

Buscando riadas en los árboles: Dendrogeomorfología

Looking for floods in trees: Dendrogeomorphology

ANDRÉS DíEZ-HERRERO

Área de Riesgos Geológicos, Instituto Geológico y Minero de España, Ríos Rosas 23, 28003 Madrid. Investigador asociado al IMDEA Agua. E-mail: andres.diez@igme.es

Resumen El análisis y la gestión del riesgo por avenidas e inundaciones precisan nuevas fuentes de datos, complementarias y alternativas a las tradicionales (hidrológicas, meteorológicas, histórico-documentales), que permitan extender el registro de eventos pasados para mejorar la estimación de la frecuencia y magnitud de eventos futuros. Entre estas fuentes de datos paleohidrológicas, la dendrogeomorfología aporta información de avenidas e inundaciones registradas en evidencias contenidas en los troncos, ramas y raíces de los árboles y arbustos ubicados en el cauce y márgenes de las corrientes fluviales. Con el análisis de esta información se ha conseguido datar los eventos pretéritos de avenida, calcular su frecuencia, estimar su magnitud, conocer su origen, e incorporar los resultados a aplicaciones al análisis y prevención del riesgo y al estudio del cambio climático en relación con las inundaciones. En este artículo se presentan además varias propuestas de actividades didácticas con alumnos y divulgativas con el público interesado, para realizar en campo y el aula, de cara a la descripción de estas evidencias, su interpretación genética en relación con las inundaciones y la estimación de magnitudes de los caudales. Esta propuesta de actividades se puede desarrollar tanto en el ámbito rural, cerca de corrientes fluviales con avenidas, como adaptarse al entorno próximo al centro, en calles, parques y jardines con arbolado urbano.

Palabras clave: Anillo de crecimiento, dendrogeomorfología, inundación, riada

Abstract *Flood analysis and risk management need new data sources, complementary and alternative to traditional ones (hydrological, meteorological, documentary), allowing to extend the record of past events to improve the estimation of the frequency and magnitude of future events. Among these palaeohydrological data sources, dendrogeomorphology provides information about past floods recorded in evidence contained in the trunks, branches and roots of trees and shrubs located in the riverbed and riverbanks. Using the analysis of this information it has been possible to date the past flood events, calculate the frequency, magnitude estimate, know their origin, and incorporate the results into applications to risk analysis and prevention, and the study of climate change in relation to the floods. This article discusses several didactical proposals for students, and outreach activities for the interested public are also presented, in fieldwork and classroom, facing the description of these evidence, genetic interpretation regarding flooding and magnitude estimation of discharges. These proposed activities can be developed both in rural areas, near streams with floods, such as adapting to the environment close to the school, in streets, parks and gardens with urban trees.*

Keywords: *Dendrogeomorphology, flood, natural hazards, tree-ring*

INTRODUCCIÓN: LAS INUNDACIONES FLUVIALES, SU ESTUDIO Y MITIGACIÓN DE DAÑOS

Las avenidas fluviales, y las inundaciones asociadas, son uno de los fenómenos naturales que tanto históricamente como en la actualidad han producido y generan un mayor número de víctimas mortales y daños materiales. Las estadísticas de pérdidas publicadas por los organismos responsables, tanto a nivel nacional (Dirección General

de Protección Civil y Emergencias; Consorcio de Compensación de Seguros, 2014) como planetario (Banco Mundial, UNISDR, EM-DAT del CRED, *International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies...*), así lo ponen de manifiesto. Los medios de comunicación también se hacen eco, casi a diario, de las consecuencias de los desastres y catástrofes asociados a las inundaciones fluviales, en diferentes zonas del planeta. Baste recordar eventos como las recientes inundaciones en Texas (EE.UU.), Australia

o Bangladesh; o las riadas que asolaron el camping de Las Nieves en Biescas (Huesca; con 87 víctimas mortales) y la barriada del Cerro de los Reyes (Badajoz; donde se produjeron 22 fallecimientos).

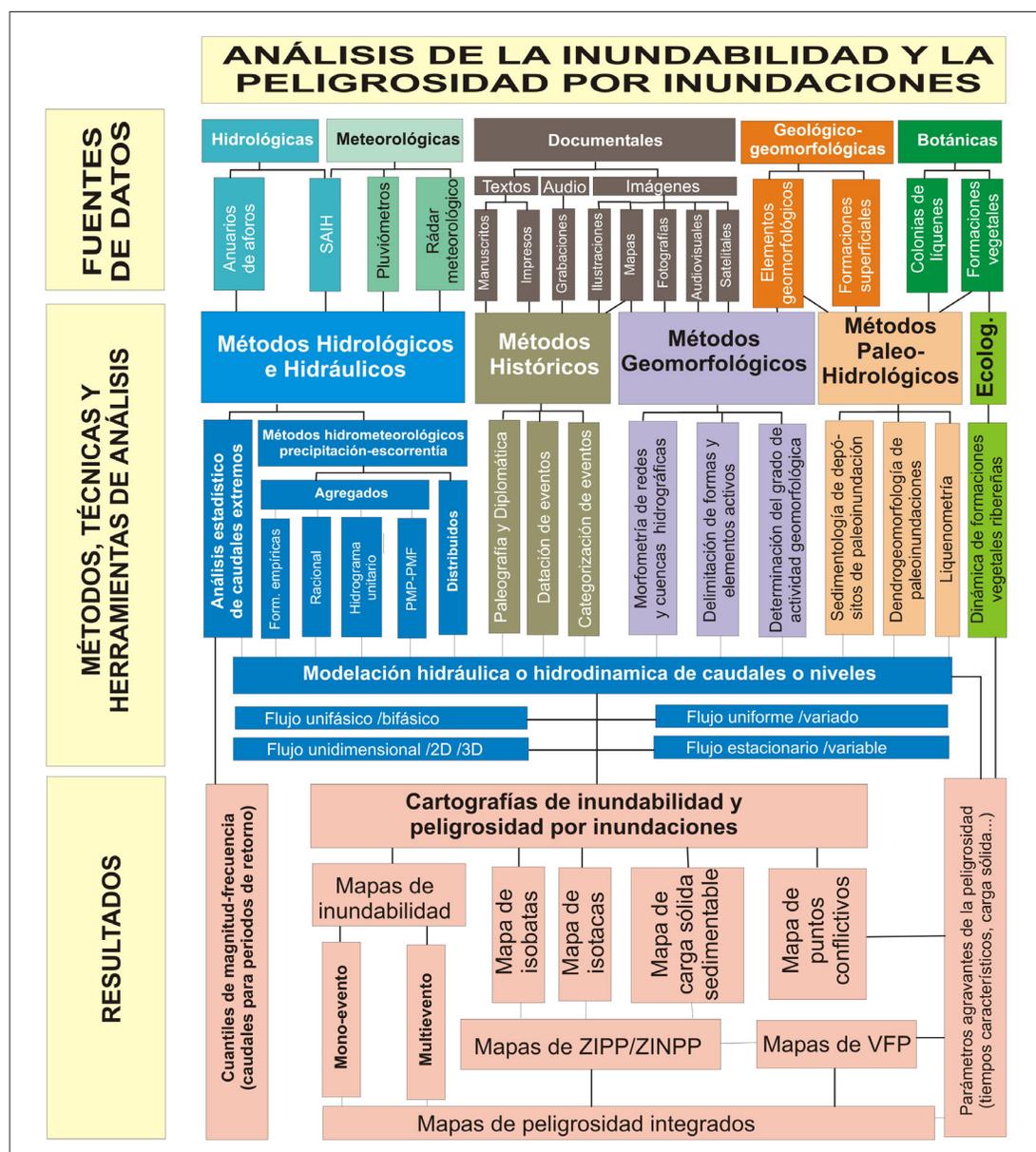
Para mitigar estos riesgos por avenidas e inundaciones fluviales, como para cualquier otro tipo de riesgo natural, se pueden adoptar medidas y estrategias de tres tipos (Ayala-Carcedo, 2002): 1) predictivas, sabiendo dónde y cuándo va a ocurrir el fenómeno, mediante, por ejemplo, predicciones con radar y modelos meteorológicos, sistemas automáticos de información hidrológica y modelos hidrometeorológicos precipitación-aportación, que alimentan sistemas de alerta temprana; 2) preventivas, que buscan saber dónde puede ocurrir el fenómeno, con qué frecuencia y magnitud, para adecuar la exposición y vulnerabilidad de los elementos en riesgo y aumentar la resiliencia, con soluciones estructurales (diques, presas de laminación, canalizaciones, desvíos...) o no estructurales (ordenación territorial y urbanística, planificación de protección civil, sistemas de aseguramiento, educación en el riesgo; Olcina Cantos, 2007); 3) correctoras, que buscan actuar

durante y tras el evento para minimizar los daños, mediante las intervenciones en emergencias (evacuación, salvamento, atención), indemnizaciones y declaraciones de zonas catastróficas.

En todos los casos, sean cuales sean las medidas a adoptar, es necesario primero realizar un análisis del riesgo, esto es, una descomposición del riesgo en sus componentes: peligrosidad, exposición y vulnerabilidad; y luego, de éstos en sus subcomponentes, como son la severidad, dimensión espacio-temporal y frecuencia o probabilidad de ocurrencia, para el caso de la peligrosidad. Para el riesgo por avenidas e inundaciones, estos análisis de la peligrosidad se suelen basar en eventos preteritos, de cuya magnitud, frecuencia y dimensiones espacio-temporales en el pasado, se suelen inferir estos parámetros para el futuro, normalmente mediante técnicas estadísticas (Díez-Herrero, 2008; Díez-Herrero et al., 2008).

El principal problema de estos métodos estocásticos de análisis de la peligrosidad por avenidas e inundaciones es, como ocurre en muchos otros ámbitos, los datos de partida (Fig. 1). En el estudio de

Fig. 1. Cuadro sinóptico de los diferentes grupos de las fuentes de datos, métodos y resultados para el análisis de la peligrosidad de inundaciones, sus relaciones, y los tipos de cartografías resultantes. Modificado de Díez-Herrero et al. (2008).



las inundaciones fluviales (Sánchez y Lastra, 2011) se suelen utilizar datos hidrológicos, como caudales máximos de crecida registrados en estaciones de aforo; pero que, en el mejor de los casos, permiten tener series que se remontan en el tiempo varias décadas a un siglo. Cuando no existen datos de aforos o éstos no son representativos del tramo de la corriente fluvial a analizar, se suele recurrir a los datos del fenómeno causante de la avenida, que suele ser una precipitación intensa y/o prolongada. En este caso, si bien existen más puntos de toma de datos disponibles (pluviómetros, nivómetros), las series suelen ser igualmente cortas e incompletas. Por ello, los análisis estadísticos aplicados a avenidas e inundaciones suelen nutrirse de series de datos de caudales o lluvias que apenas abarcan unas pocas décadas, con lo que la estimación de las cantidades asociadas a medios y altos periodos de retorno (50, 100, 500 años), no deja de ser una extrapolación de las funciones de distribución de frecuencias de valores extremos; que, muchas veces, se convierten en artificios matemáticos, alejados de la realidad física del fenómeno.

De lo anteriormente expuesto se deduce que, para hacer una buena mitigación del riesgo de inundación (predicción, prevención y/o corrección) minimizando los daños por consumación del mismo, es necesario disponer de nuevas fuentes de datos de eventos pretéritos que complementen a las fuentes

clásicas (caudales y precipitaciones), prolongando las series en el tiempo; o que sirvan de alternativa a estas fuentes convencionales en los lugares donde no existan datos de estaciones de aforo o pluviómetros que sean representativos.

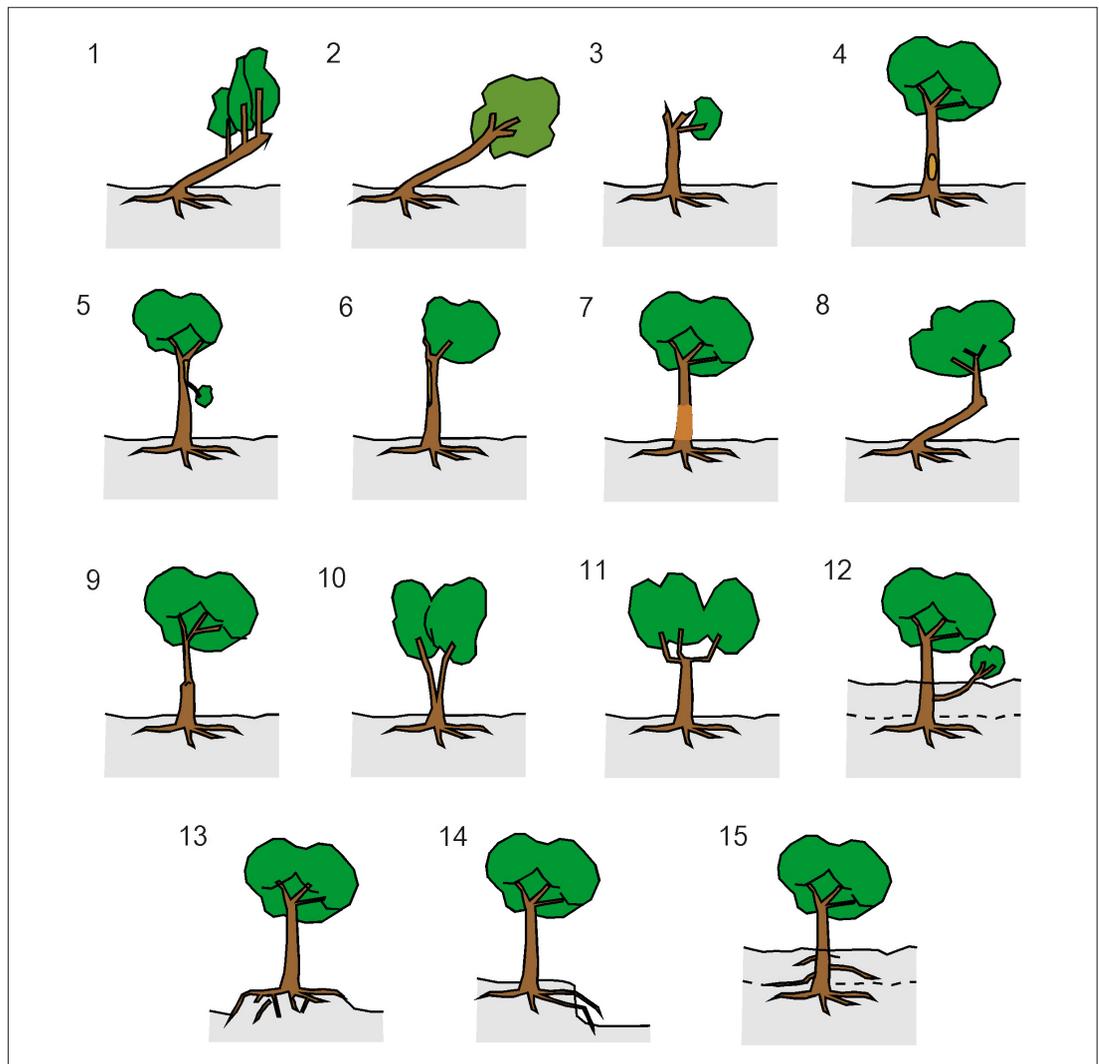
METODOLOGÍA: BUSCANDO RIADAS EN LOS ÁRBOLES

La paleohidrología como fuente de datos

La paleohidrología es la disciplina científica que estudia el ciclo hidrológico en la Tierra o sus subsistemas en el pasado, investigando la situación y cuantificación de sus almacenamientos (océanos, mares, lagos, acuíferos, glaciares...) y flujos (escorrentía superficial y subterránea, evapotranspiración, infiltración...).

En el caso de los eventos hidrológicos extremos del pasado (paleocrecidas y paleosequías), la paleohidrología suele recurrir a fuentes de datos complementarias y alternativas a las convencionales. Entre estas fuentes de datos destacan: las histórico-documentales (archivos, bibliotecas, hemerotecas, testimonios audio-visuales, entrevistas), que permiten remontarse en el pasado décadas, siglos e incluso algunos milenios; las geológico-geomorfológicas (depósitos sedimentarios y marcas de paleoinundaciones; ver Benito et al., 2009); y las botánicas *sensu lato*.

Fig. 2. Principales tipos de evidencias dendrogeomorfológicas a escala de árbol completo, por la incidencia de las avenidas e inundaciones en el crecimiento del tronco, raíces o ramas de la vegetación arbórea, utilizadas para datar avenidas del pasado y estimar su magnitud (modificada de Díez-Herrero et al., 2007), representando un árbol: 1, inclinado y con rebrotes verticales; 2, inclinado; 3, decapitado; 4, con herida en la corteza del tronco (descortezado); 5, con arranque de ramas; 6, con pérdida parcial de la copa; 7, con bruñido de la corteza del tronco; 8, con un codo brusco en el tronco; 9, con un estrechamiento brusco del tronco; 10, con un tronco bifurcado; 11, con ramas en candelabro; 12, con enterramiento de ramas; 13, con descalzado del cepellón en pedestal; 14, con raíces expuestas por descalce; y 15, con raíces adventicias tras enterramiento.



Dentro de las fuentes de datos botánicas se suelen incluir aspectos tan diversos como (Díez-Herrero et al., 2008; Fig. 1): el estudio de la zonación y composición de las formaciones vegetales de las riberas fluviales; la aplicación de la liquenometría al estudio de las inundaciones; y la dendrogeomorfología, o aplicación de la dendrocronología al estudio de los procesos geomorfológicos, en este caso los procesos fluviales asociados a avenidas e inundaciones. Esta última fuente de datos utiliza, en definitiva, los árboles y arbustos como registro y testigo de los eventos de avenida del pasado.

La dendrogeomorfología como técnica

De todos es conocido que muchas especies arbóreas y algunas arbustivas, en los climas templados de las latitudes medias, generan anualmente en sus troncos, ramas y raíces, una nueva 'capa' externa de células en su tejido leñoso (xilema), que se dispone de forma aproximadamente concéntrica respecto al eje del elemento anatómico. Son los famosos anillos de crecimiento, que se componen normalmente de dos bandas: una de coloración más clara (madera temprana, formada en el inicio del periodo vegetativo de cada año, p.e. primave-

Fig. 3. Ejemplos de los tipos más comunes de evidencias dendrogeomorfológicas de avenidas (FDEs), útiles para el estudio de riadas del pasado: A, crecimiento en candelabro (árbol de 'Sigafos'; Navaluenga Ávila); B, descortezado y raíces expuestas flotantes, Taburiente (La Palma, Islas Canarias); C, bifurcaciones en los troncos de los árboles, Navaluenga (Ávila); D, descortezados con madera callosa, causados por los impactos de la carga sólida (cantos y ramas), Venero Claro (Ávila); E, árbol inclinado y con codo en el tronco, Pajares de Pedraza (Segovia); F, descortezado y raíces expuestas por erosión (Venero Claro, Ávila); G, bruñido de la corteza por abrasión, Taburiente, Islas Canarias); H, descortezado, codo y árbol inclinado, con cambio brusco de la dirección del tronco (Taburiente, La Palma, Islas Canarias); I, heridas internas y tejido callosa cubriendo las cicatrices correspondientes a diferentes avenidas, Arenas de San Pedro (Ávila); J, cambios en los parámetros de la secuencia de anillos de crecimiento (anchura, porcentaje de madera temprana, madera tardía, etc.); K, estructuras traumáticas en los tejidos leñosos. Ver, para más detalles, Díez-Herrero et al. (2007, 2013a). Todos los ejemplos proceden de sitios de estudio españoles (Díez-Herrero et al., 2013b).



ra) y otra más oscura (madera tardía, generada en la parte intermedia y final del periodo vegetativo de cada año, p.e. verano u otoño). De esta forma, de manera simple, contabilizando el número de anillos de un tronco, rama o raíz, sabemos aproximadamente cuál es su edad. Esta disciplina recibe el nombre de dendrocronología (de *dendro-*, árbol; *-cronos*, tiempo; *-logos*, tratado o estudio) y tiene múltiples aplicaciones en botánica, gestión forestal, arqueología, historia, etc.

También es muy conocido que el espesor de dichos anillos y sus dos niveles (madera temprana y madera tardía) es variable de unos años a otros, y que depende de diversos parámetros tanto de la especie arbórea y el individuo concreto, como de otros factores ambientales, condicionados por el entorno (suelo, clima, plagas, situación de otros árboles próximos...). Entre los parámetros ambientales que más influyen en esa anchura de los anillos, en igualdad de otros factores, están la precipitación y temperatura medias de ese año; lo que posibilita que esta anchura se haya usado para estimar precipita-

ciones y temperaturas del pasado, en una disciplina llamada dendroclimatología.

Pero lo que es menos conocido, casi ignorado salvo por un reducido grupo de especialistas, es que otros factores y procesos naturales también influyen sobremanera en la disposición de las secuencias de anillos de crecimiento de los árboles. Entre ellos, los procesos geológicos (endógenos y exógenos), como el vulcanismo, los terremotos, el diapirismo y, cómo no, los procesos geomorfológicos (gravitacionales, glaciares, periglaciares, eólicos, litorales y fluviales). Esta técnica o subdisciplina que estudia la interacción entre las formas y los procesos geomorfológicos, y los árboles y arbustos, recibe el nombre de dendrogeomorfología (Ballesteros-Cánovas et al., 2010).

Dicho de otra manera, los procesos fluviales asociados a las avenidas e inundaciones, con acciones como la erosión, transporte y sedimentación en los ríos, pueden interferir con los árboles y arbustos de los cauces y sus márgenes, dejando en los vegetales un registro paleohidrológico de la datación, frecuencia y magnitud de dichos eventos extremos.

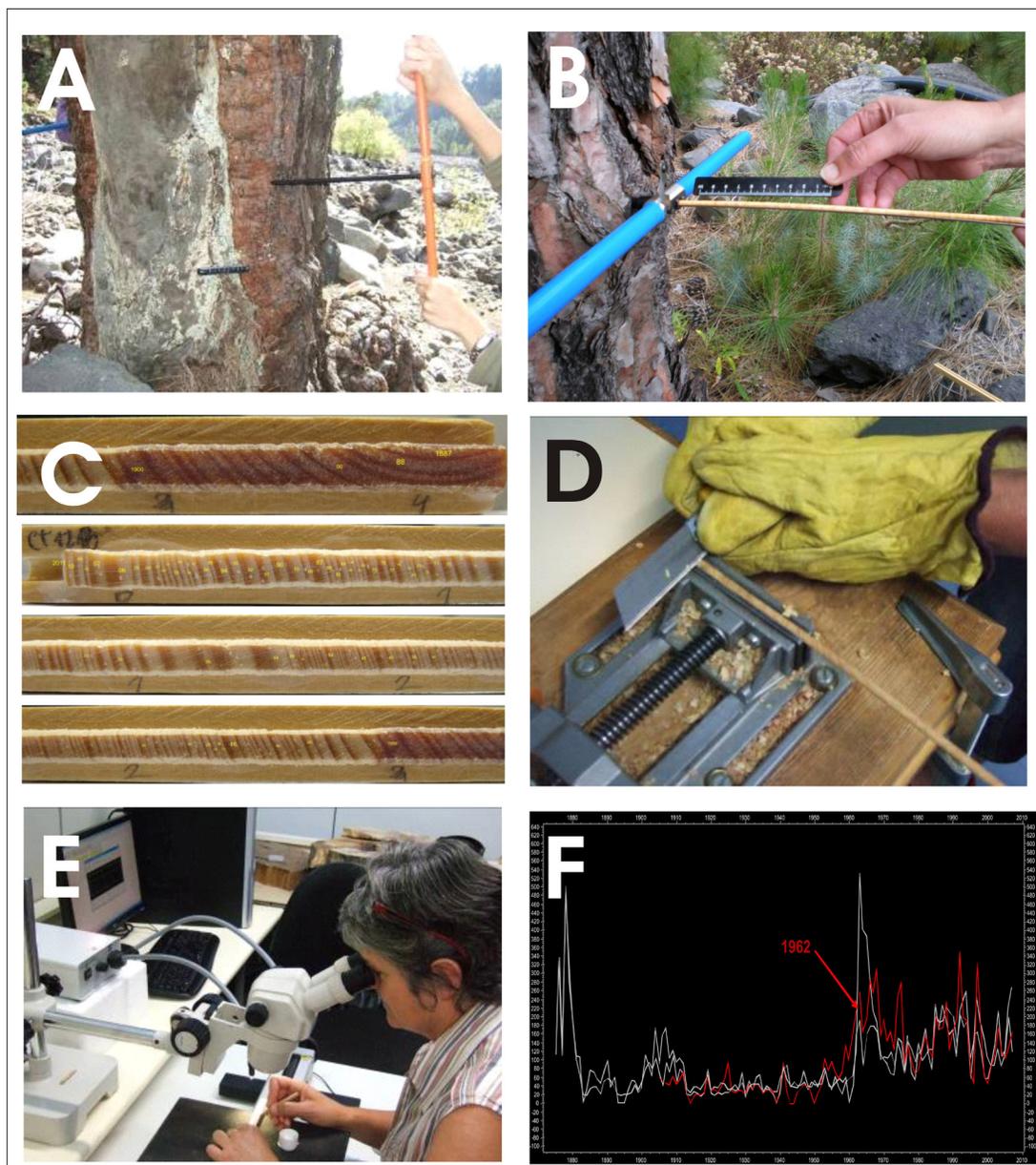


Fig. 4. Etapas y tareas del estudio dendrogeomorfológico de un árbol: A) muestreo con barrena Pressler; B) extracción del testigo de madera con la barrena Pressler; C) muestras de testigos (cores) sobre los soportes de madera; D) preparación de la muestra, con cortado y pulido; E) conteo y medición de los anillos con mesa y bajo lupa binocular; F) secuencia de anchuras de los anillos, donde se aprecia un brusco aumento en el anillo correspondiente al año 1962. Fotos D, E y F, Laboratorio de Dendrocronología de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Montes, Forestal y del Medio Natural de la UPM, dirigido por la Dra. Mar Génova Fuster.

Por ello, la aplicación de las técnicas dendrogeomorfológicas al estudio de la peligrosidad por avenidas e inundaciones requiere una serie de pasos o tareas, que se podrían resumir en los siguientes (Díez-Herrero et al., 2013a):

- 1) Búsqueda, localización y clasificación de las evidencias dendrogeomorfológicas de inundaciones (*flood dendrogeomorphological evidence*, FDEs), a partir de las morfologías externas observadas en los árboles y arbustos de las riberas fluviales, utilizando las clasificaciones de las tipologías más comunes (Díez-Herrero et al., 2007 y 2013a; Figs. 2 y 3).
- 2) Muestreo sistemático de las secuencias de anillos de los árboles con evidencias, utilizando barrenas Pressler, extracción de cuñas o la obtención de rodajas y rebanadas (Fig. 4, A y B).
- 3) Secado, cortado y pulido de las muestras (testigos cilíndricos, cuñas o rodajas) en laboratorio (Fig. 4, C y D).
- 4) Conteo y medición de los anillos y sus anchuras en laboratorio, empleando una mesa de medición micrométrica bajo lupa binocular, y aplicaciones informáticas específicas (Fig. 4, E y F).
- 5) Datación cruzada por comparación de las secuencias de anillos con series de referencia o patrón (para esa especie y lugar, no perturbadas), utilizando programas estadísticos específicos.
- 6) Detección de anomalías del crecimiento de los

anillos potencialmente asociadas a una avenida o inundación, como: heridas o cicatrices internas; aumento brusco de la anchura (liberaciones); disminución brusca de la anchura (supresiones); cambios de crecimientos concéntricos a excéntricos (por inclinación); elementos anatómicos como canales resiníferos traumáticos, madera callosa, madera de reacción, etc.

- 7) Asignación de una fecha para la evidencia dendrogeomorfológica de inundación, e interpretación de la datación del evento causante (avenida).

RESULTADOS

Datación de los eventos de avenida e inundación del pasado y análisis de su frecuencia

Aunque hay precedentes desde inicios del siglo XX (Ballesteros-Cánovas et al., 2015a y 2015b), los primeros trabajos cuantitativos que emplearon la dendrogeomorfología para datar eventos pasados de avenidas e inundaciones se remontan mediados y finales de la década de 1960 (Sigafos, 1964; ver Ballesteros-Cánovas et al., 2015a). Ya desde esos trabajos pioneros se comenzaron a incluir esas dataciones en el análisis estadístico de caudales (Harrison y Ried, 1967), incorporando los registros como datos no sistemáticos en el modelo estadístico, incluso empleando funciones de distribución de frecuencias específicas.

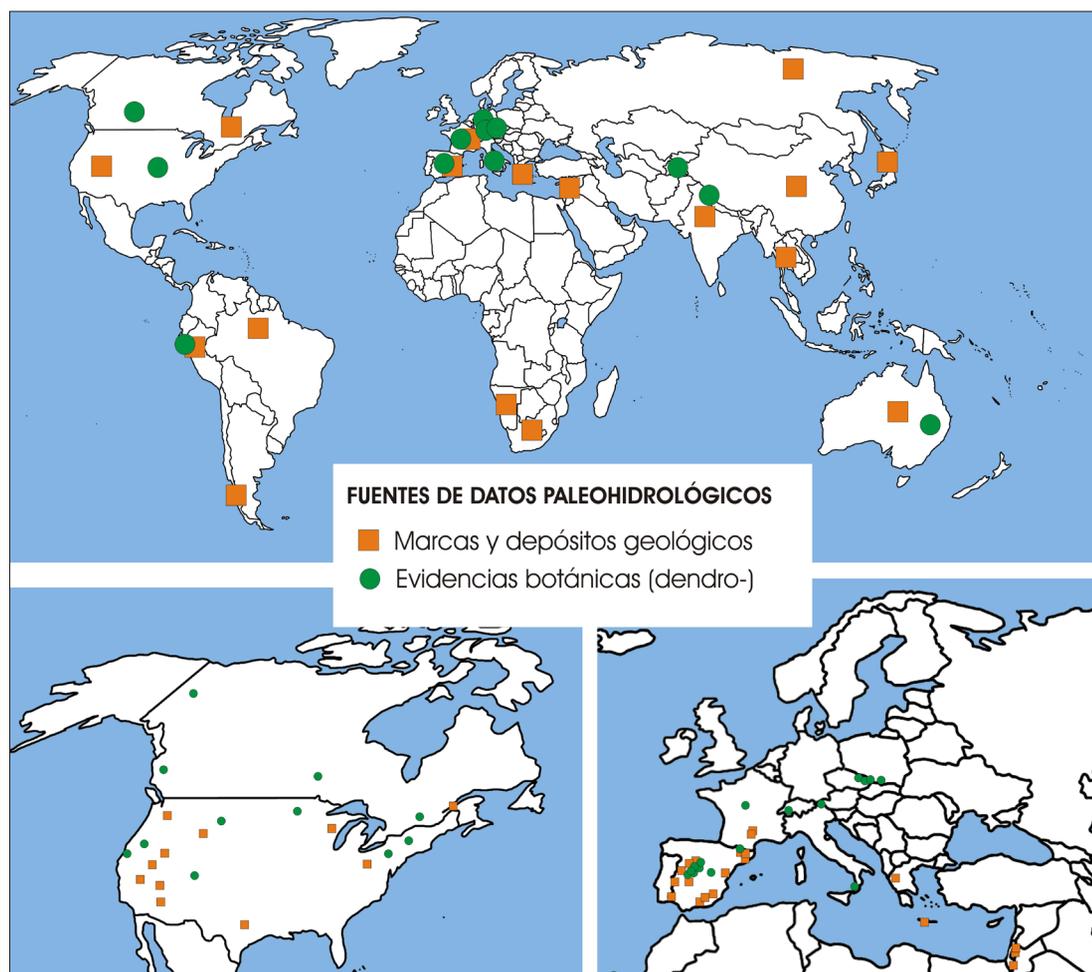


Fig. 5. Localización de las principales zonas del mundo (por países), Norteamérica y Europa, donde se han realizado estudios de avenidas e inundaciones pretéritas, utilizando tanto marcas y depósitos geológicos, como evidencias botánicas (liquenométricas y dendrogeomorfológicas). Simplificado y completado de Benito y Díez-Herrero (2015).

Pero no es hasta la década de 1980 cuando se estandarizan, con los estudios de autores norteamericanos como Yanosky, Hupp, Gottesfeld o McCord (ver Ballesteros-Cánovas et al., 2015b). Desde ese momento, se difunde el uso de estas técnicas y fuentes de información, aunque con un alcance geográfico muy limitado a Norteamérica (St George, Butler) y Centroeuropa (Astrade y Bégin, Zielonka...). Es curioso y significativo que, en ambos casos, la iniciativa de la creación de los laboratorios y equipos de investigación suele partir del ámbito de las Ciencias de la Tierra (Geología y/o Geografía), como principales usuarios de los resultados de estas técnicas; del mismo modo, muchos de los trabajos pioneros se publicaron precisamente en revistas del ámbito geológico y no botánico-forestal, como los *U.S. Geological Survey Professional Papers* (Sigafos, 1964), o *Environ. Geol. Water Sci.*

En la actualidad existen decenas de estudios y zonas con avenidas pretéritas que han sido datadas con evidencias dendrogeomorfológicas (*flood dendro-evidence*, FDE) o depósitos de paleoinundaciones (*slack-water deposits*, SWD), si bien sigue habiendo una mayor concentración de resultados en

el hemisferio Norte, sobre todo en Europa y Norteamérica (Fig. 5). En el caso de España, si bien los primeros estudios dendrogeomorfológicos aplicados a avenidas e inundaciones no se iniciaron hasta principios del siglo XXI, han sido en muchos aspectos pioneros por lo novedoso de algunas evidencias y técnicas empleadas para datar eventos de avenidas, como los estudios anatómicos en diferentes tipos de especies de frondosas y coníferas mediterráneas (ver recopilación en Díez-Herrero et al., 2013b). Incluso se han llegado a emplear técnicas dendrocronológicas para la datación de eventos de avenida históricos que supusieron obras de reparación de tarimas de madera en edificios monumentales afectados por las riadas, como el Real Ingenio de la Casa de la Moneda de Segovia (Génova et al., 2011).

Estimación de la magnitud de los eventos de avenida

Además de la datación de la avenida o inundación pretérita, cuando se dispone de un determinado tipo de evidencias dendrocronológicas, es posible aproximar la magnitud del evento hidrológico extremo, estimando el calado o profundidad de la

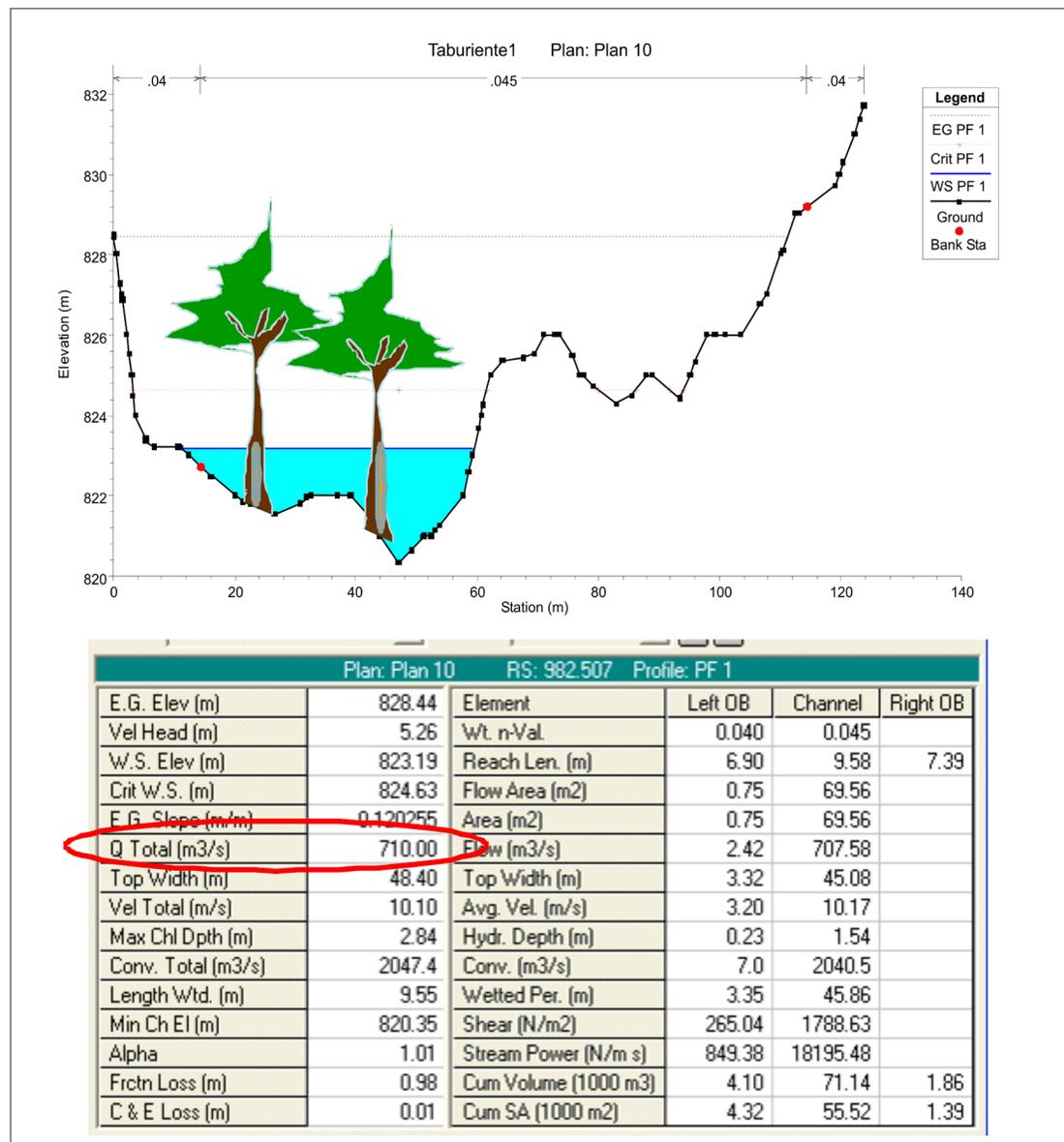


Fig. 6. Estimación de los caudales circulantes en la avenida del año 1962 en el barranco de Las Angustias del parque nacional de la Caldera de Taburiente (La Palma, Islas Canarias), utilizando un modelo hidráulico unidimensional (HEC-RAS) con caudales progresivamente mayores hasta enrasar la altura de dos descortezados en pinos canarios datados para ese evento.

lámina de agua, la velocidad de la corriente, el caudal circulante, la energía del flujo o incluso el volumen y tipología de la carga sólida arrastrada.

Sin duda alguna, las evidencias más utilizadas para la estimación de la magnitud de las avenidas preterritas son los descortezados o heridas en la corteza de los árboles (Fig. 3D). Cuando se tiene la certeza de que la herida está producida por el impacto de la carga sólida transportada por la avenida, como carga de fondo (arenas, gravas o bloques) o en flotación (troncos, restos vegetales o bloques de hielo), la altura máxima de la herida será indicativa del nivel mínimo alcanzado por la lámina de agua de la inundación. A partir de este dato, y empleando desde sencillas fórmulas hidráulicas (Manning) hasta complejos modelos numéricos uni- o bidimensionales, se pueden inferir los caudales mínimos cuya simulación hidrodinámica enrasa con esas cotas (Fig. 6), y otros valores de magnitud, como la velocidad de la corriente, la potencia, energía cinética, etc. (Ballesteros-Cánovas et al., 2011a y 2011b).

También se ha iniciado el empleo de otras evidencias, como los árboles inclinados, con los que, en un balance de fuerzas entre la corriente y la resistencia del árbol y su cepellón, se han podido inferir los calados y velocidades de la corriente (Ballesteros-Cánovas et al., 2015d).

Investigación del origen de los eventos de precipitación que causan riadas

El estudio dendrogeomorfológico de secuencias de anillos en los árboles afectados por avenidas e inundaciones del pasado, puede servir incluso para conocer el origen del evento, esto es, el tipo de precipitación causante.

En muchas zonas templadas de latitudes medias, la mayor parte de los eventos de inundación se pueden asociar a fenómenos meteorológicos de dos tipos: precipitaciones prolongadas en el tiempo, varios días o incluso semanas, asociadas al paso sucesivo de frentes fríos y cálidos, con sus respectivas líneas de chubascos; o bien precipitaciones intensas, de corta duración, asociadas a núcleos convectivos locales estivales (tormentas) o a sistemas y complejos a mesoescala otoñales (las populares 'gotas frías' o DANAS).

De todos es conocido que los dos elementos químicos constituyentes del agua (hidrógeno y oxígeno) tienen varios isótopos de diferente masa (^1H , ^2H , ^3H , ^{16}O , ^{18}O); y que esas diferencias de masa hace que tengan mayor o menor facilidad a ser evaporados o a precipitar en forma de lluvia. Por ello, la lluvia de tormentas de verano tendrá diferente proporción de $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$ que, por ejemplo, la lluvia de frentes atlánticos de invierno.

Si buscamos un conjunto de árboles que, por su posición en zonas alejadas de cauces y zonas encharcadas, por ejemplo en un alto que sirva de divisoria, absorban el agua de lluvia como principal fuente de suministro hídrico, estos árboles captarán agua con la proporción de isótopos característica del evento de lluvia que predominó o fue única durante una determinada estación (primavera, verano, otoño). Y por lo tanto, esa diferente proporción de isótopos del agua que ha absorbido el árbol duran-

te esas lluvias que produjeron crecidas, también se trasladará a los compuestos de la madera del anillo que se forme durante esa estación, como la denominada alfa-celulosa.

Por ello, si cogemos alfa-celulosa de una parte de un anillo de un árbol que corresponde al año y periodo en el que tuvo lugar un evento de riada, y analizamos en este compuesto la proporción de $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$, comparándola con la ratio de esos isótopos en diferentes lluvias convectivas y frontales (que se mide en estaciones de una red por toda España), podremos saber si dicha lluvia fue de un origen u otro.

Así lo han hecho, con carácter pionero a nivel mundial, Ferrio et al. (2015) con diversos árboles de la sierra de Gredos oriental, llegando a la conclusión de que el evento de riada de septiembre de 1999, que arrasó la localidad de Herradón de Pinares (provincia de Ávila) y causó tres víctimas mortales, tuvo una componente principalmente convectiva.

Con esta metodología se podría llegar a reconstruir el origen de muchos de los eventos de riadas del pasado, pudiendo separar distintas poblaciones (convectivos, frontales, orográficos...) y analizando su frecuencia por separado, lo que nos llevaría a asignar diferentes probabilidades (o periodos de retorno) para distintos tipos de eventos, facilitando su prevención y gestión.

Aplicación al análisis integrado del riesgo por inundaciones

Los anteriores resultados, datación de eventos pasados, estimación de su magnitud y caracterización de su origen, son de enorme utilidad en la mejora de los análisis de uno de los componentes del riesgo, la peligrosidad. Efectivamente, el empleo de información dendrogeomorfológica mejora el estudio de la peligrosidad por inundaciones, reduciendo las incertidumbres de los cálculos, a través de dos aspectos:

a) Frecuencia y magnitud de los eventos preterritos: aportando más datos en los casos de que existan datos instrumentales (estaciones de aforo) o documentales (archivos y hemerotecas); o siendo la única fuente de cálculo de los cuantiles de periodos de retorno, en caso de que no exista otra información.

b) Calibración de modelos hidráulicos: aportando múltiples puntos (cada árbol con evidencias) en la calibración de parámetros como la rugosidad del lecho, en los modelos hidráulicos que determinan las zonas inundables, los calados, velocidades, energías, etc. (Ballesteros-Cánovas et al., 2011b).

Con esta mejora en la peligrosidad, integrada con la exposición y vulnerabilidad, se consigue una mejora en la estimación total del riesgo por inundaciones, como han desarrollado Ballesteros-Cánovas et al. (2013) para el caso del municipio abulense de Navalunga.

Aplicación a la relación entre el cambio climático y la frecuencia de riadas

Otra aplicación de los resultados de datación de inundaciones del pasado y estimación de su frecuencia es comparar diferentes periodos históricos en cuanto a su número de eventos de riada y relacionarlos con aspectos climáticos generales

Fig. 7. Ficha-patrón de recogida de datos en campo de evidencia dendrogeomorfológica en campo, con dos bloques para la toma de información sobre el árbol (arriba) y sobre la evidencia concreta (abajo).

FICHA DE RECOGIDA DE DATOS EN CAMPO DE EVIDENCIA DENDROGEOMORFOLÓGICA EN ÁRBOL:			
Autor:		Lugar:	
		Fecha:	
Número del árbol:		Posición social:	
Especie:	Circunferencia: cm	<input type="checkbox"/> dominante <input type="checkbox"/> regular <input type="checkbox"/> co-dominante <input type="checkbox"/> oprimido <input type="checkbox"/>	
Altura: - m	No de la foto:		
-	-		
Situación del árbol		Croquis de la situación del árbol:	
Municipio:			
Paraje			
Coordenadas:			
Posición geomorfológica:			
Observaciones del árbol:			
Número de evidencia en el árbol:			
Situación de la evidencia:		Croquis de detalle de la evidencia:	
Tipo de evidencia (FDE):			
Forma y dimensiones de la evidencia:			
Muestras (rodaja, cuña o testigo)			
Lado:			
Altura muestreo:			

(precipitaciones medias anuales, temperaturas medias anuales...) o índices regionales (oscilación del Atlántico norte, NAO; oscilación del Mediterráneo occidental, WMO).

De esta forma, igual que se ha hecho con las inundaciones históricas procedentes de fuentes documentales (Benito et al., 2003) o con datos de paleoinundaciones del registro geológico (depósitos y marcas), se puede determinar qué periodos de los últimos siglos han concentrado un mayor número de riadas y cuáles son de mayor magnitud. Pero también relacionar esta frecuencia y severidad con cambios generales del clima a escala regional o mundial, como el inicio o final de la denominada Pequeña Edad de Hielo, la denominada pulsación Maldà, o los fenómenos de El Niño o La Niña (ENSO) más intensos.

De las relaciones con índices climáticos regionales, como los citados NAO y WMO, permitirían incluso realizar predicciones a corto y medio plazo sobre el número y magnitud de inundaciones en los

siguientes años, basándose en las relaciones del pasado y proyectándolas con las previsiones futuras. Así lo han empezado a desarrollar Ballesteros-Cánovas et al. (2015c) en sus trabajos con riadas en los Montes de Valsaín (Sierra de Guadarrama, Segovia).

PROPUESTAS DE ACTIVIDADES DOCENTES Y DIVULGATIVAS

El estudio de las evidencias dendrogeomorfológicas de las avenidas e inundaciones del pasado, si bien desde el punto de vista de la investigación científica requiere herramientas y aplicaciones informáticas sofisticadas, puede hacerse también de forma simplificada para su adaptación a los currícula docentes y para iniciativas divulgativas. Siguiendo una estrategia de tipo descripción-interpretación-predicción (DIP; Delgado et al., 2004), a continuación se proponen tres conjuntos de actividades dirigidas,

respectivamente, a enseñanza primaria-enseñanza secundaria-enseñanza universitaria.

Descripción: a la búsqueda de evidencias de riadas en los árboles

Una primera actividad a realizar con los alumnos sería la búsqueda de esas evidencias dendrogeomorfológicas externas. Para ello sería suficiente diseñar una actividad fuera del aula, visitando los márgenes u orillas de un río, arroyo, rambla o riera próxima al centro. Recorriendo longitudinalmente la vegetación arbórea de la ribera se trataría de localizar árboles que presenten evidencias externas características, como (ver Figs. 2 y 3): descortezados en la parte baja del tronco por el lateral situado hacia aguas arriba; árboles con el tronco inclinado en la dirección de la corriente; troncos decapitados o con bifurcaciones; raíces expuestas en la orilla; etc.

Una vez localizados se trataría de describir lo más detalladamente posible dichas evidencias, para lo cual se puede diseñar una ficha-tipo de recogida de datos (Fig. 7), que podría contener los siguientes campos: número de evidencia, situación del árbol (coordenadas tomadas con receptor GPS usando un *smartphone*, o medidas sobre el mapa), posición del árbol (orilla, llanura de inundación, barra lateral, isla del río...; incluyendo un recuadro para un dibujo o esquema de situación), especie de árbol (nombre común y científico), dimensiones del árbol (altura aproximada, perímetro o diámetro del tronco a la altura del pecho de una persona), descripción de la

evidencia (situación en el tronco, ramas o raíces; tamaño y forma del daño o evidencia; incluyendo otro recuadro para un esquema o dibujo de detalle de la evidencia) y comentarios sobre la posible edad de la evidencia (según esté ya muy desdibujada o borrada, o se vea muy reciente). En este sentido, si bien no se puede hacer una datación dendrocronológica científicamente, sí que se puede estimar cuánto tiempo ha transcurrido desde el daño comparando la evidencia con la edad del árbol. Aquí el posible problema podría estar en saber la edad del árbol. La estimación de la edad del árbol en ocasiones es posible de varias formas sencillas: en ambientes ribereños rurales se puede comparar las dimensiones (diámetro, porte) del ejemplar arbóreo que tiene el daño y cuya edad queremos conocer, con otro ejemplar de esa especie en la zona, en el que se puedan contar los anillos en un tocón, por haber sido talado; o incluso plantear el uso de una barrena de Pressler, con los oportunos permisos y precauciones, por parte del profesor y/o alumnos, si está disponible en el centro o se solicita a los agentes forestales o medioambientales; en entornos urbanos, consultando los registros de plantaciones de los servicios de parques y jardines, o las posibles placas o monolitos de inauguración de las obras de ajardinamiento o recuperación de la vegetación.

Para aquellos centros que estén en núcleos urbanos sin corrientes fluviales en sus proximidades, o bien que no tengan posibilidad de realizar actividades de campo, se plantea como posible alternativa el empleo de las evidencias de daños de

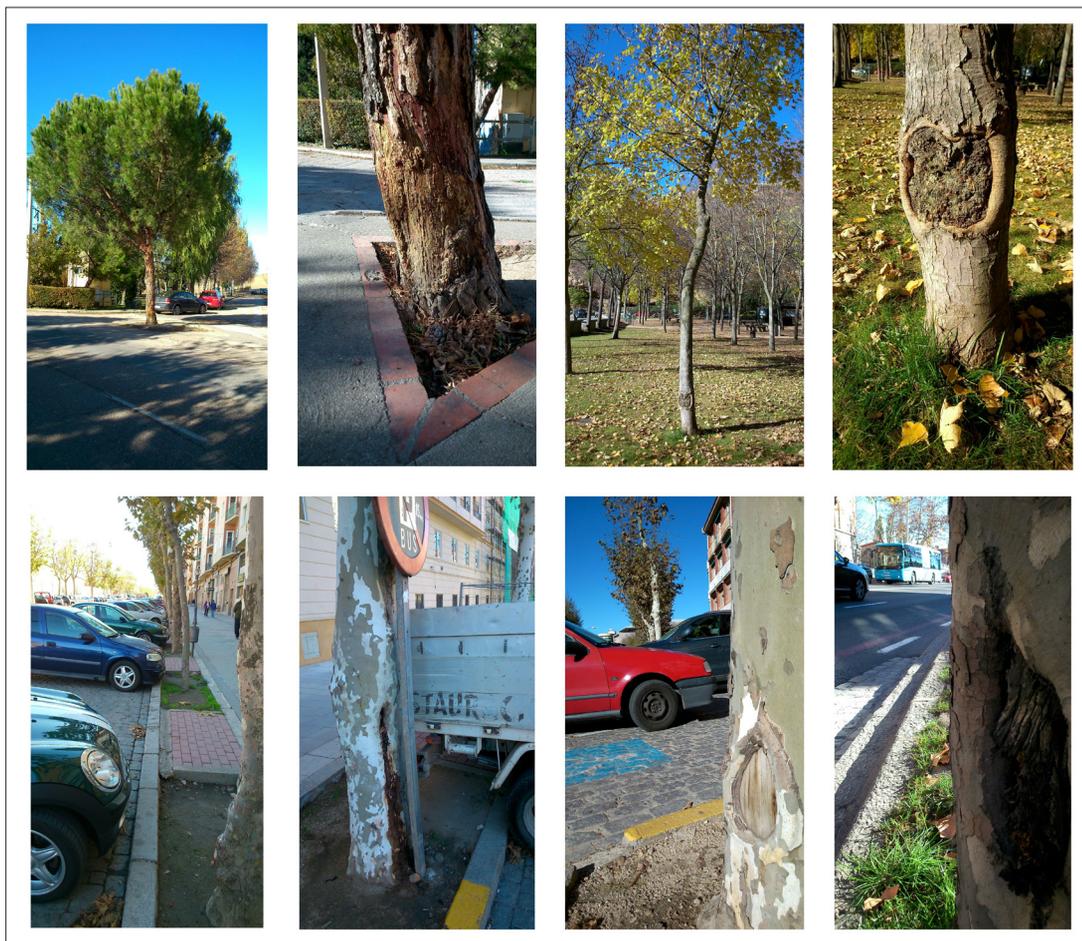
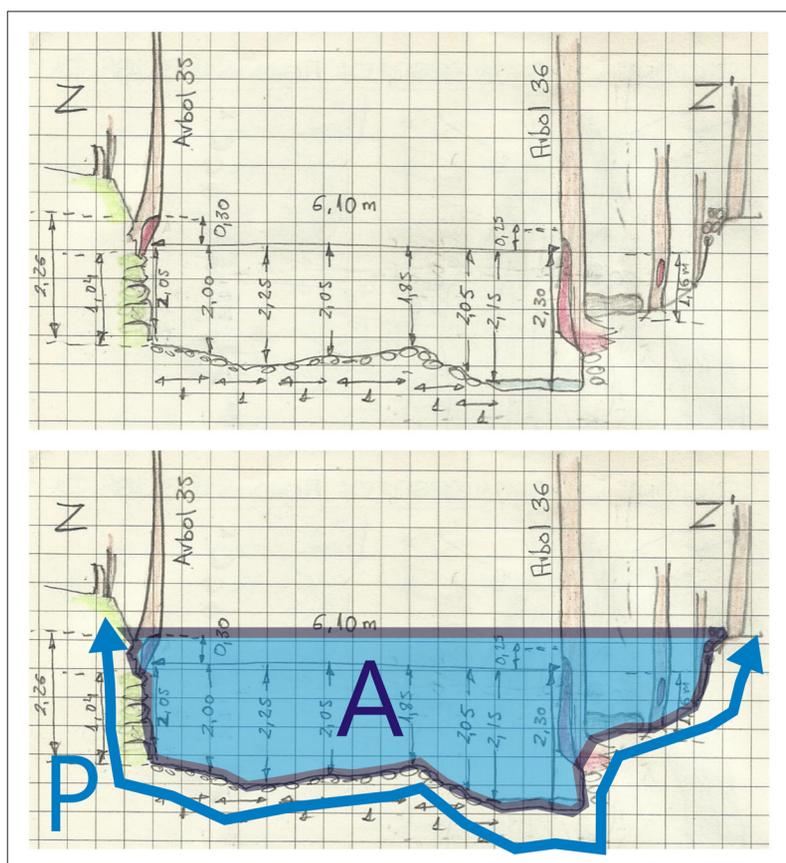


Fig. 8. Ejemplos de evidencias de daños en árboles en el entorno urbano, de parques, jardines y calles (Valseca y Segovia capital); que pueden ser descritas e interpretadas en su génesis, como alternativa al empleo de evidencias formadas por eventos de riadas en las proximidades de una corriente fluvial.

origen antrópico en los árboles de calles, parques y jardines. Muchos de los elementos del arbolado urbano, sobre todo aquellos árboles que se sitúan en alcorques o parterres próximos a vías de comunicación con tráfico rodado, presentan en sus troncos evidencias de daños por impactos, roces o tareas de mantenimiento de jardinería, semejantes a las que producen las riadas en los árboles de las riberas fluviales (Fig. 8). Con estas evidencias, sobre todo descortezados y árboles inclinados por impactos de los vehículos, por podas o actos vandálicos, puede procederse de la misma manera que con las evidencias dendrogeomorfológicas asociadas a las avenidas fluviales.

Para ambos casos, actividad en la orilla del río o actividad en árboles urbanos, resulta de utilidad buscar tocones o troncos que han sido talados o cortados artificialmente en labores de tratamiento forestal o jardinería, o bien que se han cortado por causas naturales (rachas de viento, pudrición interna, descalce de orillas, etc.). Observando la superficie de corte del tronco o rama se puede describir la secuencia de anillos: dimensiones del tronco (diámetro); presencia o no de zona interior más oscura (duramen) y exterior más clara (albura); disposición de los anillos (concéntrica, asimétrica, doble núcleo...); número de anillos en diferentes radios y direcciones; presencia o no de conjuntos de anillos más estrechos y anchos; presencia de anillos discontinuos a lo largo del perímetro del anillo; etc. Especial atención se debe poner a la presencia de heridas o cicatrices internas en la secuencia de anillos, con estructuras en forma de callos curvos (ver Fig. 3-1); y que pueden estar tapadas por los anillos posteriores, o bien tener visibilidad hasta la corteza del árbol.

Fig. 9. Arriba: Perfil topográfico perpendicular al cauce (sección transversal) en un lugar donde se ubican las evidencias dendrogeomorfológicas en los árboles, realizado en papel cuadriculado a partir de mediciones en campo con cinta métrica y flexómetro (arriba). Abajo: Medición del área (A, polígono azul claro) y el perímetro (P, contorno línea azul) mojados para la lámina de agua (en azul) que enrasa con la parte superior de la evidencia dendrogeomorfológica (descortezado); de su cociente se obtiene el radio hidráulico (R).



Interpretación: deduciendo el origen de las evidencias en los árboles

Una vez descritas las evidencias localizadas en los árboles, el siguiente paso consiste en interpretar su origen, esto es, tratar de deducir a qué proceso o fenómeno se asocian.

En el caso de que se estudien evidencias dendrogeomorfológicas en un margen o ribera de una corriente fluvial se trata de probar o refutar que dichas evidencias se asocian a eventos de crecida o avenida del río o arroyo, para lo cual hay que hacer una serie de comprobaciones:

- **Número de replicaciones de la evidencia;** es más fácil que, si la evidencia se asocia a una riada, se encuentren múltiples réplicas de la evidencia en distintos árboles a lo largo de ambas márgenes del río; por el contrario, si solo hay un árbol con la evidencia, ésta puede asociarse a otro fenómeno distinto a la riada, natural (desprendimiento, marca de un animal) o artificial (tareas forestales).
- **Posición de la evidencia respecto al cauce fluvial;** es más lógico que las evidencias o daños que requieran más energía (decapitados, descortezados, inclinados) se sitúen próximos al eje del cauce o en la orilla externa de la curva en caso de meandros; mientras que evidencias poco energéticas, como enterramiento del tronco, se sitúen en posiciones alejadas del río y en la orilla interna del meandro.
- **Posición de la evidencia respecto al sentido de la corriente;** las evidencias externas suelen orientarse con la dirección y sentido de la corriente del río durante la riada; de forma que los descortezados se ubican característicamente donde el agua y su carga transportada (cantos, ramas) impactan en el tronco, o sea, en la cara aguas arriba del tronco (barlovento); mientras que los árboles inclinados tienen la máxima curvatura hacia aguas abajo de la corriente.
- **Posición altitudinal de las evidencias;** aquellas evidencias que marcan una posible altura de agua mínima de la corriente, como los descortezados o bifurcados después de decapitados, suelen estar a cotas semejantes; por lo que un buen criterio para asignarlo a una riada es que enrasen varias evidencias (p.e. parte superior de los descortezados) en una misma sección transversal del cauce; o que se sitúen a alturas que van descendiendo suavemente de cota hacia aguas abajo en una sección longitudinal del cauce.
- **Relación con otros elementos naturales;** si las evidencias se asocian con otros elementos característicos de una inundación, como cuerpos flotantes atrapados en los troncos y ramas de los árboles, bancos de arena y limo en las orillas, líneas de limos, etc., posiblemente sí que tengan origen asociado a una riada.

En resumen, si encontramos muchas evidencias y uniformemente repartidas en las dos orillas y a lo largo de todo el cauce, más abundantes cerca del cauce y en las orillas externas de los meandros, situadas mirando hacia aguas arriba y a cotas aproximadamente parecidas, podemos tener la certeza

casi absoluta de que es correcta nuestra interpretación del origen de las mismas asociado a una riada. Para ello, es conveniente representar la posición de las evidencias en un mapa o plano de detalle, o realizar un esquema de campo de su posición y situación de acuerdo con los citados criterios.

Una vez interpretadas las evidencias como procedentes de un evento de riada, la investigación puede continuar tratando de conocer si dicho evento fue registrado instrumental y/o documentalmente. En primer lugar se puede recopilar en la prensa local, consultando bibliotecas y hemerotecas, si ese río o arroyo ha tenido eventos recientes de avenida y leer la descripción de los daños, para ver si pueden ser correlacionables con lo observado en la evidencia. También se pueden consultar y solicitar, a la AEMET o las agencias autonómicas de meteorología, los datos de precipitaciones intensas o persistentes registradas en las estaciones meteorológicas próximas o en la cuenca del río o arroyo, para estudiar sus fechas y magnitudes.

En el caso de que nuestro estudio se esté haciendo con árboles en el medio urbano alejado de cauces, habrá que fijarse en los posibles orígenes de la evidencia asociados a otros factores naturales (desprendimientos, deslizamientos, marcas de animales...) o antrópicos (impactos de vehículos y otros objetos próximos, labores de jardinería o mantenimiento, etc.). Para ello, se trata de indagar, como si de un equipo de detectives se tratara, la posición del daño respecto a la situación del objeto o elemento contundente (p.e. si está a la altura del parachoques o paragolpes de un coche) y la frecuencia o fecha del daño (si fue un único momento o una acción periódica).

Predicción: avanzando la magnitud de las riadas futuras

Un último paso en las actividades a desarrollar, tanto en campo como en laboratorio y el aula con los alumnos, supone estimar el orden de magnitud de la riada que produjo las evidencias dendrogeomorfológicas observadas e interpretadas como asociadas a una riada. Para ello se puede emplear la ecuación de Manning, una fórmula que simplifica la estimación de las velocidades y caudales circulantes por un río o arroyo, suponiendo la hipótesis de que el flujo es uniforme (la misma velocidad en cualquier punto del cauce). Asumiendo esta simplificación que nunca se da en la realidad natural, la formulación sencilla de la ecuación es la siguiente:

$$v = R^{2/3} \cdot S^{1/2} / n$$

siendo: v , velocidad media de la corriente; R , radio hidráulico (A/P); A , área mojada; P , perímetro mojado; S , pendiente para la línea de energía (coincidente con la del lecho); n , coeficiente de rugosidad.

Por lo tanto, para estimar la velocidad que llevó la corriente de la riada pretérita cuya magnitud queremos cuantificar, basta con calcular el radio hidráulico en la sección o secciones donde tengamos las evidencias, medir la pendiente longitudinal del lecho y asignar un valor de rugosidad al cauce en esa sección.

- El *radio hidráulico de la sección transversal* al cauce donde se ubican las evidencias, por ejemplo los descortezados en los troncos, se calcula como el cociente entre el área mojada y el perímetro mojado. Para calcularlo realizaremos un perfil topográfico a escala de esa sección transversal al cauce, bien empleando un plano o mapa detallado (si está disponible), o bien utilizando cinta métrica y flexómetro. Sobre el perfil topográfico se puede planimetrar el área que ocuparía el agua hasta la altura superior del descortezado, empleando un planímetro digital o simple conteo de áreas en papel milimetrado; también se puede calcular el perímetro mojado con un curvímetro o también empleando una regla o escalímetro en el papel milimetrado (Fig. 9).
- La pendiente longitudinal del cauce en el tramo donde se sitúan las evidencias dendrogeomorfológicas se puede medir sobre el mapa topográfico detallado; o bien en campo tirando una visual, empleando un clinómetro de una brújula geológica, un simple transportador de ángulos, o las herramientas de aplicaciones para smartphones del tipo "Navaja suiza".
- El coeficiente de rugosidad se puede estimar a partir de tablas y guías visuales disponibles en Internet para el parámetro "n de Manning". A modo ilustrativo, adopta valores de: 0,020 para ríos con el lecho de arena y limpios de vegetación; 0,035 para ríos con lecho de gravas; 0,045 para ríos con vegetación arbustiva en el cauce y márgenes; y superior a 0,055 para ríos con vegetación arbórea.

Una vez calculada la velocidad (en m/s), basta con multiplicarla de nuevo por el área de la sección mojada (A , en m^2), para obtener el caudal (Q , en m^3/s) mínimo circulante en esa riada, suficiente para alcanzar la parte superior del descortezado.

Con esta magnitud de la riada pasada estimada a partir de las evidencias dendrogeomorfológicas, y correlacionando dicha magnitud con las precipitaciones que la generaron, se pueden hacer indicaciones preventivas de cara al futuro sobre cómo cantidades superiores de lluvia (hasta el máximo registrado en la cuenca), podrían producir caudales proporcionalmente mayores; teniendo en cuenta que los fenómenos de transformación de la lluvia en escorrentía son muy complejos, y la relación entre ambos no es lineal.

CONCLUSIONES

El análisis de la peligrosidad y el riesgo por avenidas e inundaciones precisa de fuentes de información que alarguen y complementen el registro de datos del periodo instrumental (aforos, precipitaciones) y la relación de eventos del registro documental (archivos y hemerotecas). Para ello, las técnicas paleohidrológicas como la dendrogeomorfología aportan la información contenida en la secuencia de anillos de árboles y arbustos; lo que permite la datación de eventos pretéritos de inundación, el análisis de su frecuencia en el pasado, la estimación de su magnitud, e incluso indagar el origen de los eventos de precipitación causantes de la avenida.

Todos estos resultados tienen campos de aplicación diversos, principalmente en dos aspectos: la incorporación de la información en la mejora del análisis integrado del riesgo por inundaciones; y el estudio de las relaciones entre el cambio climático y la frecuencia y magnitud de los eventos extremos potencialmente catastróficos.

Por otra parte, al tratarse de procedimientos técnicos que no requieren profundos conocimientos científicos ni sofisticado instrumental, son susceptibles de adaptarse y simplificarse para realizar propuestas didácticas de actividades docentes y divulgativas a diferentes niveles educativos: educación primaria, con búsqueda y descripción de las evidencias dendrogeomorfológicas; educación secundaria, con la interpretación del origen de las evidencias en los árboles; y enseñanza universitaria, estimando las magnitudes de las riadas del pasado y prediciendo las magnitudes futuras. Estas propuestas didácticas se pueden adaptar tanto para centros con corrientes fluviales próximas; como para otros en entornos urbanos sin ríos o arroyos próximos, y que pueden utilizar las evidencias causadas por actividades antrópicas, como los vehículos a motor.

Agradecimientos

Quisiera trasladar mi agradecimiento, por lo mucho que he aprendido de ellos, a mis compañeros y colegas con los que he compartido proyectos de investigación y publicaciones los últimos 10 años, en especial a José Bodoque (UCLM), Mar Génova (UPM), Juan Antonio Ballesteros-Cánovas y Virginia Ruiz (Universidad de Berna, Suiza) y Mario Hernández (IGME); ellos son tan autores como yo de este artículo, porque recoge las ideas que tantas veces hemos discutido en campo, pero formuladas de manera divulgativa. Agradecimiento que hago extensivo al resto de miembros de los equipos de los proyectos GeoRiada, Dendro-Avenidas, MAS Dendro-Avenidas, IDEA-GesPPNN, MARCONI y CHARMA que han financiado y están costeando las investigaciones dendrogeomorfológicas en España durante la última década; incluyendo a Julia García Oteyza, y a Pitter Ferrio y el equipo de la Universitat de Lleida. Agradecer a Rodrigo y Pablo su colaboración en la búsqueda de evidencias urbanas de daños a los árboles para ilustrar este artículo. Finalmente, dar las gracias a los revisores del artículo (José Anastasio Fernández Yuste, UPM; y José María Postigo Mijarra, IES+UPM), porque sus sugerencias ayudaron a mejorar el manuscrito inicial.

BIBLIOGRAFÍA

Ayala-Carcedo, F.J. (2002). *Estrategias y medidas de mitigación del riesgo de inundaciones. Gestión de zonas inundables*. En: Riesgos Naturales (Coords.: Ayala-Carcedo, F.J. y Olcina Cantos, J.), Cap. 52, págs. 977-995, Editorial Ariel, Ariel Ciencia, 1ª edición, Barcelona, 1512 p.

Ballesteros-Cánovas, J.A., Bodoque, J.M., Díez-Herrero, A., Génova, M., Gutiérrez, E., Moya, J., Muntán, E., Oller, P., Rubiales, J.M., Ruiz-Villanueva, V. y Saz, M.A. (2010). Dendrogeomorfología. Los árboles, fuente de conocimiento de los procesos y desastres naturales. *Cuadernos de*

Arboricultura nº 5, Asociación Española de Arboricultura, Diputación Provincial de Toledo y Sociedad Española de Geomorfología, Valencia, 119 pp.

Ballesteros-Cánovas, J.A., Eguibar, M., Bodoque, J.M., Díez-Herrero, A., Stoffel, M. y Gutiérrez-Pérez, I. (2011a). Estimating flash flood discharge in an ungauged mountain catchment with 2D hydraulic models and dendrogeomorphic paleostage indicators. *Hydrological Processes*, 25, 970-979.

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

Ballesteros-Cánovas, J.A., Sánchez-Silva, M., Bodoque, J.M. y Díez-Herrero, A. (2013). An example of integrated approach to flood risk management: the case of Nava-luenga (Central Spain). *Water Resources Management*, 27 (8), 3051-3069.

Ballesteros-Cánovas, J.A., Butler, D.R. y Stoffel, M. (2015a). R.S. Sigafos's 1961 and 1964 papers on botanical evidence of paleofloods. *Progress in Physical Geography*, 39(3) 405-411.

Ballesteros-Cánovas, J.A., Stoffel, M., St George, S. y Hirschboeck, K. (2015b). A review of flood records from tree rings. *Progress in Physical Geography*, 1-23.

Ballesteros-Cánovas, J.A., Rodríguez-Morata, C., Garófano-Gómez, V., Rubiales, J.M., Sánchez-Salguero R. y Stoffel, M. (2015c). Unravelling past flash flood activity in a forested mountain catchment of the Spanish Central System. *Journal of Hydrology*, 529, 468-479.

Ballesteros-Cánovas J.A., Márquez-Peñaranda J.F., Sánchez-Silva M., Díez-Herrero, A., Ruiz-Villanueva, V., Bodoque, J.M. y Stoffel, M. (2015d). Can tilted trees be used for palaeoflood discharge estimation? *Journal of Hydrology*, 529, 480-489.

Benito, G., Díez-Herrero, A. y Fernández De Villalta, M. (2003). Magnitude and Frequency of Flooding in the Tagus Basin (Central Spain) over the Last Millenium. *Climatic Change*, 58 (1-2), 171-192.

Benito, G., Casas, M.A., Machado, M.J., Rico, M.T., Sánchez-Moya, Y., Sopena, A. y Thorndycraft, V.R. (2009). Riesgos naturales, crecidas fluviales y cambio climático. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 17.2, 155-163.

Benito, G. y Díez-Herrero, A. (2015). *Palaeoflood Hydrology: Reconstructing Rare Events and Extreme Flood Discharges*. En: Hydro-Meteorological Hazards, Risks, and Disasters. (Eds.: Paron, P. y Di Baldassarre, G.), Chapter 3, pp. 65-104, Elsevier, Amsterdam (Holanda).

Consorcio de Compensación de Seguros (2014). *Estadística. Riesgos Extraordinarios. Serie 1971-2013*. Ministerio de Economía y Competitividad, Madrid, 138 p.

Delgado, J., Díez, A. y Vegas, J. (2004). *Metodología en la utilización didáctica del patrimonio geológico: la estrategia progresiva descripción-interpretación-predicción (DIP)*. En: El Patrimonio Geológico: Cultura, Turismo y Medio Ambiente (Eds.: Guillén, F. y Del Ramo, A.), págs. 163-169, Actas de la V Reunión Nacional de la Comisión de Patrimonio Geológico de la Sociedad Geológica de España, Áreas de Geología y Edafología de la Universidad de Murcia y Excmo. Ayuntamiento de Molina de Segura, Murcia, 400 p.

Díez-Herrero, A., Ballesteros-Cánovas, J.A., Bodoque, J.M., Eguibar, M.A., Fernández, J.A., Génova, M., Laín, L., Llorente, M., Rubiales, J.M. y 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. (2008). Taller: iDoctor, doctor... que

se me inunda la casa! *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 16.1, 35-42.

Díez-Herrero, A., Laín-Huerta, L. y Llorente-Isidro, M. (2008). *Mapas de peligrosidad por avenidas e inundaciones. Guía metodológica para su elaboración*. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España, Serie Riesgos Geológicos/Geotecnia nº 1, Madrid, 190 p.

Díez-Herrero, A., Ballesteros-Cánovas, J.A., Bodoque, J.M. y Ruiz-Villanueva, V. (2013a). A new methodological protocol for the use of dendrogeomorphological data in flood risk analysis. *Hydrology Research*, 44.2, 234-247.

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

Ferrio, J.P., Díez-Herrero, A., Tarrés, D., Ballesteros-Cánovas, J.A., Aguilera, M. y Bodoque, J.M. (2015). Using tree-ring oxygen-stable isotopes to study the origin of past flood events: first results from the Iberian Peninsula. *Quaternaire*, 26, (1), 67-80.

Génova, M., Ballesteros-Cánovas, J.A., Díez-Herrero, A. y Martínez-Callejo, B. (2011). Historical Floods and Dendro-

chronological Dating of a Wooden Deck in the Old Mint of Segovia, Spain. *Geoarchaeology: An International Journal*, 26 (5), 786-808.

Harrison, S.S. y Ried, J.R. (1967). A flood-frequency graph based on tree-scar data. *Proc. N. D. Acad. Sci.*, 21, 23-33.

Olcina Cantos, J. (2007). *Riesgo de inundaciones y ordenación del territorio en España*. Fundación Instituto Euro-mediterráneo del Agua, 381 págs., Murcia.

Sánchez, F.J. y Lastra, J. (Coords.), (2011). *Guía metodológica para el desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables*. Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino, 349 p.

Sigafoos, R.S. (1964). Botanical evidence of floods and flood-plain deposition. *Geol. Surv. Prof. Pap. (U.S.)*, 485-A, 1-35. ■

Este artículo fue recibido el día 20 de septiembre y aceptado definitivamente para su publicación el 29 de octubre de 2015.