A., Sanchez-Silva, M. & Stoffel, M. (2011): Calibration of floodplain roughness and estimation of palaeoflood discharge based on tree-ring evidence and hydraulic modelling. *Journal of Hydrology,* 403: 103-115.

Benito, G. & Machado, M.J. (2012): Floods in the Iberian Peninsula. En: *Changes of Flood Risk in Europe* (Z.W. Kundzewicz ed.). IAHS Press and CRC Press/Balkema, IAHS Special Publication 10: 372-383, Wallingford.

Benito G., Machado, M. J. & Pérez-González, A. (1996): Climate change and flood sensitivity in Spain. *Geological Society of London, Special Publication*, 115: 85-98.

Benito, G. (1995): Análisis de la variabilidad espacial y temporal en hidrología y paleohidrología. En: *Metodologías para el estudio de la variabilidad espacio-temporal y procesos caóticos en ciencias medioambientales* (J.J. Ibáñez Martí. y C. Machado, eds). Geoforma Ediciones: 285-293, Logroño.

Benito, G., Botero, B.A., Thorndycraft, V.R., Rico, M., Sánchez-Moya, Y., Sopeña, A., Machado, M.J. & Dahan, O. (2011): Rainfall-runoff modelling and palaeoflood hydrology applied to reconstruct centennial scale records of flooding and aquifer recharge in ungauged ephemeral rivers. *Hydrol. Earth Syst. Sci.,* 15(4): 1185-1196.

Benito, G., Grodek, T. & Enzel, Y. (1998b): The geomorphic and hydrologic impacts of the catastrophic failure of flood-control-dams during the 1996-Biescas flood (Central Pyrenees, Spain). *Z. Geomorph. N. F.*, 42 (4): 417-437.

Benito, G., Lang, M., Barriendos, M., Llasat, M.C., Frances, F., Ouarda, T., Thorndycraft, V., Enzel, Y., Bardossy, A., Cœur, D. & Bobée, B. (2004): Use of Systematic Paleoflood and Historical Data for the Improvement of Flood Risk Estimation. Review of Scientific Methods. *Natural Hazards*, 31: 623-643.

Benito, G., Machado, M.J., Pérez-González, A. & Sopeña, A. (1998a): Palaeoflood analysis of the Tagus River (Central Spain). En: *Palaeohydrology and Environmental Change*. (G. Benito, V.R Baker, y K.J. Gregory, eds.). John Wiley and Sons: 317-333, Chichester.

Benito, G., Rico M., Sánchez-Moya Y., Sopeña, A., Thorndycraft, V. R. & Barriendos, M. (2010): The impact of late Holocene climatic variability and land use change on the flood hydrology of the Guadalentín River, southeast Spain. *Global and Planetary Change*, 70: 53-63.

Benito, G., Rico M., Thorndycraft V.R., Sánchez-Moya Y., Sopeña A., Díez-Herrero, A. & Jiménez,

A. (2006): Palaeoflood records applied to assess dam safety in SE Spain. En: *River flow 2006* (R. Ferreira, E. Alves, J. Leal, A. Cardoso, eds.), Taylor & Francis Group: 2113-2120, London.

Benito, G., Sopeña, A., Sánchez, Y., Machado, M.J. & Pérez González, A. (2003): Palaeoflood Record of the Tagus River (Central Spain) during the Late Pleistocene and Holocene. *Quaternary Science Reviews*, 22: 1737-1756.

Benito, G., Thorndycraft V.R., Rico, M., Sánchez-Moya, Y. y Sopeña, A. (2008): Palaeoflood and floodplain records from Spain: Evidence for long-term climate variability and environmental changes. *Geomorphology*, 101: 68-77.

Bond, G., Kromer, B., Beer, J., Muscheler, R., Evans, M.N., Showers, W., Hoffmann, S., Lotti-Bond, R., Hajdas, I. & Bonani, G. (2001): Persistent solar influence on North Atlantic climate during the Holocene. *Science,* 294: 2130-2136.

Botero, B.A. (2006) : *Estimación de crecidas de alto periodo de retorno mediante funciones de distribución con límite superior e información no sistemática*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, (inédito).

Butzer, K.W., Miralles, I. & Mateu, J.F. (1983a): Urban geo-archaeology in Medieval Alzira (Prov. Valencia, Spain). *Journal of Archaeological Science*, 10: 333-349.

Butzer, K.W., Miralles, I. & Mateu, J.F. (1983b): Las crecidas medievales del río Júcar según el registro geoarqueológico de Alzira. *Cuadernos de Geografía*, 32-33: 311-332.

Carmona, P., Dupré, M. & Solé, A. (1995): Reconstrucción paleoambiental del Holoceno en el registro sedimentario de la ciudad de Valencia. *Cuaternario y Geomorfología,* 4: 83-91.

Corella, J.P., Benito, G., Rodriguez-Lloveras, X., Brauer, A. & Valero-Garcés, B.L. (2014): Annually-resolved lake record of extreme hydro-meteorological events since AD 1374 in NE Iberian Peninsula. *Quaternary Science Reviews*, 93: 77-90.

Dahan, O., McDonald, E. & Young, M. (2003): Development of a flexible TDR Probe for deep vadose zone monitoring. *Vadose Zone Journal*, 2: 270-275.

Díez-Herrero, A., Ballesteros, J.A., Bodoque, J.M., Eguíbar, M.A., Fernández, J.A., Génova, M., Laín, L., Llorente, M., Rubiales, J.M. & Stoffel, M. (2007): Mejoras en la estimación de la frecuencia y magnitud de avenidas torrenciales mediante técnicas dendrogeomorfológicas. *Boletín Geológico y Minero*, 118 (4): 789-802.

Díez-Herrero, A., Ballesteros-Cánovas, J.A., Bodoque, J.M. & Ruiz-Villanueva, V. (2013): A review of dendrogeomorphological research applied to flood risk analysis in Spain. *Geomorphology,* 196: 211-220.

Enzel, Y., Ely, L.L., House, P.K. & Baker, V.R. (1993): Paleoflood evidence for a natural upper bound to flood magnitudes in the Colorado river basin. *Water Resources Research*, 29: 2287-2297.

García-García, F., Bohorquez, P., Martínez-Sánchez, C., Pérez-Valera, F., Pérez-Valera, L.A., Calero, J.A. & Sánchez-Gómez, M. (2013): Stratigraphic architecture and alluvial geoarchaeology of an ephemeral fluvial infilling: Climatic versus anthropogenic factors controlling the Holocene fluvial evolution in southeastern Spain drylands. *Catena*, 104: 272-279.

García-Ruiz, J.M., Puigdefábregas, J. & Martín Ranz, M.C. (1983): Diferencias espaciales en la respuesta hidrológica a las precipitaciones torrenciales de noviembre de 1982 en el Pirineo Central. *Estudios Geográficos*, 170-171: 291-310.

García-Ruiz, J.M., White, S.M., Martí, C., Valero, B., Errea, M.P. & Gómez Villar, A. (1996): *La catástrofe del barranco de Arás (Biescas, Pirineo Aragonés) y su contexto espacio-temporal.* CSIC-IPE, Zaragoza.

Greenbaum, N., Schwartz, U., Schick, A.P. & Enzel, Y. (2002): Palaeofloods and the estimation of long-term transmission losses and recharge to the Lower Nahal Zin alluvial aquifer, Negev Desert, Israel. En: *Ancient Floods, Modern Hazards: Principles and Applications of Paleoflood Hydrology* (P.K. House, R.H., Webb, V.R. Baker, D.R. Levish, eds.), Ameri-

can Geophysical Union Water Science and Application, vol. 5: 311-328 Washington, D.C.

Gutiérrez, F., Gutiérrez, M. & Sancho, C. (1998): Geomorphological and sedimentological analysis of a catastrophic flash flood in the Arás drainage basin (Central Pyrenees, Spain). *Geomorphology*, 22: 265-283.

Kochel, R.C. & Baker, V.R. (1982): Paleoflood hydrology. *Science*, 215: 353-361.

Levish, D., Ostenaa, D. & O'Connell, D. (1997): Paleoflood hydrology and dam safety. En: *Waterpower 97* (D.J. Mahoney, ed.), Proceedings of the International Conference on Hydropower. Am. Soc. Of Civ. Eng.: 2205-2214. New York.

Llasat, M.C., Rigo, T. & Barriendos, M. (2005): Floods in Catalonia (NE Spain) since the 14th century. Climatologial and meteorological aspects from historical documentary sources and old instrumental records. *Journal of Hydrology*, 313: 32-47.

Lorenzo, A., Dahan O., Medialdea, A., & Benito G. (2007): Monitorización de la zona no saturada profunda mediante sondas TDR flexibles en lechos fluviales durante eventos de avenida (Río Andarax, Almería). *Estudios en la Zona no Saturada del Suelo.* Proceedings Vol. VIII: 1-6, Cordoba.

Machado M.J., Benito G., Rico M.T., Sánchez-Moya Y. & Sopeña A. (2012): Controles climáticos y ambientales en los registros de paleocrecidas de la Rambla de la Viuda (Castellón). En: *Avances de la Geomorfología en España 2010-2012* (A. González-Díez, A. Coord.), PubliCan Ediciones: 437-444, Santander.

Macklin, M.G., Benito, G., Gregory, K.J., Johnstone, E., Lewin, J., Soja, R., Starkel, L. & Thorndycraft, V.R. (2006): Past Hydrological events reflected in the Holocene fluvial history of Europe. *Catena*, 66: 145-154.

Medialdea, A., Thomsen, K.J., Murray, A.S. & Benito, G. (2014): Reliability of equivalent-dose determination and age-models in the OSL dating of historical and modern palaeoflood sediments. *Quaternary Geochronology*, 22: 11-24.

National Research Council, (1985): *Safety of dams, flood and earthquake criteria*. National Academy Press: 321, Washington, D.C.

Ortega, .J.A. & Garzón, G. (2009): A contribution to improved flood magnitude estimation in base of palaeoflood record and climatic implications. Guadiana River (Iberian Peninsula). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9: 229-239.

Ostenaa, D. & Levish, D. (1996): *Reconnaissance paleoflood study for Ochoco Dam, Crooked River Project, Oregon.* Seismotectonic Report 96-2, U.S.B.R.: 20 Denver, CO.

Ostenaa, D., Levish, D. & O'Connell, D. (1994): *Paleoflood study for Bradbury Dam*. Reclamation Review Draft, Seismotectonic Report 94-3. U.S.B.R, Denver, CO. (Unpublished report).

Rico, M. (2004): *Las paleocrecidas en la cuenca media del río Segre durante el Pleistoceno Superior-Holoceno: registros morfosedimentarios y análisis hidrológico*. Tesis Doctoral, Universidad de Zaragoza.

Rico, M., Benito, G. & Barnolas, A. (2001): Combined palaeoflood and rainfall-runoff assessment of mountain floods (Spanish Pyrenees). *Journal of Hydrology*, 245: 59-72.

Ruiz-Villanueva, V., Díez-Herrero, A., Bodoque, J.M., Ballesteros, J.A. & Stoffel, M. (2013): Characterization of flash floods in small ungauged mountains basins of Central Spain using an integrated approach. *Catena*, 110: 32-43.

Starkel, L., Soja, R. & Michczynska, D.J. (2006): Past hydrological events reflected in Holocene history of Polish rivers. *Catena*, 66: 24-33.

Thorndycraft, V. R., Barriendos, M., Benito, G., Rico, M. & Casas, A. (2006): The catastrophic floods of AD 1617 in Catalonia (northeast Spain) and their climatic context. *Hydrological Sciences Journal*, 51: 899-912.

Thorndycraft, V.R. & Benito, G. (2006): Late Holocene fluvial chronology of Spain: The role of climatic variability and human impact. *Catena*, 66: 34-41.

Thorndycraft, V.R., Benito G., Rico, M., Sánchez-Moya, Y., Sopeña A. & Casas, A. (2005): A

long-term flood discharge record derived from slackwater flood deposits of the Llobregat River, NE Spain. *Journal of Hydrology*, 313: 16-31.

White, S., García-Ruiz, J.M., Martí, C., Valero-Garcés, B., Errea, M.P. & Gómez-Villar, A. (1997): The 1996 Biescas campsite disaster in the Central Spanish Pyrenees, and its temporal and spatial context. *Hydrological Processes*, 11: 1797-1812.

Wolman, M.G. y Costa, J.E. (1984): Envelope curves for extreme flood events - discussion. *Journal of Hydraulic Engineering,* 110: 77-78.