

Evidencias anatómicas de avenidas torrenciales en diferentes especies arbóreas

BALLESTEROS CÁNOVAS, J.A.¹, STOFFEL, M.^{2,3 y 4}; BODOQUE, J.M.⁵,
DÍEZ-HERRERO, A.¹ y RUBIALES, J.M.⁶

¹ Departamento de Investigación y Prospectiva Geocientífica, Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Ríos Rosas 23, E-28003, Madrid.

² Laboratorio de Dendrogeomorfología. Departamento de Geociencias, Geografía, Universidad de Friburgo, Chemin du Musée 4, CH-1700 Fribourg.

³ Laboratorio de Dendrogeomorfología, Instituto de Ciencias Geológicas, Universidad de Berna, CH-3012, Berna.

⁴ Cambio Climático e Impacto Climático, Ciencias Medioambientales, Universidad de Ginebra, CH-1227 Carouge-Ginebra

⁵ Departamento de Ingeniería Geológica y Minera. Universidad de Castilla-La Mancha. Campus Fábrica de Armas, E-45071, Toledo.

⁶ Departamento de Silvopascicultura, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Universidad Politécnica de Madrid, E-28040 Madrid.

Resumen

La caracterización de la respuesta anatómica de árboles afectados por avenidas torrenciales, resulta determinante a la hora de definir indicadores útiles para el estudio de la frecuencia y magnitud del proceso utilizando técnicas dendrogeomorfológicas.

Con este propósito, se han analizado 96 muestras provenientes de diferentes especies arbóreas (*Pinus pinaster* Ait., *Quercus pyrenaica* Willd., *Alnus glutinosa* L., *Fraxinus angustifolia* Vahl. y *Populus* sp.), de la madera afectada por la carga sólida transportada durante el evento torrencial que tuvo lugar en 1997 en el arroyo Cabrera (Navaluenga, Sierra del Valle, Gredos Oriental).

En campo, la toma de muestras consistió en obtener cuñas de madera con una sierra de mano y testigos cilíndricos con barrena Pressler, de aquellos árboles localizados en los bancos de orilla que presentaban descortezados por impacto.

En laboratorio se prepararon, a partir de los tejidos vegetales, láminas delgadas obtenidas en sección transversal y con espesores comprendidos entre 10-15 µm. Posteriormente, se procedió a la adquisición de imágenes microscópicas (300 ppp, x 50 aumentos) para el análisis de los diversos parámetros anatómicos cuantitativos y cualitativos mediante el software WinCELL (Regent Instrument).

Los resultados obtenidos muestran un cambio claro en los parámetros anatómicos analizados, como respuesta al daño producido por el evento torrencial de 1997. Dependiendo de cada especie, los principales indicadores tuvieron que ver con: el lumen celular de las traqueidas de la madera temprana así como el porcentaje y grosor de la pared celular (en pino); tamaño de los vasos (en aliso, fresno y roble) y dimensiones de las células de madera temprana acompañantes a vasos (aliso y álamo). Por último, también se observó la existencia de falsos anillos (alisos), depósitos gomosos (alisos, robles y fresnos) y presencia de tejidos desestructurados. Estos parámetros se presentan como indicadores útiles para la datación eventos pretéritos en esta zona de estudio y sectores análogos.

Palabras clave

Dendrogeomorfología, anillos de crecimiento, parámetros celulares, riada, Sierra de Gredos

1. Introducción

Uno de los procesos naturales asociados a la hidrología de superficie que mayores problemas acarrea a la Sociedad son las avenidas torrenciales, ya que se ponen en movimiento

elevados volúmenes de agua y sedimentos (*bed load*) en un corto intervalo de tiempo (MINTEGUI y ROBREDO, 2008). Al carácter repentino y a la elevada energía asociada al proceso, se le une la falta de percepción del riesgo asociado por parte de la Sociedad ya que en muchas ocasiones, estas corrientes se caracterizan por presentar regímenes efímeros. En España, sólo en pérdidas humanas, las avenidas torrenciales han supuesto durante los últimos 15 años más de 200 víctimas mortales con eventos tan destacados como el de Biescas, Yebra y Badajoz (DÍEZ-HERRERO *et al.*, 2008).

Por tanto, el estudio y análisis integrado de la cuenca vertiente en la fase de ordenación agro-hidrológica (MINTEGUI y ROBREDO, 2008) resulta fundamental para evaluar y definir entre las distintas medidas predictivas (meteorológicas e hidrológicas), preventivas (estructurales o no estructurales) y correctoras que pueden adoptarse para tratar de mitigar o reducir el riesgo asociado de este fenómeno (DÍEZ-HERRERO *et al.*, 2008). Sin embargo, la problemática radica en que dicho análisis está subordinado, en gran medida, a los datos de partida que alimentan los modelos hidrológicos-hidráulicos empleados.

Dicho esto, en la península Ibérica son pocas las cuencas vertientes de montaña que cuentan con datos de pluviometría y/o de aforos y, casi inexistentes, aquéllas cuyos registros de datos sean lo suficientemente largos para ser estadísticamente representativos en el tiempo y en el espacio. Por otra parte, series tan cortas pueden carecer de eventos extremos (de baja frecuencia), o puede ocurrir que cuando éstos eventos tienen lugar, con frecuencia, las estaciones de medición resultan dañadas o superadas condicionando los datos recogidos (BENITO y THORNDYCRAFT, 2004). Esto posibilita que para poder caracterizar el comportamiento geodinámico de una cuenca torrencial, sea necesario avanzar en el estudio de la aplicación de técnicas y métodos complementarios a las ya existentes, capaces de mejorar el estado del conocimiento de este proceso natural.

En este sentido, entre las distintas aproximaciones que pueden desarrollarse para dar respuesta al cómo, cuándo y dónde de las avenidas torrenciales en zonas montañosas (métodos hidrológicos-hidráulicos, geomorfológicos e históricos); pueden incluirse los métodos botánicos (DÍEZ-HERRERO *et al.*, 2008). Dichos métodos, focalizados en el análisis dendrogeomorfológico de la vegetación de ribera de las cuencas vertientes (DÍEZ-HERRERO *et al.*, 2007; BALLESTEROS *et al.*, 2008a; STOFFEL y BOLLSCHWEILER, 2008), permiten incorporar al estudio información no sistemática (BENITO y THORNDYCRAFT, 2004) sobre fechas de eventos pasados y sus ordenes de magnitud que de otra manera sería imposible obtener, debido a la falta de un registro histórico (por lo inaccesible del terreno y la forma desapercibida con la que han sucedido en el pasado los eventos en estas zonas montaña), y la dificultad de encontrar material detrítico depositado susceptible de ser estudiado mediante técnicas paleohidrológicas (debido a la alta energía de transporte; BENITO y THORNDYCRAFT, 2004). Sin embargo, la interacción de la vegetación con las áreas de influencia del proceso torrencial permite localizar formas o señales sobre los árboles denominados indicios dendrogeomorfológicos (ID), que aportan información valiosa a través del estudio de registro anual de anillos de crecimiento. Entre los más de 32 ID útiles que pueden ser observados en la vegetación colindante que crece junto a los ríos (DÍEZ-HERRERO *et al.*, 2007), los descortezados debido al impacto de la carga sólida asociados a cauces de alta energía (YANOSKY y JARRET, 2002) son uno de los más útiles ya que permiten obtener información tanto temporal como espacial del proceso al comportarse como indicadores de paleoestado (*Paleostage indicators-PSI*) y/o marcas de altura de lámina de agua (*High water marks-HWM*; BALLESTEROS *et al.*, en revisión). Algunos de los trabajos han utilizado con éxito este tipo de indicios para estudiar eventos pretéritos en cuencas de montaña no monitorizadas (ZIELONKA *et al.*, 2008; BOLLSCHWEILER *et al.*, 2008).



2. Objetivos

Hasta el momento, para detectar las heridas ocultas por descortezados producidos por eventos anteriores y para determinar con exactitud el año del evento se han usado métodos de muestreo destructivos basados en la obtención de cuñas o secciones. Sin embargo, es posible implementar técnicas de muestreo menos destructivas basadas en la obtención de testigos con barrena de Pressler y la localización de la señal anatómica asociada al daño cambial (STOFFEL y HITZ, 2008).

De acuerdo con esta premisa, el objetivo general de este trabajo es proporcionar una serie de indicadores anatómicos útiles para localizar eventos torrenciales. Para ello, se muestrean, analizan y describe el comportamiento anatómico de cinco especies vegetales climácicas y riparias (95 muestras pertenecientes a *Alnus glutinosa* L, *Pinus pinaster* Ait.; *Populus sp*; *Quercus pyrenaica* Willd. y *Fraxinus angustifolia* Vahl.) dañadas tras un evento torrencial de carácter extraordinario y bien documentado (BODOQUE *et al.*, 2006).

3. La Zona de Estudio: El Arroyo Cabrera

La zona de estudio está situada en la vertiente septentrional de la sierra del Valle (Sierra de Gredos, Sistema Central). En concreto, en las márgenes de la corriente fluvio-torrencial Arroyo Cabrera (40° 24' 28" N; 4° 39' 25" W; Fig.1) tributario del Alberche (cuenca del Tajo).

La cuenca vertiente, de forma subtriangular, tiene una extensión de 15.75 km² y está formada por la confluencia de varios torrentes que descienden desde el pico Escusa (1960 msnm) hasta el Alberche (725 msnm). Con un desnivel máximo dentro de la cuenca de 1235 m y una longitud lineal de 5500 m, la pendiente media del cauce es de 22 %, aunque en cabecera se pueden alcanzar valores próximos al 32 %. Esta morfología favorece que, bajo episodios de lluvias torrenciales, especialmente en invierno, se produzcan pequeños deslizamientos que aportan abundante material sólido al cauce.

La temperatura media anual es de 14,6 °C (mínimas 6,3 °C-enero; máximas 24,8 °C-julio) y la precipitación media es de 414 mm, (media mensual máxima de 52,6 mm en noviembre). La litología está compuesta principalmente por granitos y granitoides monzograníticos descritos en la bibliografía como granito Venero Claro y que en la actualidad se encuentran parcialmente cubiertos por formaciones superficiales de edad cuaternaria (conglomerados de bloques, gravas, arenas, y limos que cubren las laderas, fondos de valle y depresiones tipo nava; DÍEZ, 2001-2003).

En la zona alta (>1300 msnm) de la cuenca, la vegetación es característica del piso de vegetación supraforestal (formaciones arbustivas, matorrales y pastizales). La parte media (950-1300 msnm) aparecen las coníferas de montaña (*Pinus pinaster* Ait. *Pinus sylvestris* L. *Juniperus communis* L. y de forma aislada algún ejemplar *Pinus nigra* Arnold). La zona baja (< 950 msnm) está compuesta fundamentalmente por un melojar (*Quercus pyrenaica* Willd.). Por otra parte, existe una vegetación de ribera, más densa hasta los 1100 msnm compuesta por alisos (*Alnus glutinosa* L.) fresnos (*Fraxinus angustifolia* Vahl.), alamos (*Populus sp*), arraqlanes (*Frangula alnus* Miller), y sauces (*Salix sp*).

Esta zona de estudio fue elegida en base a dos criterios: 1) el conocimiento fehaciente de un evento torrencial extraordinario que tuvo lugar la noche del 18 de diciembre de 1997, que

provocó numerosas afecciones a la vegetación colindante; y, 2) desde el año 2004, la cuenca vertiente está completamente instrumentada con 2 limnímetros, 6 pluviómetros y 1 medidor de humedad del suelo (TDR) lo que permitirá calibrar y validar los resultados obtenidos con técnicas dendrogeomorfológicas.

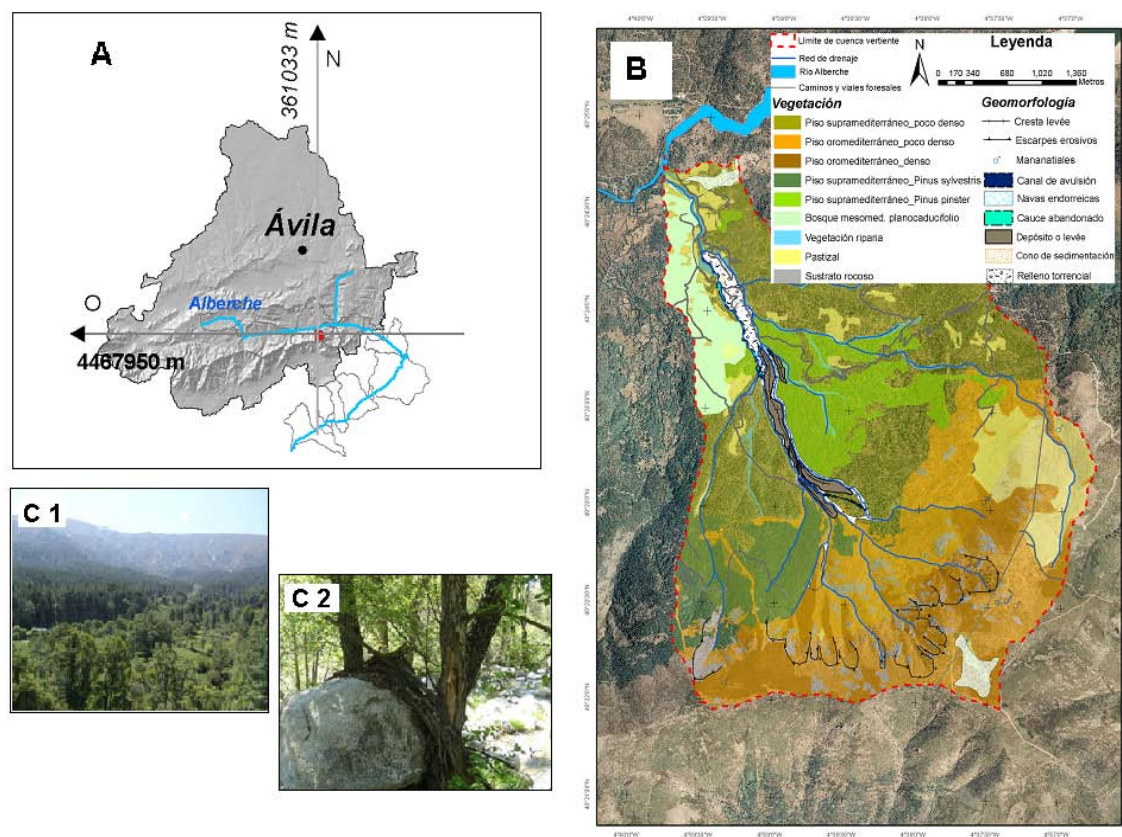


Figura 1. Esquema de localización de la zona de estudio. A) Localización general en el contexto provincial (elipsoide de referencia: ED50). B) Esquema de la cuenca vertiente. Se incluye información sobre la vegetación y principales formas geomorfológicas asociadas a la dinámica torrencial. C1) Vista arriba de la cuenca. C2) Generación de descortezados por el impacto de bloques y derrubios.

4. Metodología

4.1 Estrategia de muestreo

Un impacto de la carga sólida con suficiente energía, puede provocar el desgarro de la parte externa de la corteza y como consecuencia un daño en el tejido cambial. Debido a este daño tiene lugar la formación de tejidos callosos (*callus tissues*; SCHWEINGRUBER, 1996). Este tipo de anomalías durante el crecimiento impiden el normal desarrollo radial en la zona afectada e inducen una respuesta anatómica que puede ser utilizada como indicador de diferentes procesos (STOFFEL y HITZ, 2008).

Basándose en este indicio, la estrategia de muestro fue diseñada considerando sólo aquéllos descortezados orientados en sentido opuesto a la corriente de los árboles y situados en el banco de orilla. Descortezados que ofrecían dudas o debidos a otros procesos (p.e. caída árboles, caída de rocas, etc.) fueron desechados.

Se obtuvieron más de 90 muestras en forma de cuña y con una cara perpendicular a la dirección de crecimiento, de los descortezados usando sierra de mano. Además se extrajeron

testigos cilíndricos con una barrena Pressler para conocer la edad aproximada de cada árbol. Finalmente, de cada individuo muestreado se obtuvo información adicional como la posición geográfica y geomorfológica, descripción del tipo/s de indicio/s dendrogeomorfológico/s que presenta/n, así como diversos datos dasométricos y relacionados con los árboles adyacentes (Fig.2).

4.2 Análisis de las muestras

a) Preparación previa de las muestras

Para facilitar análisis posteriores, es preciso llevar a cabo en laboratorio una serie de procesos de preparación de las muestras, especialmente en el caso de determinadas especies vegetales asociadas a ecosistemas riparios. Inicialmente, los testigos cilíndricos se colocaron y encolaron en un soporte de madera prismático asegurándose de que las direcciones de las traqueidas o vasos fuesen perpendiculares al soporte para asegurar una vista de la sección transversal. Posteriormente, todas las muestras siguieron un proceso de lijado y pulido gradual utilizando para ello una lijadora de carpintería con una serie degradada de papel de lijado. Por último, todas las muestras fueron escaneadas a una resolución mínima de 500 ppp (Epson GT 120000) con el fin de conservar su imagen original antes de cortarlas para preparar láminas delgadas (ISELI y SCHWEINGRUBER, 1989). El borde de la herida fue localizado utilizando una lupa binocular (LEICA DM 2000) con una fuente de luz fría.

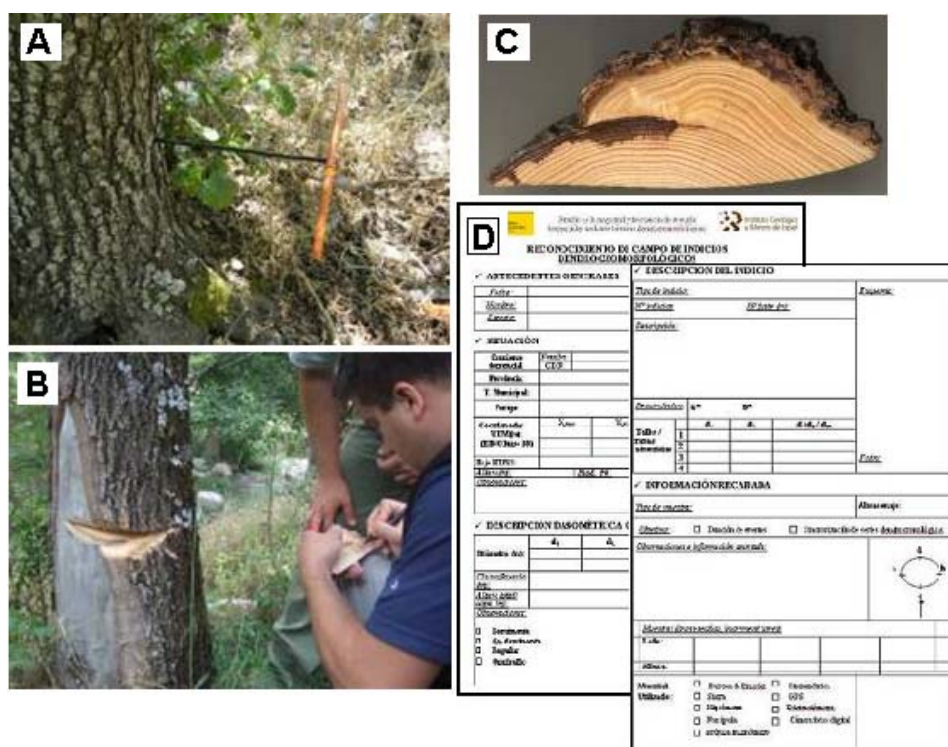


Figura 2. A) Toma de muestras con barrena Pressler. B) Obtención de muestras en forma de cuña (C) de las heridas de descortezados para su posterior preparación en laboratorio. D) Haz y envés de la ficha de campo dónde se recogieron todos los datos sobre la localización, el indicio dendrogeomorfológico y datos dasométricos del árbol.

b) Preparación de láminas delgadas

A partir de las muestras de madera en forma de cuña, se prepararon en laboratorio piezas prismáticas a una distancia de 1,5 cm del borde de la herida. Después, con la ayuda de un microtomo de deslizamiento (Reichert-Jung) se obtuvieron láminas delgadas de espesor entre 10-15 μm . Tal y como describe GARCIA ESTEBAN *et al.*, (2003) y SCHWEINGRUBER

(2001), en la preparación microscópica se utilizó como tinte una mezcla de Safranina y AstraBlue y, tras lavar con alcohol (75% y 100%) y deshidratar con xilol, se procedió a montar sobre los portaobjetos fijándolas posteriormente con Bálsamo de Canadá. Una vez montadas, las muestras se secaron en un horno a 60° C durante 12 h.

Después, todas las muestras fueron observadas con un microscopio óptico Leica DM 2000 a 50X, fotografiadas con una cámara digital Leica DFC320; y por último, las imágenes fueron montadas usando programas específicos (Adobe Photoshop 6.0) para poder llevar a cabo análisis de imágenes continuos.

c) Elementos anatómicos analizados

Los parámetros anatómicos cuantitativos y cualitativos analizados estuvieron en función de la especie arbórea en cuestión, y su elección se basó en la consulta bibliográfica previa (BOLLSCHWEILER *et al.*, 2008; RUBIALES *et al.*, 2008; STOFFEL y HITZ, 2008; HITZ *et al.*, 2007; ST GEORGE *et al.*, 2002; ASTRADE y BÉGIN, 1997; YAMAMOTO 1992; YANOSKY 1984; FAHN y ZAMSKI, 1970 y el conocimiento de la capacidad del programa utilizado (WinCELL ;Regent Instrument Inc.) que permite llevar a cabo el análisis semi-automático de imágenes de tejidos vegetales.

En concreto, y en el caso de las frondosas, las mediciones se centraron en la dimensión y forma de los vasos, así como en el tamaño y el porcentaje de la pared celular de las células prosenquimatosas y parenquimatosas situadas en la parte inicial de la madera temprana (*EE*, ver ARBELLAY, 2008). En cuanto al pino, las variables consideradas fueron el lumen de las traqueidas, la longitud radial y su anchura tangencial; el porcentaje y espesor de pared celular. Otros elementos analizados y tenidos en cuenta para las diversas especies estudiadas fueron: los depósitos gomosos;_ existencia de madera de reacción; existencia de parénquima traumático (*callus tissues*); existencia de falsos anillos, así como la abundancia de canales resiníferos.

5. Resultados

Los resultados derivados del análisis microscópico de la madera de árboles afectados por avenidas torrenciales, han revelado cambios en el patrón de crecimiento puesto de manifiesto a través de las variables observadas. Por especies, los principales cambios anatómicos fueron:

Coníferas

- *Pinus pinaster* Ait.

De las 14 muestras de pino obtenidas se ha podido comprobar que todas, a excepción de tres, muestran cambios importantes en las variables observadas en los años posteriores al evento de 1997. Las figuras 3 (a1-a2) y 4 (A) y tabla 1 reflejan una fuerte disminución en el lumen, así como una disminución más acusada de la longitud radial respecto de la longitud tangencial de las traqueidas de la *EE*. Por otra parte, se ha comprobado un aumento significativo del porcentaje de la pared celular, fundamentalmente debido al aumento de su grosor. Sin embargo, el número de canales resiníferos no reveló ningún patrón claro asociado al daño que pudiese ser utilizado como indicador.

Tabla 1. Resumen de los principales resultados obtenidos del análisis anatómico para coníferas (*Pinus pinaster* Ait.). Información adicional puede consultarse en BALLESTEROS (2008).

<i>Lumen traqueidas antes daño (μm^2)</i>	<i>Lumen traqueidas después daño (μm^2)</i>	<i>Disminución del lumen (μm^2 y %)</i>	<i>Long. radial y anchura tangencial de las traqueidas antes del daño (μm)</i>	<i>Long. radial y anchura tangencial de las traqueidas después del daño (μm)</i>	<i>Incremento de la pared celular (%)</i>
196,06 ($\pm 50,69$)	101,22 ($\pm 35,84$)	94,81 μm^2 - 53,61%	12,9-11,3	8,42 -8,19	15,5 ($\pm 8,41$)

Frondosas

- *Alnus glutinosa*

De las 25 muestras preparadas, se ha podido observar un aumento considerable del área de las células prosenquimatosas y parenquimatosas pertenecientes a la EE, aunque no se observaron variaciones diferenciales de la longitud radial y tangencial. De igual manera, se pudo observar una disminución del lumen de los vasos en la EE. Por otra parte, en siete muestras se ha observado la existencia de un falso anillo de crecimiento, caracterizado por células de pared gruesa y menor lumen en el anillo siguiente a la herida. Mediante análisis macroscópico se ha observado en todas las muestras la existencia de parénquima traumático coincidiendo con el tejido calloso que crea el árbol alrededor de la herida. Este tejido se caracteriza por estar compuesto de células irregulares y desorganizadas que no siguen un marcado sentido radial de crecimiento. Por último, se pudo observar que en el anillo que antecede al daño cambial existía un aumento de depósitos gomosos como consecuencia de la cavitación endógena de los elementos vasculares al perder su capacidad conductora. En cuanto a la existencia de madera de reacción, sólo en cuatro muestras se ha podido observar su presencia en los años sucesivos al evento

- *Fraxinus angustifolia*

Del conjunto de 23 preparaciones microscópicas, el principal parámetro que ha ofrecido una respuesta muy acusada ha sido el estudio morfométrico de los vasos. Así, en 20 de las muestras estudiadas se ha observado una disminución muy marcada en el valor del área del lumen de los vasos; debiéndose fundamentalmente a una disminución de la longitud radial del vaso respecto a la longitud tangencial. Respecto al estudio de las células parenquimatosas y prosenquimatosas que rodean a los vasos (en la madera temprana), se ha observado que en el 80 % aproximadamente de las muestras existe una disminución sensible del área generada por una marcada disminución de la longitud radial respecto de la longitud tangencial.

- *Quercus pyrenaica*

23 muestras fueron analizadas. El área de los vasos correspondiente al anillo posterior al evento (anillo respuesta) fue el parámetro más acusado. A su vez, en estas muestras se observó una disminución en el porcentaje del lumen celular y un aumento en el porcentaje de la pared celular, así como una disminución mayor en la longitud radial respecto a la longitud transversal de los vasos. En cuanto a los resultados provenientes de las células parenquimatosas y prosenquimatosas en la madera tardía y temprana, se ha podido observar que también el área del lumen celular disminuye sensiblemente en el anillo-respuesta. De igual forma, existe una ligera disminución diferencial en los sentidos radial y transversal de la longitud de los vasos; así como una disminución del porcentaje del lumen celular.



- *Populus sp.*

En las 10 muestras estudiadas, se ha comprobado que existe una disminución del área del lumen de los vasos asociada al anillo-respuesta de 1998; sin embargo, no se ha podido constatar que exista una diferencia significativa en la disminución de la longitud radial y la longitud transversal de los vasos. Tampoco se ha observado cambios sensibles en el porcentaje de la pared celular que sirvan como indicativo.

Tabla 2. Resumen de los principales resultados obtenidos del análisis anatómico para frondosas. (* células prosenquimatosas y parenquimatosas pertenecientes a la madera temprana). Información más extensa puede ser consultada en BALLESTEROS (2008).

Especie	Lumen de vasos antes daño (μm^2)	Lumen de vasos después daño (μm^2)	Lumen de cells.* antes daño (μm^2)	Lumen de cells.* después daño (μm^2)	Variación del lumen celular total en (%)
<i>Alnus glutinosa</i>	1453,51	954,85	38,1937	61,52	612
<i>Fraxinus angustifolia</i>	2688,82	1174,78	20,69	5,12	6,83
<i>Quercus pyrenaica</i>	911,718	521,57	79,2573	48,79	2,75
<i>Populus nigra</i>	1389,38	879,87	-----	-----	7,18

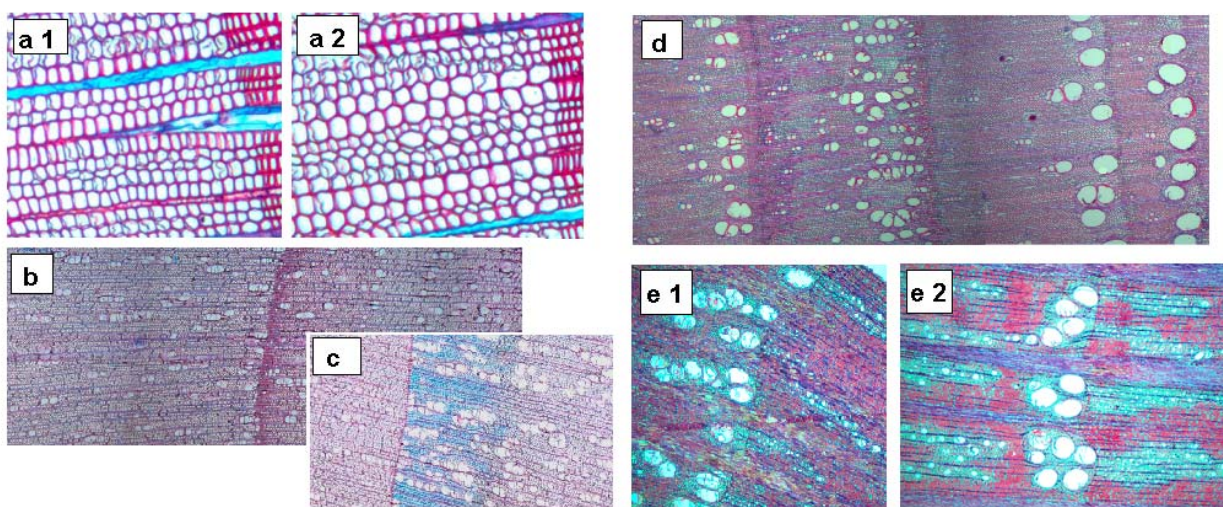


Figura 3. Imágenes de preparación microscópicas en sección transversal. a) Reducción del lumen de traqueidas debidas al daño (a1) en relación al año previo. b) generación de falso anillo y madera de reacción en aliso (c). d) Disminución del lumen de los vasos en fresnos y en robles (e2) si se compara con el año previo al descortezado.

6. Discusión

En este trabajo se ha analizado el comportamiento anatómico de cinco especies arbóreas diferentes afectadas por la actividad torrencial, fundamentalmente daños en el tejido cambial. Para ello se han preparado y estudiado un total de 96 muestras microscópicas.

A diferencia de otros contextos geográficos donde las técnicas dendrogeomorfológicas (p.e. Centroeuropa o Norteamérica) están siendo ampliamente desarrolladas, en el área mediterránea se cuenta con una serie de limitaciones ligadas a la fragilidad y vulnerabilidad

de sus ecosistemas, que hace que sea inviable o desaconsejable la toma de muestras a través de métodos destructivos, limitando con ello, este tipo de estudios. Sin embargo, la localización y descripción de los principales parámetros anatómicos para ser utilizados como *proxies* indirectos, permite que puedan desarrollarse métodos de muestreo menos destructivos basados en la recolección dirigida de testigos cilíndricos con barrenas Pressler (BOLLSCHWEILER *et al.*, 2008; STOFFEL y BOLLSCHWEILER, 2008; ARBELLAY, 2008; BALLESTEROS *et al.*, 2008).

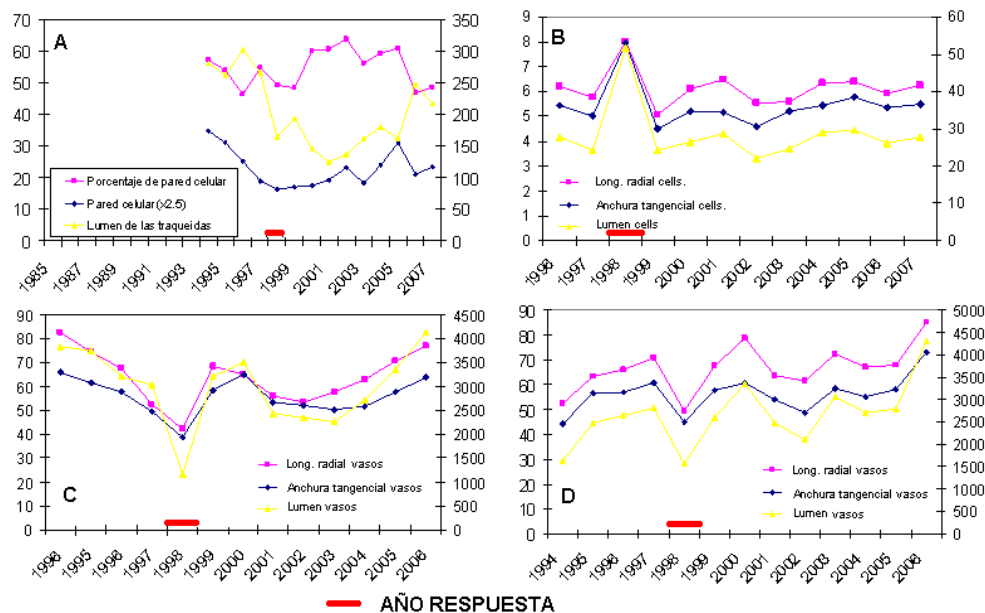


Figura 4. Representación gráfica de las principales variables para ejemplares de Pino (A); Aliso (B); Fresno (C) y Roble (D).

Los primeros trabajos que utilizaron como indicadores *proxies* los cambios anatómicos producidos en la estructura de la madera como respuesta a eventos de inundaciones fluviales se remontan a la década de los 80 (YANOSKY, 1984). Posteriormente, ST. GEORGE *et al.*, (2002) detectó eventos de inundaciones alta magnitud en el río Rojo (*Red River*, Canadá) a través de los cambios anatómicos observados en los vasos de los anillos de *Quercus macrocarpa* creados en el año del evento (“*flood rings*”). Más recientemente, ASTRADE y BÉGIN (1997) relacionaron cambios anatómicos en *Populus tremula* L. y *Quercus robur* L. con eventos de inundaciones y documentaron eventos de inundaciones producidos en primavera en el río Saône (Francia). Sin embargo, a pesar de estas experiencias y del conocimiento previo de los cambios anatómicos causados por inundaciones (ver resultados y referencias bibliográficas en KOZLOWSKI, 1997), el hecho de que en la mayoría de trabajos se asuma como principal precursor del cambio anatómico, la interrupción del flujo auxínico debido a situaciones anóxicas por la inundación parcial del tronco, limitan su aplicación para el estudio de avenidas torrenciales donde los daños a la vegetación tienen un origen más traumático. En este sentido, la filosofía de este trabajo está en concordancia con el concepto básico de Dendrogeomorfología, basado en el trinomio proceso–evento–respuesta (SHRODER, 1978). En este sentido, los principales resultados obtenidos en este trabajo son consistentes con los obtenidos en trabajos previos donde el cambio anatómico se debió, fundamentalmente, a daños traumáticos. Así, los cambios observados en *Pinus pinaster* Ait. (disminución sensible del lumen de traqueidas y cambio significativo de la longitud radial y anchura tangencial) son parecidos a los observados por FHAN y ZAMSKI (1970) quienes asociaron la existencia de “traqueidas traumáticas” a la existencia de heridas en el tejido



cambiales de *Pinus halepensis* Mill. Similares comportamientos han sido recientemente descritos en *Larix decidua* Mill. por STOFFEL y HITZ (2008). Las frondosas, por su parte, han sido menos utilizadas en dendrogeomorfología, debido fundamentalmente a la complejidad de su tejido xilemático. En este sentido, los resultados derivados en este trabajo son consistentes con los obtenidos recientemente por ARBELLAY (2008) en especies *Alnus incana* (L) Moench; *Populus sp*; y, de acuerdo con SCHWEINGRUBER (2001), WIMMER (2004); RUBIALES *et al.*, (2008), y STOFFEL y HITZ (2008), su conocimiento aporta una potente herramienta para llevar a cabo estudios de base dendrocronológica, como lo son los estudios dendrogeomorfológicos.

7. Conclusiones

El estudio anatómico de diferentes especies arbóreas afectadas por el impacto de la carga sólida durante un episodio de avenida torrencial, ha permitido definir una serie de parámetros indirectos útiles en estudios dendrogeomorfológicos aplicados a la dinámica torrencial. Por especies, éstos son:

- *Pinus pinaster* Ait.: decrecimiento significativo del lumen en traqueidas de la madera temprana; reducción acusada de la longitud radial de las traqueidas e incremento de la pared celular.
- *Alnus glutinosa*: reducción del lumen de vasos y aumento significativo del lumen de células. acompañantes.
- *Fraxinus angustifolia*: reducción del lumen de los vasos y del lumen de células. acompañantes.
- *Quercus pyrenaica*: reducción del lumen de los vasos y del lumen de células. acompañantes.
- *Populus sp*: disminución del área del lumen de los vasos.

Estos parámetros ayudarán en la localización de eventos pretéritos de avenida torrencial a partir de la secuencia de anillos de crecimiento y, con ello, mejorar el análisis de la frecuencia necesario para la toma de decisión de las medidas preventivas, especialmente en aquellas cuencas donde los datos de partida sean inexistentes o incompletos.

8. Agradecimientos

Los trabajos de estas recopilaciones y síntesis se enmarcan dentro del proyecto de investigación titulado "Mejoras en la frecuencia y magnitud de avenidas torrenciales mediante técnicas dendrogeomorfológicas" (Dendro-Avenidas) del Plan Nacional I+D+i (referencia CGL2007-62063 HID), financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación.

9. Bibliografía

ARBELLAY, E. 2008. Evidence of past debris-flow activity at Illgraben (Valais Alps, Switzerland) from Word anatomical and dendrogeomorphologica analysisi of injured brad-leaved trees. University of Fribourg, Fribourg, 78 pp.

ASTRADE, L., Y BEGIN Y. 1997. Tree-ring response of *Populus tremula* L. and *Quercus robur* L. to recent spring floods of the Sàone River, France. *Ecoscience* 4:232-239.

BALLESTEROS, J.A. 2008. Métodos dendrogeomorfológicos aplicados al estudio de procesos activos: Erosión hídrica y Avenidas Torrenciales. Universidad de León, 166 pp. León.

BALLESTEROS, J.A.; BODOQUE, J.M. y DÍEZ-HERRERO, A. 2008a. Dendrogeomorfología: los árboles como fuente de conocimiento de los desastres naturales. *La Cultura del Árbol, Revista de Arboricultura*, 52 (octubre 2008), 4-10. ISSN: 1576-2777; D.L. V-5435-1999.

BALLESTEROS CÁNOVAS, J.A.; EGUIBAR, M.; BODOQUE, J.M.; GUTIÉRREZ-PÉREZ, I., DÍEZ-HERRERO, A. Y STOFFEL, M. (en revisión). Combining dendrogeomorphological and topographical techniques for hydraulic modelling in mountain streams. Proceedings of 18th World IMACS / MODSIM Congress, Cairns, Australia. 4 p

BENITO, G. Y THORNDYCRAFT, V. R. 2004. Systematic, palaeoflood and historical data for the improvement of flood risk estimation, methodological guidelines. CSIC, Madrid, 115 pp.

BODOQUE, J. M., A. DÍEZ, J. DE PEDRAZA, J. F. MARTÍN Y OLIVERA J. F. 2006. Estimación de la carga sólida en avenidas de derrubios mediante modelos geomecánicos, hidrológicos e hidráulicos combinados: Venero Claro (Ávila). En Pérez A. y López J. (Eds.), *Geomorfología y territorio*. Universidad de Santiago de Compostela. 483-495.

BOLLSCHWEILER M., STOFFEL, M. Y SCHNEUWLY, D. M. 2008a. Dynamics in debris-flow activity on a forested cone – a case study using different dendroecological approaches. *Catena* 72:67-78.

BOLLSCHWEILER M., STOFFEL M., SCHNEUWLY D.M. Y BOURQUI K., 2008b. Traumatic resin ducts in *Larix decidua* stems impacted by debris flows. *Tree Physiology* 28, 255–263.

DÍEZ, A. 2001-2003. *Geomorfología e Hidrología fluvial del río Alberche. Modelos y SIG para la gestión de riberas*. Serie Tesis Doctorales nº 2. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España (Ministerio de Ciencia y Tecnología), Madrid, 587 pp.+ anexo + CD-ROM.

DÍEZ-HERRERO, A.; BALLESTEROS, J.A.; BODOQUE, J.M.; EGUÍBAR, 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.; LAIN-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, 190 págs., Madrid. D.L. M-46538-2008; ISBN 978-84-7840-770-5; NIPO 657-08-026-2.

FAHN, A. y ZAMSKI E. 1970. The influence of pressure, wind, wounding and growth substances on the rate of resin duct formation in *Pinus halepensis* wood. *Israel Journal of Botany* 19:429–446.



- GARCÍA ESTEBAN, L.; GUINDEO CASASÚS, A.; PERAZA ORAMAS, C. Y DE PALACIOS DE PALACIOS, P. 2003. *La madera y su anatomía*. Ed. Mundi-Prensa, 328 pp. Madrid.
- HITZ, O.M., GÄRTNER, H., HEINRICH, I., MONBARON, M. 2008. Application of ash (*Fraxinus excelsior* L.) roots to determine erosion rates in mountain torrents. *Catena* 72: 248-258.
- ISELI, M., y SCHWEINGRUBER, F. H. 1989. Sichtbarmachen von Jahrringen für dendrochronologische Untersuchungen. *Dendrochronologia* 4:145–157.
- KOZLOWSKI, T.T. 1997. Responses of woody plants to flooding and salinity. *Tree Physiology Monograph* 1:1-29.
- MINTEGUI, J.A. y ROBREDO, J.C. 2008. Estrategias para el control de los fenómenos torrenciales y la ordenación sustentable de las Aguas, suelos y bosques de las Cuencas de Montaña. PHI-VII/Documento Técnico N° 13. 162 pp. Montevideo
- RUBIALES, J. M.; BODOQUE, J. M.; BALLESTEROS, J. A. y DIEZ-HERRERO, A. 2008. Response of *Pinus sylvestris* roots to sheet-erosion exposure: an anatomical approach. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 8, 223–231.
- SCHWEINGRUBER, F. H. 1996. *Tree rings and environment, Dendroecology*. Paul Haupt, Bern, Stuttgart, Wien.
- SHRODER, J. F. (1978.) Dendrogeomorphological analysis of massmovement on Table Cliffs Plateau, Utah, *Quat. Res.*, 9, 168–185,
- ST. GEORGE, S., NIELSEN, E., CONCIATORI, F. Y TARDIF, J. 2002. Trends in *Quercus macrocarpa* vessel areas and their implications for tree-ring paleoflood studies. *Tree-Ring Research* Vol. 58(1/2):3-10.
- STOFFEL, M., y BOLLSCHWEILER M. 2008. Tree-ring analysis in natural hazards research – an overview. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 8:187–202.
- STOFFEL, M., y HITZ, O.M. 2008. Snow avalanche and rockfall impacts leave different anatomical signatures in tree rings of *Larix decidua*. *Tree Physiology* 28(11):1713–1720.
- WIMMER, R. 2002. Wood anatomical features in tree-rings as indicators of environmental change. *Dendrochronologia* 20:21–36.
- YANOSKY, T. M. 1984 Documentation of high summer flows on the Potomac River from the wood anatomy of ash trees, *Water Resource Bulletin* 20:241–250,
- YANOSKY, T.M. y JARRETT, R.D. 2002. Dendrochronologic Evidence for the Frequency and Magnitud of Palofloods. Ancient Floods, Modern Hazards: Principles and Application of Paloflood Hydrology. *Water Science and Application* Vol. 5:77-89.



ZIELONKA, T., HOLEKSA, J. y CIAPALA, S. 2008. A reconstruction of flood events using scarred tree in the Tatra Mountains, Poland. *Dendrochronologia*, doi:10.1016/j.dendro.2008.06.003

