

Datación de avenidas torrenciales y flujos de derrubios mediante metodologías dendrogeomorfológicas (barranco de Portainé, Lleida, España)

J. García-Oteyza^{1,2*}, M. Génova², J. Calvet¹, G. Furdada¹, M. Guinau¹, A. Díez-Herrero³.

(1) Grupo RISKINAT. Dpt. de Geodinàmica i Geofísica, Fac. de Geologia, Universitat de Barcelona, 08028 Barcelona, España.

(2) Departamento de Sistemas y Recursos Naturales, Universidad Politécnica de Madrid, 28040 Madrid, España.

(3) Área de Riesgos Geológicos, Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Madrid, España.

* Autor de correspondencia: M. Génova [mar.genova@upm.es]

> Recibido el 27 de febrero de 2015 - Aceptado el 26 de junio de 2015

García-Oteyza, J., Génova, M., Calvet, J., Furdada, G., Guinau, M., Díez-Herrero, A. 2015. Datación de avenidas torrenciales y flujos de derrubios mediante metodologías dendrogeomorfológicas (barranco de Portainé, Lleida, España). *Ecosistemas* 24(2): 43-00. Doi.: 10.7818/ECOS.2015.24-2.07.

La dendrogeomorfología resulta una herramienta muy útil en el análisis científico-técnico de las avenidas y flujos de derrubios en torrentes de alta montaña, en los que las fuentes de datos convencionales (caudales o precipitaciones) son escasas o inexistentes y presentan una cierta problemática social. El barranco de Portainé, en cuya cabecera se sitúa la estación de esquí homónima de Port Ainé (Lleida, España), cumple estas características. Fenómenos erosivos y deposicionales asociados, sobre todo, a períodos de lluvias intensas de verano, afectan periódicamente a la carretera de acceso a la estación de esquí, que atraviesa el barranco en varios puntos, con las consiguientes pérdidas económicas y potenciales daños personales y a los servicios. Con este trabajo se pretende estimar, mediante técnicas dendrogeomorfológicas, el número y la distribución temporal de avenidas y flujos torrenciales en el barranco, para conocer si las interacciones antrópicas en la red hidrográfica, asociadas a la apertura y operación de la estación de esquí y los accesos a la misma, pueden haber modificado su frecuencia y magnitud. Se han muestreado principalmente aquellos ejemplares arbóreos que presentaban daños externos manifiestos, originados por el impacto de los materiales arrastrados por las avenidas. Además se ha realizado un detallado estudio geomorfológico y se han recopilado los datos históricos disponibles. Con toda esta información se ha generado una base de datos de eventos pretéritos de avenidas para un periodo de 50 años, en la que se ha determinado un incremento significativo de estos eventos en las últimas décadas.

Palabras clave: dendrogeomorfología; estación de esquí; *Fraxinus excelsior*; Pirineos orientales; *Populus tremula*; mitigación del riesgo

García-Oteyza, J., Génova, M., Calvet, J., Furdada, G., Guinau, M., Díez-Herrero, A. 2015. Dating flash floods and debris flows through dendrogeomorphological methodologies (Portainé stream, Lleida, Spain). *Ecosistemas* 24(2): 43-00. Doi.: 10.7818/ECOS.2015.24-2.07.

Dendrogeomorphology is a very useful tool in the scientific-technical analysis of floods and debris flows in high mountain streams, where conventional sources of data (discharges or rainfall) are scarce or non-existent and certain social problems arise. The Portainé stream, whose head the eponymous ski station Port Aine (Lleida, Spain), meets these characteristics. Erosional and depositional phenomena associated mainly with periods of heavy summer rains, periodically affect the access road to the ski station, which crosses the stream at various points, with consequent economic losses and personal and services potential danger. This work aims to estimate, by dendrogeomorphological techniques, the number and time distribution of floods and torrential flows into the stream, to evaluate if anthropogenic interactions in the hydrographic network, associated with the opening and operation of the ski station and its access, may have changed their frequency. Tree specimens exhibiting obvious external damage caused by the impact of materials dragged through the torrential floods were sampled. A detailed geomorphological study was also conducted and the historical data available were compiled. With all this information a database of past flood events for a period of 50 years was generated, which has resulted in a significant increase of these events in recent decades.

Key words: dendrogeomorphology; ski station; *Fraxinus excelsior*; eastern Pyrenees; *Populus tremula*; hazard mitigation

Introducción y planteamiento general

Las avenidas e inundaciones son las catástrofes naturales con mayor repercusión socio-económica a escala global y nacional, especialmente aquellos eventos de carácter repentino y torrencial en zonas montañosas (avenidas y flujos torrenciales), que producen numerosas pérdidas de vidas humanas e importantes daños en los bienes materiales. Para prevenir estos riesgos naturales, el análisis científico de la peligrosidad asociada a las avenidas fluviales clásicamente ha empleado métodos hidrológico-hidráulicos y, en menor medida, histórico-paleohidrológicos y geológico-geomorfológicos. Sin

embargo, estas técnicas plantean enormes incertidumbres científicas por la disponibilidad de los datos de partida, su validez espacio-temporal, y su representatividad estadística. Así, muchas de las zonas analizadas no disponen de estaciones de aforo y/o pluviométricas próximas (que impiden un análisis estadístico o modelación hidrometeorológica del proceso precipitación-aportación, fiables), ni de documentación sobre inundaciones históricas, ni de registro de depósitos de inundación. Lo que sí que es fácil y frecuente localizar en casi todos los cauces torrenciales, es la presencia de vegetación de porte arbóreo y arbustivo, que se encuentra próxima a las orillas. En los troncos, ramas y raíces de estos árboles y arbustos ubicados en

determinadas posiciones geomorfológicas (bancos de orilla, barras longitudinales, llanura de inundación, etc.), queda registrada información sobre esos eventos de avenidas torrenciales pretéritas (evidencias dendrogeomorfológicas; Díez-Herrero et al. 2007; 2013a), que permite completar (e incluso suplir) el registro sistemático e histórico de avenidas torrenciales que han acontecido en esa corriente.

La dendrogeomorfología, como su propio nombre indica, es una rama científica que estudia las relaciones entre la dendrocronología y la geomorfología (análisis de la génesis, distribución espacial y evolución temporal de las formas del relieve terrestre y los procesos que las forman). Aunque existen numerosos trabajos dendrogeomorfológicos en la década de 1960 (La Marche 1963; Sigafos 1964; Harrison y Ried 1967; entre otros); incluso publicaciones pioneras con anterioridad, no es hasta inicios de la década de 1970 cuando se acuña el término y se establecen sus principales aplicaciones (Alestalo 1971). Los aspectos geomorfológicos que pueden ser analizados mediante fuentes de información y métodos dendrogeomorfológicos son casi tan diversos como ámbitos de estudio tiene la propia geomorfología; desde la génesis y datación de formas del relieve, hasta el estudio de las tasas y frecuencias de los procesos geomorfológicos.

La dendrogeomorfología se ha aplicado a prácticamente al estudio de todos los procesos geomorfológicos: fluviales, gravitacionales, glaciares, periglaciares, eólicos, lacustres, litorales y costeros, kársticos... (Stoffel y Bollschweiler 2008; Ballesteros et al. 2010). Incluso se incluyen también dentro de los estudios dendrogeomorfológicos los procesos no estrictamente geomorfológicos (ligados por ejemplo a la geodinámica interna), y que tienen su re-

flejo en la secuencia de anillos de los árboles, como: impactos meteoríticos, vulcanismo (efusivo, explosivo, lahares...), sismicidad y tsunamis, etc. Estas fuentes de datos dendrogeomorfológicas han sido empleadas en los estudios paleohidrológicos de las avenidas en los flujos torrenciales a lo largo del último medio siglo tanto en diferentes regiones del Mundo (Benito y Díez-Herrero 2015), como en particular en España (Díez-Herrero et al. 2013b) y en el ámbito pirenaico (Moya y García 2014).

El presente trabajo pretende datar eventos de flujos torrenciales ocurridos en la cuenca de Portainé (Lleida, España) con técnicas dendrogeomorfológicas. Se trata de saber si el registro histórico conocido de avenidas y flujos torrenciales en esta zona se ha reflejado en la vegetación de ribera; y si eventos de este tipo han ocurrido anteriormente. Como hipótesis de partida se intuye que las continuas interacciones antrópicas en la red hidrográfica y en la hidrología, asociadas al funcionamiento de la estación de esquí situada en la cabecera, pueden haber modificado las características de estos fenómenos (frecuencia, magnitud, tipología...).

Zona de estudio y problemática

La cuenca hidrográfica del barranco de Portainé (Pirineos Orientales, norte de la provincia de Lleida) drena hacia el norte. Tiene su cota máxima en la Torreta de l'Orri (2439 msnm) y mínima (950 msnm) en la confluencia con el río Romadriu o Santa Magdalena. La extensión de la cuenca es de 571 ha. La zona alta está ocupada por las instalaciones de la estación de esquí de Port Ainé, cuya carretera de acceso atraviesa el barranco en varios puntos (Fig. 1).

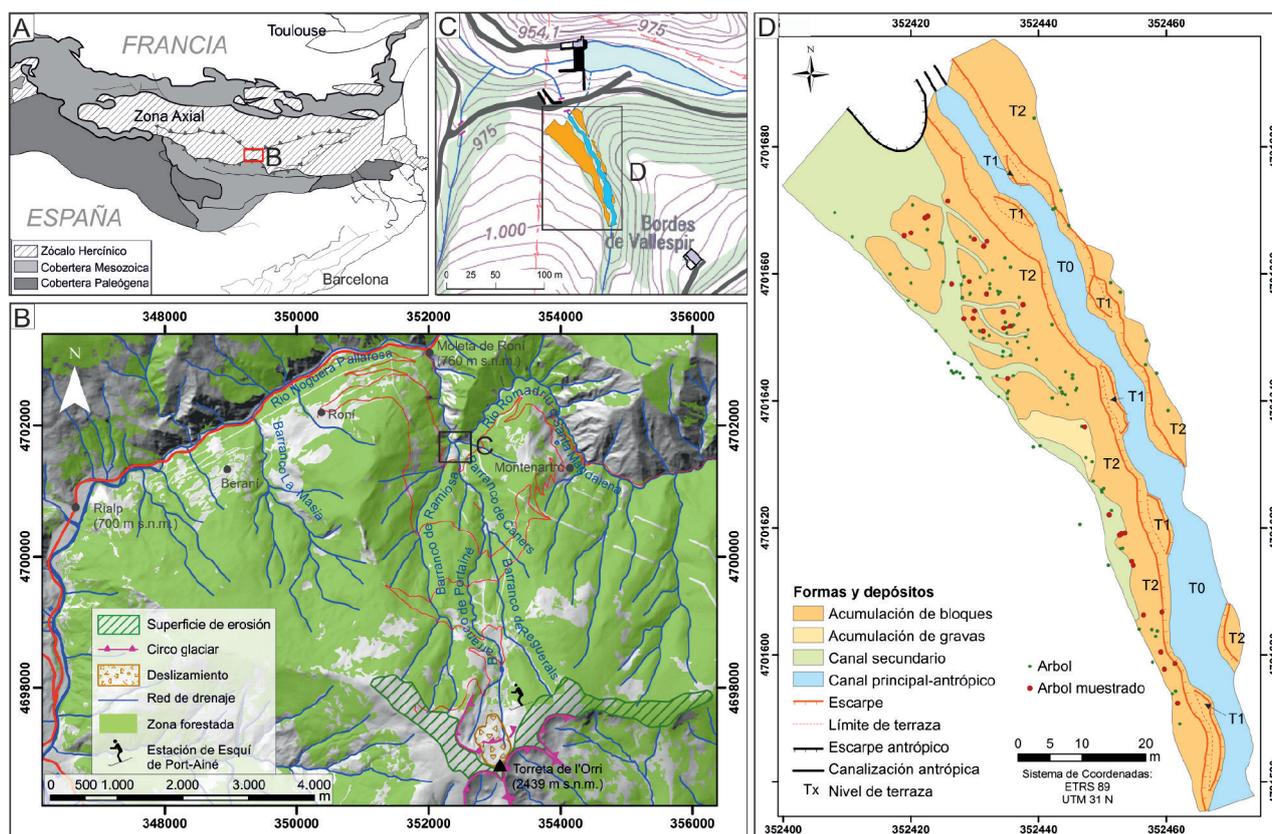


Figura 1. A). Contexto geológico del área de estudio: zona axial, Pirineos Orientales. B). Marco geomorfológico: elementos que caracterizan la cabecera de la cuenca del barranco de Portainé, red de drenaje y vías de acceso principales (modelo de sombras obtenido a partir del MDT 2x2 m del ICGC). C). Esquema de la localización del área de estudio en la confluencia del barranco de Portainé con el Río Romadriu, se observa la presa del Vallespir y la canalización artificial que capta las aguas del caudal ordinario vertiéndolas en el vaso de la presa (Mapa topográfico del ICGC). D). Cartografía geomorfológica de la zona de estudio con los elementos geomorfológicos y los depósitos que caracterizan el cono de deyección, así como la localización de los árboles presentes en la zona y la situación de los ejemplares muestreados.

Figure 1. A). Geological context of the study area: axial zone, Eastern Pyrenees. B). Geomorphological framework: elements that characterize the headwaters of Portainé Stream, drainage network and major access routes (Hillshade performed from de DTM 2x2 m from the ICGC). C). Outline of the location of the study area at the confluence of the Portainé Stream with Romadriu River. Vallespir dam and Portainé Stream artificial channel that carries ordinary water to reservoir (topographic map from the ICGC). D). Geomorphological mapping of the study area with geomorphological features and deposits that characterize the alluvial fan, and the location of trees present in the area and the situation of the sampled units.

La cuenca, geológicamente situada en la Zona Axial de los Pirineos, está constituida por materiales Cambro-Ordovícicos, compuestos por una alternancia de niveles pelíticos y areniscas con intercalaciones de niveles cuarcíticos y de pizarras. Estos materiales han sido intensamente tectonizados durante las orogenias Hercínica y Alpina y presentan una estructura muy plegada y fragmentada que propicia el desarrollo de formaciones superficiales.

Geomorfológicamente, es el resultado de una larga evolución post-Alpina: a) Desarrollo de superficies de erosión (edad probable anterior al Mioceno tardío, [Ortuño et al. 2013](#)), como el resto de alrededor de la Torreta de l'Orri ([Hartevelt 1969](#); [Hartevelt et al. 1970](#)); b) Afectación por el glaciario Pleistoceno, representado por el circo de la cabecera del barranco de Portainé; c) Afectación por intenso periglaciario en las zonas no ocupadas por glaciares, mayoritarias en la cuenca, que produjeron una gran cantidad de derrubios a expensas de los materiales del sustrato y que han dado lugar a gruesas formaciones superficiales coluviales (> 10 m) con materiales detríticos groseros. Como resultado, en la cuenca de Portainé se pueden distinguir dos grandes sectores ([IGC 2013](#)): el sector sur, en cabecera, presenta pendientes más suaves, entre 6° y 25° en general, y la red de drenaje poco encajada. Se encuentra cubierto por pastos por encima de los 2100 m y es donde se ha instalado una estación de esquí. El sector norte, densamente poblado por bosques, presenta pendientes más pronunciadas, entre 12° y 35° y la red de drenaje está profundamente encajada; en las vertientes dominan los depósitos coluviales regularizándolas, y en los fondos de los barrancos dominan los torrenciales.

Desde el año 2006 estos depósitos se están erosionando y producen flujos de derrubios frecuentes, especialmente durante las lluvias intensas de verano ([Portilla et al. 2010](#); [Luis-Fonseca et al. 2011](#); [Raimat et al. 2013](#)). Estos flujos han afectado a la carretera de acceso a la estación de esquí, implicando pérdidas económicas y potenciales daños personales y a los servicios. En la cuenca no existen ni estaciones meteorológicas ni de aforo, por lo que la frecuencia y magnitud de estos eventos en el pasado son desconocidas, sin embargo, según se indica en [IGC \(2012\)](#), se habrían instalado recientemente, por iniciativa privada, tres estaciones meteorológicas, en esta zona, que podrían dar una buena cobertura de la cuenca de Portainé. Por lo que respecta a los flujos sólo se dispone de un registro de información histórica ligada a los trabajos de construcción de la estación de esquí. Los trabajos se iniciaron con la construcción, en 1970, de un primer tramo de la carretera de acceso hasta la cota 1650 m. La estación fue inaugurada en 1986 y en 1995 se completó la carretera de acceso hasta la cota 2000 m.

El área concreta de estudio corresponde al cono de deyección que forma el barranco de Portainé en su confluencia con el río Romadriu ([Fig. 1](#)). Los flujos torrenciales del barranco de Portainé remodelan este cono de deyección. La construcción en 1996 de la presa de Vallespir en el río Romadriu modificó notablemente la morfología y dinámica de la confluencia del barranco de Portainé con el río Romadriu. En la parte inferior del cono de deyección de Portainé, en el extremo norte de la zona estudiada, se construyó una captación que lleva las aguas del caudal ordinario al vaso de la presa; esta captación dispone de unos aliviaderos que en caso de crecidas vierten aguas abajo de la presa. Después de cada avenida o flujo se reparan los desperfectos producidos en el camino, se evacúan los materiales acumulados en el río Romadriu y los que obstruyen la captación y los aliviaderos. En este cono se ha desarrollado una formación forestal mixta en la que domina el álamo temblón (*Populus tremula* L.), acompañado de Fresno de montaña (*Fraxinus excelsior* L.), abedul (*Betula* L. sp.), cerezo (*Prunus avium* L.) y otras especies mesohigrófilas, que ha sido afectada por los flujos torrenciales ocurridos.

Materiales y métodos

Metodología geomorfológica de campo y obtención de datos históricos

Se realizó una campaña de campo intensiva en marzo de 2014, en la que se llevó a cabo el levantamiento topográfico del cono de

deyección de barranco de Portainé. Mediante estación total (Geolite 504) se localizaron y delimitaron los diferentes elementos geomorfológicos que caracterizan el cono de deyección (lóbulo, escarpes naturales y antrópicos, terrazas, canal principal y secundarios, acumulaciones de gravas, bloques, etc...), así como los árboles presentes. En total se posicionaron 337 puntos en una superficie de unos 2780 m². Los datos de la estación total se georeferenciaron utilizando las ortofotos detalladas del Institut Cartogràfic de Catalunya. A partir de estos datos se elaboró, mediante ArcGIS (ESRI), la cartografía geomorfológica de detalle mostrada en la [Figura 1D](#).

En la cartografía geomorfológica se han diferenciado los árboles muestreados para el análisis dendrogeomorfológico del resto de árboles presentes en el cono de deyección. En la base de datos correspondiente a la capa de árboles, se identificó cada uno de los ejemplares muestreados con un identificador unívoco y se recopiló toda la información de campo recogida para el análisis dendrogeomorfológico: especie, perímetro, presencia de heridas y descortezados y otros indicios de daño como inclinación y aparición de ramas suplentes.

Los datos históricos han sido extraídos fundamentalmente del informe [IGC \(2013\)](#) que el Institut Geològic de Catalunya elaboró para evaluar la dinámica torrencial del barranco de Portainé. En este informe se recopiló toda la información previa existente y se elaboró una cartografía geomorfológica de la zona.

Análisis dendrogeomorfológico

Durante la campaña de campo se muestrearon por métodos dendrogeomorfológicos todos aquellos ejemplares arbóreos que presentaban daños manifiestos ([Fig. 2](#)), muy posiblemente originados por el impacto de los materiales arrastrados por las avenidas, y también algunos ejemplares próximos que pudieran estar afectados, aunque no presentaran señales externas del daño. Los 34 individuos muestreados pertenecen a 7 taxones diferentes (*Populus tremula* L., *Fraxinus excelsior* L., *Populus nigra* L., *Betula* L. sp., *Prunus avium* L., *Acer campestre* L. y *Juglans regia* L.); todos ellos ubicados dentro de la zona de depósito en el margen izquierdo del torrente y en diferentes posiciones, sobre barras y lóbulos de bloques, en sus bordes o dentro de los canales secundarios ([Fig. 1D](#)).

Para cada uno de los ejemplares seleccionados se recopilaban todos los datos necesarios para completar una ficha previamente preparada y se realizaron fotografías y esquemas de ubicación y de detalle. La extracción de las muestras dendrocronológicas (testigos cilíndricos o *cores*) se realizó mediante barrena Pressler estándar de 400 mm de longitud y 5 mm de diámetro interior. En cada ejemplar muestreado se extrajeron un mínimo de dos muestras lo más completas posible, a favor y en contra de la corriente, y, en su caso, otras muestras en la zona de la herida o del callo o en las ramas suplentes. Además se obtuvieron secciones completas de callo o del tronco en ejemplares muy dañados o muertos.

Una vez extraídas las muestras, se colocaron sobre soportes de madera para su conservación y secado. Las muestras secas se prepararon mediante secciones transversales o lijado y se procedió a realizar un contaje previo de los anillos con lupa binocular y fuente de luz fría. En estas fases del estudio fueron descartadas las muestras de varios ejemplares, por estar muy deterioradas o porque no se podían delimitar con claridad las diferentes etapas de crecimiento en grosor, de manera que, finalmente, se ha obtenido información de 29 ejemplares. En la medición se ha empleado la mesa de mediciones LINTAB con una precisión de medida de 0.01 mm y el programa informático asociado TSAPWin.

Mediante técnicas de sincronización, realizando análisis cualitativos y cuantitativos, visuales y estadísticos, utilizando las funciones estadísticas de TSAPWin y el programa COFECHA, se dataron las secuencias de crecimiento, asignando fechas a cada valor de la secuencia. Durante este proceso se identificaron anomalías, en especial anillos ausentes, y se dataron las posibles respuestas en las secuencias de crecimiento en grosor que pudieran estar relacionadas con los daños producidos por corrientes de derrubios ([Fig. 2](#)).

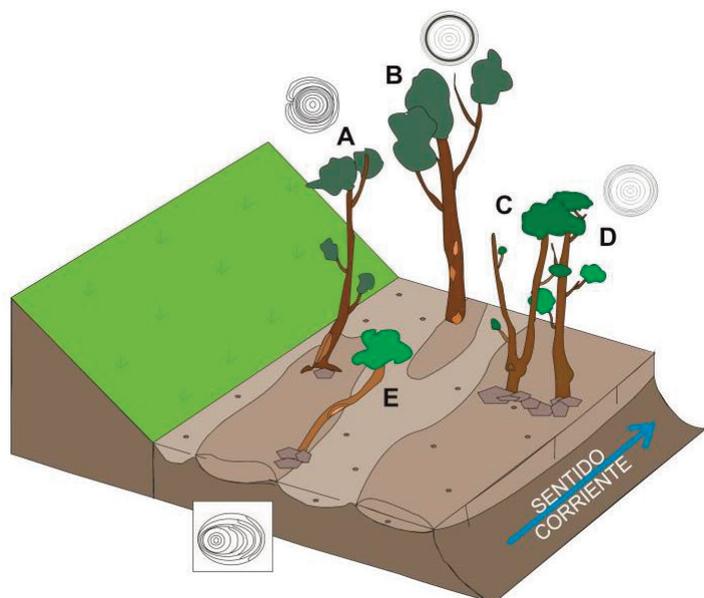


Figura 2. Indicadores dendrogeomorfológicos macroscópicos en árboles afectados por corrientes de derrubios y las respuestas asociadas que se observan en las secuencias de anillos de crecimiento en el barranco de Portainé. A y B: heridas con formación de callo que originan anomalías en los anillos de crecimiento; C y D: pérdida de la guía principal y sustitución por una/s rama/s secundaria/s; E: troncos inclinados. Diagrama modificado de Ruiz-Villanueva et al. (2010).

Figure 2. Macroscopic dendrogeomorphological indicators in trees affected by debris floods and associated responses in the tree ring growth sequences (Portainé stream). A and B: wounds with callus formation or causing anomalous tree rings; C and D: main guide loss and replacement by secondary branch/s; E: stems tilted. Modified of Ruiz-Villanueva et al. (2010).

Para evaluar los daños se utilizaron los siguientes indicadores dendrogeomorfológicos macroscópicos (FDE, *Flood Dendrogeomorphological Evidence*, Díez-Herrero et al. 2013a):

- Edad estimada mediante técnicas dendrocronológicas (FDE 3).
- Heridas y descortezados, con más o menos desarrollo de tejido calloso, situados en la base del tronco o a cierta altura (FDE 7, FDE 10).
- Decapitaciones o pérdida de guía principal y formación de codos y bifurcaciones (FDE 6), estimando la edad de las ramas suplentes formadas tras el decapitado.
- Inclinaciones del tronco (FDE 5).
- Troncos enterrados en los sedimentos.

Y en cuanto a los indicadores dendrogeomorfológicos mesoscópicos (Díez-Herrero et al. 2013a) en este trabajo se han analizado:

- Asimetrías en las secuencias de crecimiento (FDE 20).
- Formación de callos y presencia de cicatrices internas (FDE 22), caracterizadas por tejidos caóticos o desestructurados (Ballesteros et al. 2010), u otros tejidos anómalos (anillos oscurecidos).
- Supresión o formación de anillos estrechos como consecuencia de los daños y liberación del crecimiento por desaparición de competidores próximos eliminados en los eventos o por deposición de sedimentos (FDE 23). En la determinación de estos dos últimos indicadores se ha utilizado el programa LRM, que permite identificar los años más significativos por su representatividad, información que ha sido contrastada en cada uno de los ejemplares analizados.

La datación de heridas y descortezados proporciona información muy fiable del evento sucedido, mientras que otros indicadores se han utilizado como complementarios. Este es el caso de las asimetrías en las secuencias de crecimiento, indicadoras de la formación de madera de reacción después de que el árbol pierda su

posición vertical a causa del impacto de materiales arrastrados (árboles inclinados) o por la formación diferencial de tejidos caóticos y la presencia de anillos oscurecidos por la formación de sustancias protectoras después del daño. El resto de los indicadores sólo se ha considerado como apoyo, dado que pueden también estar relacionados con otros factores ecológicos, y teniendo en cuenta que en los sistemas bióticos resulta frecuente el retardo en la respuesta frente a las perturbaciones.

Respecto a las decapitaciones, la única manera factible de intentar datarlas es contrastando la edad y el crecimiento del tronco principal con la edad y crecimiento de las ramas suplentes. La datación de los eventos que posiblemente produjeron este tipo de daños se ha estimado en, al menos, 1 año antes del desarrollo de estas ramas.

La información resultante del análisis dendrogeomorfológico se introdujo a la base de datos de la cartografía geomorfológica, facilitando así la interpretación de los rasgos identificados en cada ejemplar muestreado y su relación con los diferentes eventos identificados.

Resultados

Descripción geomorfológica del cono de deyección y de las avenidas torrenciales conocidas

La anchura del cono de deyección del Barranco de Portainé varía desde 7 m en su ápice a 40 m en la parte más distal estudiada (Fig. 1D); su longitud es de 125 m y su superficie aproximada es de unos 2780 m². El índice de Melton es 0.62 (Camafort et al. 2012). Por su derecha está dominado por una corta vertiente rocosa de 45° de pendiente, cubierta de bosque. Por su izquierda enlaza suavemente con una vertiente lisa, de unos 15° de pendiente, cubierta de prados. El canal funcional principal se sitúa en el flanco derecho del cono, junto a la vertiente rocosa, tanto en los eventos torrenciales como en las épocas intermedias. En su parte distal, el cono y el canal quedan colgados sobre el río Romadriu, con un talud de 15 m de desnivel por encima del cual hay una pista que remonta por el valle de este río.

Al realizar el trabajo de campo (marzo 2014) la morfología del cono de deyección era debida, fundamentalmente, a dos flujos ocurridos en 2010, ligeramente retocada por un flujo ocurrido en 2013 y por la evacuación de los materiales acumulados en la captación. Se trata de un depósito heterométrico de bloques y gravas con una matriz arenosa; limitado por su derecha por la vertiente abrupta y con un límite lobulado por la izquierda, con surcos de evacuación de las aguas y pequeñas acumulaciones de gravas de menor tamaño (Fig. 1). El canal funcional actual, está encajado un metro en la zona apical y dos metros en la parte distal. Existen retazos discontinuos de un pequeño nivel de "terrace" (T1) situado a una altura intermedia entre el canal (T0) y la superficie de la acumulación (T2) (Fig. 1). Los árboles que ocupan el cono de deyección se sitúan fuera del canal. En la parte aguas arriba de la mayoría de árboles hay acumulaciones de bloques, gravas y troncos de árboles muertos y arrastrados.

Gracias a las fotografías cedidas por OPYCE SA (empresa gestora de la presa de Vallespir) se ha analizado la dinámica de los flujos de los veranos de 2008 y 2010. La Figura 3A (noviembre de 2008) corresponde a la parte distal del cono después del flujo de septiembre del mismo año y a la posterior incisión del canal fluvial. La línea roja muestra el nivel de la acumulación después del flujo y antes de la excavación del canal. Los depósitos de la zona de árboles corresponden a como quedó la acumulación después del flujo. La línea y las marcas verdes marcan la altura de la acumulación correspondiente a los flujos del verano de 2010 (véase también la Figura 3B de diciembre del 2012).

En síntesis, podemos indicar que los depósitos del cono de deyección han sido originados por flujos densos, remodelados al final del flujo por aguas menos cargadas de derrubios y posteriormente por las aguas del régimen estacional normal.



Figura 3. A). Fotografía tomada en dirección aguas arriba en noviembre del 2008 después del flujo torrencial del verano de 2008 y después de la incisión del canal fluvial. La línea roja marca el nivel de la acumulación justo después del flujo. En la zona de árboles de la derecha de la fotografía la acumulación no ha sido retocada artificialmente. La línea y los trazos verdes indican el nivel de la acumulación en diciembre de 2012, que corresponde muy aproximadamente a la acumulación generada por los flujos del verano del 2010. B) Fotografía tomada en diciembre del 2012. La morfología corresponde muy aproximadamente a la generada por los flujos del verano del 2010 y a la posterior incisión del canal fluvial.

Figure 3. A). Picture taken looking in upstream direction in November 2008, after the torrential flow of summer 2008 and after incision. The red line marks the accumulation level just after the flow. In the area with trees on the right of the photograph accumulation has not been modified artificially. Green line and strokes indicate the level of accumulation in December 2012, which closely corresponds to the flow accumulations generated in summer 2010. B). Picture taken in December 2012. The morphology closely corresponds to that of the flows generated in summer 2010 and the natural river channel incision.

No se tienen noticias de lo sucedido en el barranco de Portainé en 1907 y 1937, años en los que se produjeron, en el Pallars Sobirà, abundantes lluvias, con muchos deslizamientos y grandes riadas (Balasch et al. 2008).

Cuando en 1982 hubo nuevamente lluvias importantes en el Pirineo catalán, el paisaje de Portainé estaba experimentando importantes cambios debido a la construcción de la estación de esquí y de la carretera de acceso. Las obras duraron desde 1970 hasta 1996. En un estudio del año 2004 (ICC 2004), se indicaba que las canalizaciones (0.8 m de diámetro) de los torrentes bajo la carretera de acceso a la estación de Portainé eran suficientes y que, en todo caso, podía haber algún desbordamiento en periodos de retorno de 10 años. No hay información en este estudio de si entre 1970 y 2004 algún evento torrencial afectó a la carretera de acceso a la estación de esquí. Sin embargo, ya hemos indicado, que en 1982 hubo lluvias muy fuertes con consecuencias desastrosas que afectaron el Pallars Sobirà. Por lo que respecta al barranco de Portainé, Fañanás et al. (2009) muestran en una fotografía de 2008, una acumulación que interpretan como un dique natural de la avenida del año 1982. Asimismo, Fañanás y Raïmat 2011 (datos sin publicar), a partir de datos de campo, medidas retrospectivas y simulaciones, estiman que en este barranco se movilizaron, en 1982, más de 50 000 m³ de aportes. No hay más datos sobre lo que pudo suceder en 1982 en el Barranco de Portainé.

En mayo del 2006 se produjo una acumulación de aluviones en la carretera a su paso sobre el barranco de Reguerals (afluente del de Portainé) (DMAH 2006). No hay datos de lo que sucedió en el cono de deyección del Barranco de Portainé.

La noche del 11 al 12 de Septiembre de 2008, debido a unas fuertes lluvias, se produjo un importante flujo de derrubios, que provocó graves daños en la carretera. Hubo una importante acumulación en el cono de deyección del barranco de Portainé. La gran cantidad de derrubios movilizados provenía del lecho del torrente, que se excavó más de un metro en muchos tramos, y del pie de las vertientes junto al torrente. Todo este material fue parcialmente removilizado en una nueva torrentada en noviembre de 2008.

En el año 2009 se realizaron importantes obras de canalización de los barrancos en el cruce con la carretera. En 2009 y 2010 se efectuaron correcciones hidrológicas en el tramo medio del Barranco de Portainé. En Junio del 2010 se instalaron nueve grandes barreras dinámicas para retención de sedimentos. En la noche del 22-23 de julio y el 12 de agosto de 2010 se produjeron flujos muy importantes de derrubios. La mayoría de las barreras se rellenaron

totalmente y algunas de ellas sufrieron desperfectos. Se produjeron importantes acumulaciones sobre la carretera. Posteriormente se repararon las barreras. Finalmente, el 5 de agosto de 2011 y el 23 de julio de 2013 se produjeron dos nuevas torrentadas de menor importancia.

Datación de indicadores y evidencias dendrogeomorfológicas

Indicadores y evidencias dendrogeomorfológicas

Se han datado un total de 12 heridas, detectadas especialmente a partir de la formación de tejidos callosos caóticos, muy bien caracterizadas en las secciones y cuñas extraídas, así como por la presencia de anomalías indicadoras de cicatrices en los testigos extraídos. Junto a este tipo de evidencias se ha incluido la fecha de la muerte de un ejemplar de cerezo (por tanto hacen un total de 13 evidencias), que fue localizado medio enterrado en los depósitos de derrubios. Las fechas obtenidas han sido once (1967, 1968, 1976, 1988, 1991, 1997, 2003, 2009, 2010, 2011, 2012), pues en 2003 se dataron daños en 3 ejemplares distintos (Tabla 1, Figura 4).

Por su parte, decapitaciones y desarrollo de ramas suplentes es un fenómeno que sólo se ha observado en fresnos. Siete de los ocho ejemplares estudiados presentaban pérdida de la guía principal y en uno de los casos la sustitución fue por dos ramas suplentes de la misma edad (ver Tabla 1). Teniendo en cuenta diversas incertidumbres (edad exacta de la rama o el tiempo transcurrido entre que se produjo el daño y comenzó el desarrollo de la rama), las fechas finales estimadas de estas evidencias se han agrupado en 4 años: 1971, 1974, 1976 y 1980, tal como se observa en la Figura 4.

Otros indicadores complementarios (asimetrías y anillos oscurecidos) se han observado en el 75% de los ejemplares estudiados; mientras que supresiones, anillos ausentes y liberaciones son muy frecuentes y aparecen en la práctica totalidad de los ejemplares analizados (Tabla 1). Estos indicadores sólo se han considerado como apoyo y se han agrupado por años consecutivos. En la Figura 4 únicamente se han mostrado los coincidentes con los indicadores anteriores y siempre que se presenten en más de un 20% de los ejemplares analizados.

Finalmente señalar que destacan los años 1971, 1974, 1976, 1991, 1997, 2003, 2009 y 2010 por el número de evidencias (>10) y por la coincidencia entre distintos tipos de evidencias, con intervalos entre afectaciones desde 15 a 1 años (3, 2, 15, 6, 6, 6 y 1 años, respectivamente).

Tabla 1. Características de los ejemplares estudiados. Evidencias externas: H (heridas, descortezados, cicatrices), D (decapitación y sustitución de la guía principal por rama/s suplentes), O (muerte, inclinación, enterramientos). Muestras extraídas: T (testigos), S (secciones o cuñas). NSD: número de secuencias dendrocronológicas, EE: edad estimada. En las asimetrías, anillos oscurecidos, supresiones, anillos ausentes y liberaciones sólo se ha indicado el año en que comenzaron.

Table 1. Characteristics of specimens studied. External evidence: H (wounds, peeling, scarring), D (decapitation and replacing the main guide by secondary branch/s), O (death, tilt, burials). Samples taken: T (cores), S (sections or wedges). NSD: number of dendrochronological sequences, EE: estimated age. In the asymmetries, darkened rings, suppressions, missing rings and releases are only indicated the year began.

ID	Especie	Evidencias externas			Muestras extraídas		NSD	Cronología	EE	Datación indicadores Dendrogeomorfológicos				
		H	D	O	T	S				Herida/s y muerte	Asimetrías y anillos oscurecidos	Origen rama/s suplentes	Supresión/es y ausentes	Liberación/es
PA1	<i>Populus tremula</i>				2		2	1958-2010	53		1995, 1998, 2009		1998-99, 2006	2004
PA2	<i>Populus tremula</i>				2		2	1963-2010	48		1996		1984, 2006-07	1996, 2004
PA3	<i>Populus tremula</i>	X		X	3		3	1967-2013	47	2003	2010, 2012, 2003-2005		1979	1997, 2004
PA4	<i>Populus tremula</i>				2		2	1967-2013	47		2001		1989	1999, 2011
PA5	<i>Populus tremula</i>	X			3		3	1969-2013	45	2003			1984, 1988, 1998, 2010-11	2000, 2004
PA6	<i>Populus tremula</i>	X		X	5		4	1972-2013	42	1976, 1997	1994, 1999, 2010, 2007		1989, 2007, 1991, 2012	
PA7	<i>Fraxinus excelsior</i>	X		X	2		2	1963-2012	50				1972-76, 1993, 2003-04, 2009-12	1977
PA8	<i>Populus tremula</i>				2		2	1961-2013	53		1984, 1993, 1998		1970-75, 1996, 2009, 2013	1976, 1978, 2011
PA10	<i>Populus tremula</i>	X			2		3	1966-2013	48	1968	1984, 1986, 2010		1969, 1971, 1974, 1997, 2006	1978
PA11	<i>Populus tremula</i>	X		X	3		3	1978-2013	36	1988	1978, 2000, 2007, 2011		1999, 2006, 2010	2011
PA12	<i>Populus tremula</i>	X		X	2		2	1964-2013	50		1974		1984, 1996-97	1976
PA14	<i>Prunus avium</i>	X		X		9	12	1973-2013	41	2009	2010		1985, 2000	1993, 2010
PA15	<i>Acer campestre</i>	X		X		17	9	1978-2013	36	2010			1984, 1987, 1991, 2000, 2006	1985, 1997, 2011
PA19	<i>Populus tremula</i>	X			2		2	1974-2013	40					
PA20	<i>Juglans regia</i>	X			3		4	1930-2013	84	1967	1943, 2006		1975-76, 2010	1983, 1987, 2003, 2013
PA21	<i>Populus nigra</i>	X			2	2	4	1968-2013	46	2012	1999		2003, 2009, 2013	1984, 1997
PA22	<i>Populus nigra</i>				2		2	1969-2013	45		1981, 1988		1995	1987-94
PA23	<i>Populus nigra</i>	X			3		3	1961-2013	53	2003	1967, 1981		1982-83, 1995, 2011	1985, 2005
PA24	<i>Populus tremula</i>	X			2		2	1961-2013	53					
PA25	<i>Populus tremula</i>	X			2		2	1964-2013	50		1974, 1993, 2000, 2011		1997, 2010	
PA26	<i>Fraxinus excelsior</i>	X	X	X	2		3	1973-2013	41		1979	1973	1984, 2008-09	2010-11
PA27	<i>Fraxinus excelsior</i>	X	X		2		4	1970-2013	44		1974, 1984, 2005	1972	1971-74, 2002-03, 2010-11	1975, 2013
PA28	<i>Populus tremula</i>	X			1		2	1960-2013	54		1988		1984, 1993, 2007-09	1998, 2011
PA29	<i>Fraxinus excelsior</i>		X		3		6	1963-2013	51		1969	1973, 1973	1967-68, 1974-77, 2013	1970-1972
PA30	<i>Fraxinus excelsior</i>		X		3		2	1955-2012	58			1975	1962, 1967, 1983, 1993	1980, 2000
PA31	<i>Fraxinus excelsior</i>		X		2		4	1962-2013	52		1978	1976	1971-77, 1997, 2003	1980, 1992, 2000, 2013
PA32	<i>Fraxinus excelsior</i>	X	X		3		4	1957-2013	57		1978	1981	1974, 1993	2013
PA33	<i>Fraxinus excelsior</i>	X	X		3		4	1973-2013	41	1991	1992	1977	2001, 2009-10	1992-95, 2013
PA34	<i>Prunus avium</i>			X		2	2	1979-2010	32	2011			1983, 1997, 2005	1988, 1999, 2003

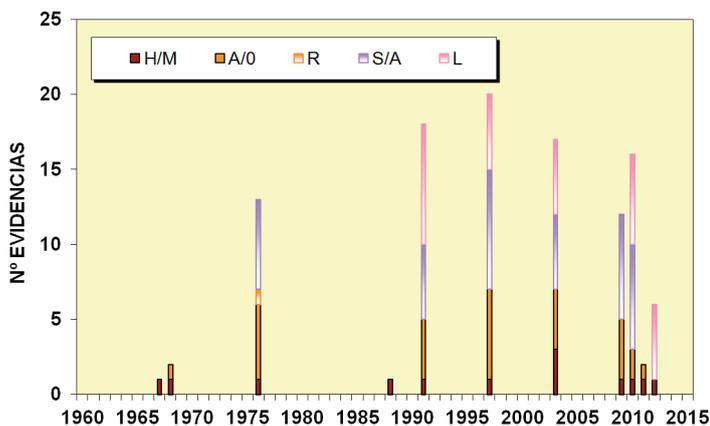


Figura 4. Número de evidencias dendrogeomorfológicas datadas en el barranco de Portainé. H/M: Heridas y muertes. A/O: asimetrías en las secuencias de crecimiento y/o anillos oscurecidos. R: desarrollo de ramas supletas. S/A: supresiones o anillos ausentes. L: liberaciones.

Figure 4. Number of dendrogeomorphological evidence dated in the Portainé ravine. H/M: Injuries and deaths. A/O: asymmetries in the tree ring sequences and/or darkened rings. R: development of secondary branches. S/A: supressions or missing rings. L: releases.

La edad de los árboles como indicador dendrogeomorfológico

En Díez-Herrero et al. (2007; 2013a) se indican los patrones de distribución de las edades de los árboles dañados como una de las evidencias dendrogeomorfológicas de carácter macroscópico. En el bosque mixto estudiado dos de las especies más frecuentes son *Populus tremula* y *Fraxinus excelsior*. Se han analizado, respectivamente, secuencias de crecimiento completas de 14 y 8 ejemplares de estas especies. La edad máxima y la edad media en ambos taxones son muy similares (ver Tabla 2) y también coinciden con las de *Populus nigra*, especie mucho menos frecuente en la zona y de la que se poseen datos sólo de 3 ejemplares. Por tanto, existe coincidencia en la fecha aproximada del inicio de establecimiento de las especies citadas en el área de estudio, según la edad máxima (próxima a la edad media estimada), tanto de los chopos (*Populus tremula* y *P. nigra*) como de los fresnos, que habrían colonizado este lugar entre 1955 y 1960.

Tabla 2. Edades máxima y media estimada en los ejemplares estudiados. N: nº de ejemplares, Emax: edad máxima, EmedE+ ds: edad media estimada, ds: desviación estándar.

Table 2. Maximum and average ages estimated in the studied specimens. N: No of trees, Emax: maximum age, Emede + ds: average age estimated, ds: standard deviation.

ESPECIE	N	EMax	EmedE± ds
<i>Populus tremula</i>	14	54	48±5.3
<i>Fraxinus excelsior</i>	8	58	49±6.7
<i>Populus nigra</i>	3	53	48±4.4

Discusión

Se han datado con fiabilidad un total de 11 años con evidencias dendrogeomorfológicas: 1967, 1968, 1976, 1988, 1991, 1997, 2003, 2009, 2010, 2011 y 2012, que reflejan daños en los árboles del cono de deyección del barranco de Potainé, muy posiblemente producidos por eventos de avenidas torrenciales. Estos eventos se iniciarían en 1967 y entre 2009 y 2012 aumentarían su frecuencia a 1 evento cada año.

Por su parte, el estudio documental indica que se pueden destacar 3 grandes eventos extraordinarios (1907, 1937 y 1982) que afectaron a grandes áreas del Pirineo, pero no hay información sobre como pudieron afectar al barranco de Portainé y ninguno de los 3 está reflejado en las evidencias dendrogeomorfológicas. Los árboles muestreados nacieron a partir de los años cincuenta (excepto uno) y por tanto no pueden incluir señales de 1907 y 1937.

Tanto los chopos como los fresnos presentan edades máximas y medias estimadas muy similares (58-53 y 49-48 años, respectivamente). Posiblemente, el margen del barranco fue intensamente explotado para su cultivo y, tras ser abandonado, fue posteriormente colonizado por la vegetación típicamente ripícola actual. La existencia de, al menos, un ejemplar de nogal (*Juglans regia*) de más de 80 años (Tabla 1), resulta un indicador de la presencia antigua de frutales. Sin embargo, no se debe descartar un posible evento de avenida muy destructivo en fechas anteriores a 1955 como posible origen del establecimiento posterior de la formación forestal actual.

En cuanto al evento de 1982, únicamente aparecen posibles evidencias en 3 ejemplares, que presentan supresiones y liberaciones consideradas como datos complementarios. La ausencia de árboles junto al cauce se podría asociar a los efectos destructivos de este evento, aunque esta posibilidad no encaja con la ausencia de señales en 1982 o 1983 en los árboles del resto del cono. Esta falta de evidencias podría ser el reflejo de la heterogeneidad de los núcleos de tormenta que se generan en situaciones meteorológicas realmente excepcionales, a menudo relacionados con las condiciones orográficas y que, por tanto, condicionan la respuesta de las cuencas a distintas escalas. La cuenca de Portainé, pues, podría haber sido poco afectada en esa situación de escala regional realmente extraordinaria.

Por otro lado, seis eventos históricos recientes, entre 2006 y la actualidad, están documentados en informes y afectan la carretera de la estación de esquí. En 2006 se produce un pequeño flujo (que no alcanza el cono estudiado) y a partir de 2008 se producen 5 eventos torrenciales de tipo corriente de derrubios, casi todos ellos evidenciados dendrogeomorfológicamente. Según el informe AO-003/12 (IGC 2012), estos flujos no se corresponden con episodios de precipitación excepcionales, por lo que cabe pensar que ciertas alteraciones en la cuenca han aumentado la susceptibilidad a su generación. La importante movilización de material durante las corrientes de derrubios acaecidas a partir de 2008 no parece que tenga precedentes. Anteriormente las avenidas no parece que causaran problemas en la carretera, ya que no hay ningún dato histórico de ningún tipo que lo registre. Teniendo en cuenta que las canalizaciones construidas bajo la carretera consistían en tubos de hormigón de 80 cm de diámetro, se deduce que en las partes altas de estos torrentes se concentraba agua, con cierta carga de fondo, capaz de ser fácilmente evacuada. En la parte baja de la cuenca, el aumento del caudal provocado por la natural concentración de las aguas pudo dar lugar a flujos que afectarían el cono estudiado. Posiblemente, los eventos determinados entre 1967 y 2003 por evidencias dendrogeomorfológicas (7 eventos), correspondan a avenidas torrenciales de este tipo, de magnitudes extraordinarias pero no extremas, con una media aproximada de 1 evento torrencial extraordinario cada 5 años.

Por tanto, los datos dendrogeomorfológicos obtenidos son, por un lado, coincidentes con la escasa información documental de la última década y además, en conjunto, aportan información de gran interés acerca de la dinámica torrencial de la cuenca de Portainé, señalando diferencias en la frecuencia y magnitud de los eventos antes y después de 2008. Posiblemente las intervenciones que se hicieron en la cabecera del barranco, en la zona de las pistas de esquí, modificaron la hidrología superficial, favoreciendo la circulación superficial en detrimento de la infiltración y provocando un aumento de los caudales concentrados que llegan al barranco. La incisión en el lecho del barranco y el socavamiento de los pies de vertiente adyacentes han abierto una brecha erosiva en la formación superficial coluvial, que puede preverse que irá en aumento

sin que se perciban signos de posible vuelta a la estabilidad. En este sentido, nuestro estudio abre una nueva vía de aportación al conocimiento de la dinámica torrencial en relación con las actividades antrópicas, transdisciplinar al retroanálisis meteorológico y a las investigaciones históricas y geomorfológicas.

Agradecimientos

Este trabajo se ha llevado a cabo gracias al apoyo financiero de los siguientes Proyectos e instituciones: Proyecto CHARMA (MINECO, Ref.: CGL2013-40828-R), Proyecto 300249 (Fundació Bosch i Gimpera, Universitat de Barcelona) y Departamento de Geodinámica y Geofísica (Universitat de Barcelona).

Referencias

- Alestalo, J. 1971. Dendrochronological interpretation of geomorphic processes. *Fennia* 105, 1-140.
- Balash, C., Becat, J., Marugan, C.M., Nadal, A., Rapalino, V., Remacha, R. 2008. *Les riuades del segle XX al Pallars Sobirà: 1907, 1937 i 1982*. Colección: Arxius y societats: Quaderns de divulgació històrica nº 2. Barcelona, 240 pp., Departament de Cultura i Mitjans de Comunicació, Generalitat de Catalunya. Barcelona, España.
- Ballesteros, J.A., Bodoque, J.M., Díez-Herrero, A., Génova, M.; Gutiérrez, E., Moya, J., Muntán, E., Oller, P., Rubiales, J.M., Ruiz-Villanueva, V., 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, España. 119 pp. ISBN 978-84-96211-47-6.
- Benito, G., Díez-Herrero, A. 2015. Palaeoflood Hydrology: Reconstructing Rare Events and Extreme Flood Discharges. En: Paron, P., Di Baldassarre, G. (eds.), *Hydro-Meteorological Hazards, Risks, and Disasters*. Hazards and Disasters Series (John F. Shroder, Series Editor), Chapter 3, pp. 65-104, Elsevier, Amsterdam, Países Bajos.
- Camafort, M., González, M., Pinyol, J., Vilaplana, J.M., Oller, P. 2012. Evaluación de la susceptibilidad por corrientes de derrubios. Aplicación al Mapa para la Prevención de Riesgos Geológicos 1:25 000 de Cataluña. En: González Díez, A. (Coord.). *Actas de la XII Reunión Nacional de Geomorfología, Santander 2012*. Sociedad Española de Geomorfología-Universidad de Cantabria. PlubliCan Ediciones. Santander, España.
- Díez-Herrero, A., Ballesteros, J.A., Bodoque, J.M., Eguibar, 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. 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.; Ruiz-Villanueva, V. 2013b. A review of dendrogeomorphological research applied to flood risk analysis in Spain. *Geomorphology* 196, 211-220.
- DMAH 2006. *Informe sobre el risc torrencial sobre accessos a Portainé*. Informe interno. 4 pp. DMAH, Serveis territorials de Lleida, Oficina Comarcal del Pallars Sobirà, Generalitat de Catalunya. Lleida, España.
- Fañanás, C., Aguilar Marín, N., Raïmat Quintana, C., Luis Fonseca, R. 2009. Corrección hidrológica en el barranco de Portainé. En: Alonso, E., Cominas, J., Hürlimann, M. (eds.). *VII Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables. Barcelona, 27-30 de Octubre de 2009*, p. 999-1011. CIMNE, Barcelona, España.
- Harrison, S.S., Ried, J.R. 1967. A flood-frequency graph based on tree-scar data. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 21, 23-33.
- Hartevelt, J.J.A., de Sitter, L-U., Zwart, H.J., Savage, J.F. 1969. *Geological Map of Central Pyrenees. Sheet 10. Segre - Valira, Andorra - Spain*, Geological Institute, Leiden University, Leiden, Países Bajos.
- Hartevelt, J.J.A. 1970. Geology of the Upper Segre and Valira Valleys, Central Pyrenees, Andorra, Spain. *Leidsche Geologische Mededelingen* 45:167-236.
- ICC 2004. *Estudi de riscs geològics al terme municipal de Rialp (Pallars Sobirà)*, Ref : ICC/AR-029-04. 149 pp y 3 anexos. Institut Cartogràfic de Catalunya, Generalitat de Catalunya. Barcelona, España.
- IGC 2012. *Avaluació hidrològica i geològica preliminar de l'estat actual dels barrancs del vessant nord del Pic de l'Orri i de la carretera de Roní a Portainé (Rialp): Bloc 1: Estudi de la conca hidrològica nord del Pic de l'Orri*. Ref.: AO-003/12, 103 pp. y 3 anexos. Instituto Geológico de Cataluña, Generalitat de Catalunya. Barcelona, España.
- IGC 2013. *Avaluació de la dinàmica torrencial del torrent de Portainé*, 2 vol. Código AP-035/13. Instituto Geológico de Cataluña. Generalitat de Catalunya. Barcelona, España.
- La Marche, V.C. Jr. 1963. Origin and geologic significance of buttress roots of bristlecone pines, White Mountains, California, U.S. *Geological Survey Professional Paper* 475-C, C149-C150.
- Luis-Fonseca, R., Raïmat, C., Hürlimann, M., Abancó, C., Moya, J., Fernández, J. 2011. Debris-flow protection in recurrent areas of the Pyrenees. Experience of the VX systems from output results collected in the pioneer monitoring station in Spain. *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*: 1063-1071. DOI: 10.4408/IJEGE.2011-03.B-115.
- Moya, J., García, R. 2014. Obtención de la curva de magnitud – frecuencia de corrientes de derrubios mediante el uso combinado de datación relativa y datación dendrocronológica. El ejemplo del Barranco del Tordó (Prepirineo Oriental). En: S. Schnabel, S., Gómez Gutiérrez, A. (eds.), *Avances de la Geomorfología en España 2012-2014*, pp. 376-379, XIII Reunión Nacional de Geomorfología, Universidad de Extremadura y Sociedad Española de Geomorfología, Cáceres, España.
- Ortuño, M., Martí, A., Martín-Closas, C., Jiménez-Moreno, G., Martinetto, E., Santanach, P. 2013. Palaeoenvironments of the Late Miocene Pruedo Basin: implications for the uplift of the Central Pyrenees. *Journal of the Geological Society of London* 170:79–92. doi: 10.1144/jgs2011-121.
- Portilla, M., Chevalier, G., Hürlimann, M. 2010. Description and analysis of the debris flows occurred during 2008 in the Eastern Pyrenees. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 10: 1635–1645.
- Raïmat, C., Riera, E., Graf, Ch., Luis-Fonseca, R., Fañanás, C., Hürlimann, M. 2013. Experiencia de la aplicación de RAMMS para la modelización de flujo tras la aplicación de las soluciones flexibles VX en el barranco de Portainé. En: *Libro del VIII Simp. Nac. Sobre Taludes y Laderas Inestables, Palma de Mallorca, 11-14 Junio 2013*. CIMNE, Barcelona, 1131-1144.
- Ruiz-Villanueva, V., Díez-Herrero, A., Stoffel, M., Bollschweiler, M., Bodoque, J.M., Ballesteros, J.A. (2010). Dendrogeomorphic analysis of flash floods in a small ungauged mountain catchment (Central Spain). *Geomorphology* 118, 383-392.
- Sigafoos, R.S. 1964. Botanical evidence of floods and flood-plain deposition. *Geological Survey Professional Paper (United States)* 485-A, 1-35.
- Stoffel, M., Bollschweiler, M. 2008. Tree ring analysis in natural hazard research- an overview. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 8: 187-202.