

*Proyectos de investigación en parques nacionales: 2010-2013*

## INVESTIGACIONES DENDROGEOMORFOLÓGICAS APLICADAS A LA GESTIÓN DE LOS RIESGOS E IMPACTOS EN LA RED DE PARQUES NACIONALES

ANDRÉS DíEZ-HERRERO<sup>1</sup>, JOSÉ MARÍA BODOQUE DE POZO<sup>2</sup>,  
MARÍA DEL MAR GÉNOVA FUSTER<sup>3</sup>, JUAN ANTONIO BALLESTEROS CÁNOVAS<sup>4</sup>,  
PABLO L. MAYER SUÁREZ<sup>5</sup>, JULIO GARROTE REVILLA<sup>6</sup>,  
JUAN MANUEL RUBIALES JIMÉNEZ<sup>7</sup>, MIGUEL ÁNGEL SAZ SÁNCHEZ<sup>8</sup>,  
MARÍA DE LOS ÁNGELES PERUCHA ATIENZA<sup>1</sup>, ELEUTERIO BAEZA CHICO<sup>1</sup>,  
MARIO HERNÁNDEZ RUIZ<sup>1</sup>, MIGUEL ÁNGEL EGÚIBAR GALÁN<sup>9</sup>,  
MARÍA ESTELA NADAL ROMERO<sup>10</sup>, Y EULOGIO PARDO IGÚZQUIZA<sup>1</sup>

### RESUMEN

Entre los múltiples aspectos de gestión de los parques nacionales está el asegurar la integridad física de los visitantes y personal del parque y sus instalaciones ante los procesos activos potencialmente catastróficos, como las avenidas torrenciales, desprendimientos de rocas, aludes de nieve, etc.; y a la inversa, controlar los impactos potenciales de las actividades humanas sobre los ecosistemas del parque. Por ello, el presente estudio ha tenido por objeto el desarrollo de novedosas metodologías de investigación dendrogeomorfológica aplicadas al análisis y prevención de los riesgos naturales (en particular, las avenidas torrenciales) y los impactos del tráfico de visitantes por sendas y caminos muy transitados (concretamente, la erosión de suelo edáfico).

Para ello, se han seleccionado con carácter piloto cuatro parques nacionales de la Red que han tenido en el pasado y tienen en la actualidad serios problemas asociados a ambos fenómenos: varias víctimas

<sup>1</sup> Instituto Geológico y Minero de España, Ríos Rosas 23, 28003 Madrid, Telf. 913495966, Fax 913495955, andres.diez@igme.es, ma.perucha@igme.es, e.baeza@igme.es, m.hernandez@igme.es, e.pardo@igme.es

<sup>2</sup> Departamento de Ingeniería Geológica y Minera, Universidad de Castilla-La Mancha, Avda. Carlos III s/n, 45071 Toledo, josemaria.bodoque@uclm.es

<sup>3</sup> Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Forestal, Universidad Politécnica de Madrid, Avda. Ramiro de Maeztu s/n, 28040 Madrid, mar.genova@upm.es

<sup>4</sup> Institute of Geological Sciences, University of Bern, Baltzerstrasse 1+3, CH-3012 Bern (Suiza), juan.ballesteros@dendrolab.ch

<sup>5</sup> Departamento de Geografía, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Pérez del Toro 1, 35003 Las Palmas de Gran Canaria, pmayer@dgeo.ulpgc.es

<sup>6</sup> Departamento de Geodinámica, Universidad Complutense de Madrid, Avda. José Antonio Nováis s/n, 28004 Madrid, julio@ucm.es

<sup>7</sup> Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Universidad Politécnica de Madrid, Ciudad Universitaria s/n, 28040 Madrid, jm.rubiales@upm.es

<sup>8</sup> Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza, Pedro Cerbuna 12, 50009 Zaragoza, masaz@unizar.es

<sup>9</sup> Dep. de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, meguibar@hma.upv.es

<sup>10</sup> Institute for Biodiversity and Ecosystem Dynamics, University of Amsterdam, Science Park 904, 1098 XH Amsterdam (Países Bajos), M.E.NadalRomero@uva.nl

mortales por avenidas súbitas en el barranco de Las Angustias (P.N. de la Caldera de Taburiente) y en la Sierra de Guadarrama; y pérdidas de suelo aceleradas en las sendas de acceso al Castillo y Ermita de Monfragüe (P.N. de Monfragüe) y a la cascada de la Cola de Caballo (P.N. de Ordesa y Monte Perdido).

Una vez aplicadas estas técnicas en ambos parques, los resultados (bases de datos de eventos históricos y recientes, modelos hidrológicos e hidráulicos, planos de peligrosidad y riesgo, propuestas de medidas preventivas de ordenación, estimación de tasas y evolución en el tiempo...) ponen a disposición de los gestores herramientas útiles para la toma de decisiones; y las novedades metodológicas introducidas serán de aplicación, como base y esquema conceptual, al resto de los parques de la Red.

**Palabras clave:** parque nacional, avenida, inundación, erosión, riesgo, impacto.

## SUMMARY

Among the many aspects of national parks management is ensuring the physical safety of visitors and park staff and facilities against the potentially catastrophic active processes, as torrential floods, rock-falls, avalanches, etc. And conversely, control the potential impacts of human activities on ecosystems of the park. Therefore, this paper aims to develop innovative research on dendrogeomorphological methodologies applied to the analysis and prevention of natural risks (in particular, torrential flash floods) and the impacts of visitor traffic on the trail paths (specifically, soil erosion).

For this purpose, four national parks of the Network have been selected as study sites. Historically they have suffered serious problems associated with both phenomena: several deaths caused by flash floods in the gorge of Las Angustias (Caldera de Taburiente National Park) and Sierra de Guadarrama National Park; and accelerated soil losses in the paths of access to the Castle and the Hermitage (Monfragüe National Park) and the Cola de Caballo waterfall (Ordesa and Monte Perdido National Park).

Once these techniques are implemented in these parks, the results (past flood events database, hazard and risk schemes, management proposals for preventive measures, estimation of rates and temporal trends...) and innovate methodologies developed will be applicable to other parks of the Network, by providing useful tools for management making decisions.

**Key words:** national park, flood, erosion, risk, environmental impact.

## INTRODUCCIÓN

La gestión de los espacios naturales protegidos, y en particular de la Red de Parques Nacionales, es una tarea compleja, que requiere del asesoramiento científico y técnico, y el desarrollo de herramientas de apoyo para la toma de decisiones. Entre los múltiples aspectos de esa gestión está el asegurar la integridad física de los visitantes y personal del parque y sus instalaciones, ante los procesos activos potencialmente catastróficos,

como las avenidas torrenciales, desprendimientos de rocas, aludes de nieve, etc.; y a la inversa, controlar los impactos potenciales de las actividades humanas sobre los ecosistemas del parque.

La Red de Parques Nacionales españoles está constituida por una enorme variedad de tipologías de espacios, en los que está documentada prácticamente la totalidad de procesos geológicos activos, desde los asociados a la geodinámica interna (procesos tectónicos-sísmicos, volcánicos,

*Proyectos de investigación en parques nacionales: 2010-2013*

halocinesis-diapíricos...) hasta los vinculados con la geodinámica externa (procesos gravitacionales, glaciares, periglaciares, fluviales, eólicos, litorales, lacustres, kársticos, etc.). Eso sí, los distintos procesos tienen tasas de actividad y ámbitos de actuación muy diferentes en los distintos parques, destacando los procesos fluviales s.l. (torrenciales, aluviales...) y erosivos de arroyada no concentrada, como los más repetidos en los parques de la Red (Tabla 1).

Muchos de estos procesos, por sus tasas de actividad y ámbito de actuación, forman parte de la

dinámica natural de los sistemas ecológicos de los parques; pero también pueden interferir con las actividades humanas, poniendo en peligro tanto la integridad física del personal del parque y de los visitantes, como generando situaciones potenciales de riesgo para las infraestructuras y servicios del mismo (centros de recepción e información de visitantes, sendas y rutas, puentes y pasarelas, vías de comunicación y de transporte de energía, infraestructuras para acampada, etc.).

También las actividades antrópicas que se desarrollan en los parques, como el senderismo y

PROCESOS GEOLÓGICOS ACTIVOS	INTERNOS				EXTERNOS									
	V	S	D	G	Perigl.		Ld	Fluvial		E	Lt	Lc	K	T
					H	A		A	F					
<b>Aigüestortes i E. S.Maurici</b>														8
<b>Archipiélago de Cabrera</b>														5
<b>Cabañeros</b>														4
<b>Caldera de Taburiente</b>														5
<b>Doñana</b>														4
<b>Garajonay</b>														3
<b>Islas Atlánticas</b>														3
<b>Monfragüe</b>														4
<b>Ordesa y Monte Perdido</b>														10
<b>Picos de Europa</b>														7
<b>Sierra de Guadarrama</b>														6
<b>Sierra Nevada</b>														8
<b>Tablas de Daimiel</b>														3
<b>Teide</b>														6
<b>Timanfaya</b>														4
<b>T: 15</b>	4	7	2	1	9	6	11	12	9	4	3	7	5	

**Tabla 1.** Procesos geológicos activos en los parques nacionales de la Red. Procesos internos: V, volcanismo; S, sismicidad; D, diapirismo. Procesos externos: G, glaciar; Periglacial H, hielo-deshielo; Periglacial A, aludes de nieve; Ld, movimientos de ladera; Fluvial A, arroyada; Fluvial F, fluvial concentrado; E, eólicos; Lt, litorales; Lc, lacustres; K, kársticos; T, total de procesos. El color rojo indica alta frecuencia y/o magnitud del proceso; el color naranja, frecuencia y/o magnitud intermedia; el color blanco, ausencia de estos procesos en el Holoceno.

**Table 1.** Active geological processes in the Spanish National Park Network. Internal Processes: V, volcanism; S, seismicity; D, diapirism. External processes: G, glacier; Periglacial H, freeze-thaw; Periglacial A, avalanches; Ld, landslides; Fluvial A, sheet erosion by runoff; Fluvial F, concentrated erosion; E, aeolian; Lt, coastal; Lc, lacustrine; K, karst; T, the total processes. Red colour indicates high frequency and / or magnitude of the process; the orange colour, middle frequency and / or magnitude; white colour, the absence of these processes in the Holocene.

otros aspectos del uso público, pueden interferir con estos procesos activos, desencadenando procesos latentes o modificando las tasas de otros presentes de forma natural. Es el caso de la erosión hídrica asociada a la arroyada no concentrada en laderas, que cuando es acelerada por las actividades humanas (pisoteo concentrado en sendas y caminos) genera una pérdida de suelo edáfico fértil con el banco de semillas propias del espacio, y constituye un impacto ambiental sobre este importante recurso no renovable.

La gestión de estos riesgos e impactos por parte de los responsables de los parques nacionales de la Red requiere tener conocimientos científicos precisos del ámbito de actuación de estos procesos (área potencialmente afectada, frecuencia de ocurrencia, magnitudes previstas para los eventos, tasas naturales e inducidas...) para adoptar las medidas necesarias para su predicción, prevención, control y corrección. Por ello, el presente trabajo y el proyecto de investigación del que se deriva, pretende aportar a los gestores esta información y herramientas, con la finalidad de facilitar la gestión.

## MATERIAL Y MÉTODOS

Para la realización de las actividades y tareas previstas en el plan de trabajo del proyecto, se han aplicado de forma simultánea y complementaria enfoques metodológicos de análisis y síntesis, compaginando secuencialmente métodos de adquisición de datos en campo, métodos de estudio en laboratorio, y métodos de tratamiento y análisis en gabinete (Figuras 1 y 2).

### Métodos y técnicas dendrogeomorfológicas

La Dendrogeomorfología es una rama científica relativamente reciente, sobre todo si se compara con otras subdisciplinas próximas, como la Dendroclimatología. En realidad, todas ellas derivan de la Dendrocronología, ciencia que data los anillos de crecimiento de los árboles, con el fin de caracterizar y sincronizar los cambios de índole ambiental que tienen lugar en el medio, u otras aplicaciones como datar restos arqueológicos.

Los orígenes más remotos se remontan a las observaciones de Leonardo da Vinci en el tránsito entre los siglos XV y XVI, pero no es hasta inicios del siglo XX cuando se establecen los fundamentos teóricos. Sin embargo, sus leyes y principios, a pesar de tener su origen en teorías del siglo XVIII como el Uniformitarismo, no se enuncian explícitamente hasta el último tercio del siglo XX: uniformitarismo, factores limitantes, amplitud ecológica, crecimiento agregado de anillos, selección del emplazamiento, réplica, y datación cruzada.

Los primeros estudios dendrogeomorfológicos, esto es, sobre la relación entre los anillos de crecimiento de los árboles y los procesos geomorfológicos, datan de la década de 1960 (LA MARCHE, 1963), pero no es hasta unos años después cuando aparecen las primeras publicaciones en las que se introduce ese término (ALESTALO, 1971). En general se trata de aplicaciones de las técnicas dendrocronológicas al estudio de procesos erosivos de degradación de suelos, nivales (aludes de nieve), movimientos de ladera (desprendimientos, avalanchas de rocas...) y datación de superficies.

A la misma época se remonta la aplicación de los análisis dendrogeomorfológicos al estudio de los eventos ligados a la dinámica torrencial, como las corrientes de derrubios (*debris flows*) y las avenidas instantáneas o súbitas (*flash floods*). Los primeros trabajos con estas aplicaciones datan de mediados de la década de 1960 (SIGAFOOS, 1964; HARRISON & RIED, 1967), pero no es hasta la década de 1980 cuando se estandarizan. Desde ese momento, se difunde el uso de estas técnicas y fuentes de información, aunque con un alcance geográfico muy limitado a Norteamérica y Centroeuropa.

### Metodología para el estudio dendrogeomorfológico de los riesgos por avenidas torrenciales.

Los métodos y técnicas dendrogeomorfológicas están basados en la datación de eventos geomorfológicos, como las avenidas torrenciales y las inundaciones asociadas, que quedan registrados

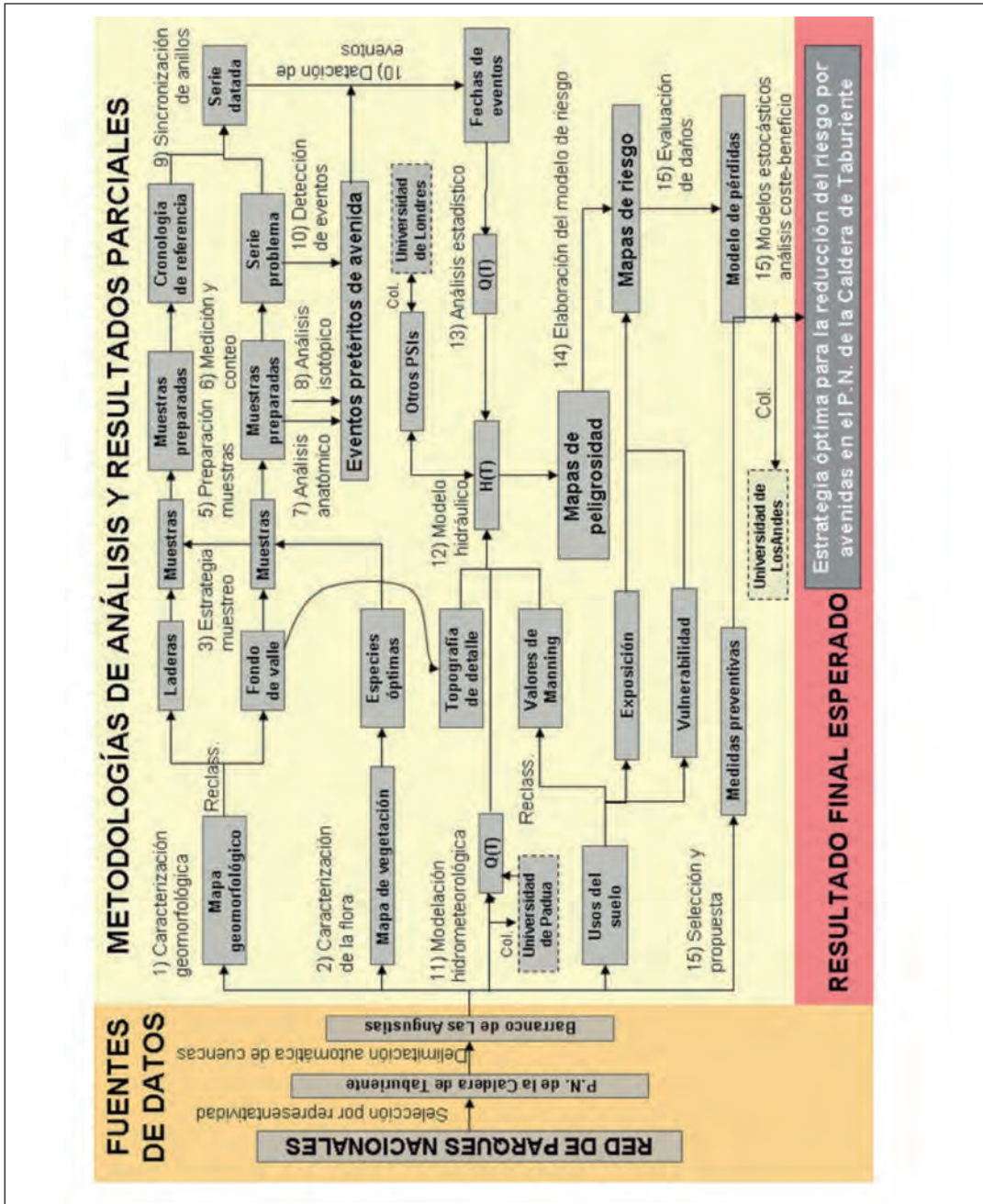


Figura 1. Diagrama de flujo con las interrelaciones entre todas las tareas y actividades de la metodología para el estudio del riesgo por avenidas torrenciales en el barranco de Las Angustias (P.N. de la Caldera de Taburiente), desde las fuentes de datos a los resultados finales.

Figure 1. Flowchart with the interrelationships between all the tasks and activities of the methodology for the study of flood risk in the Angustias gorge (Caldera de Taburiente National Park), from data sources to final results .

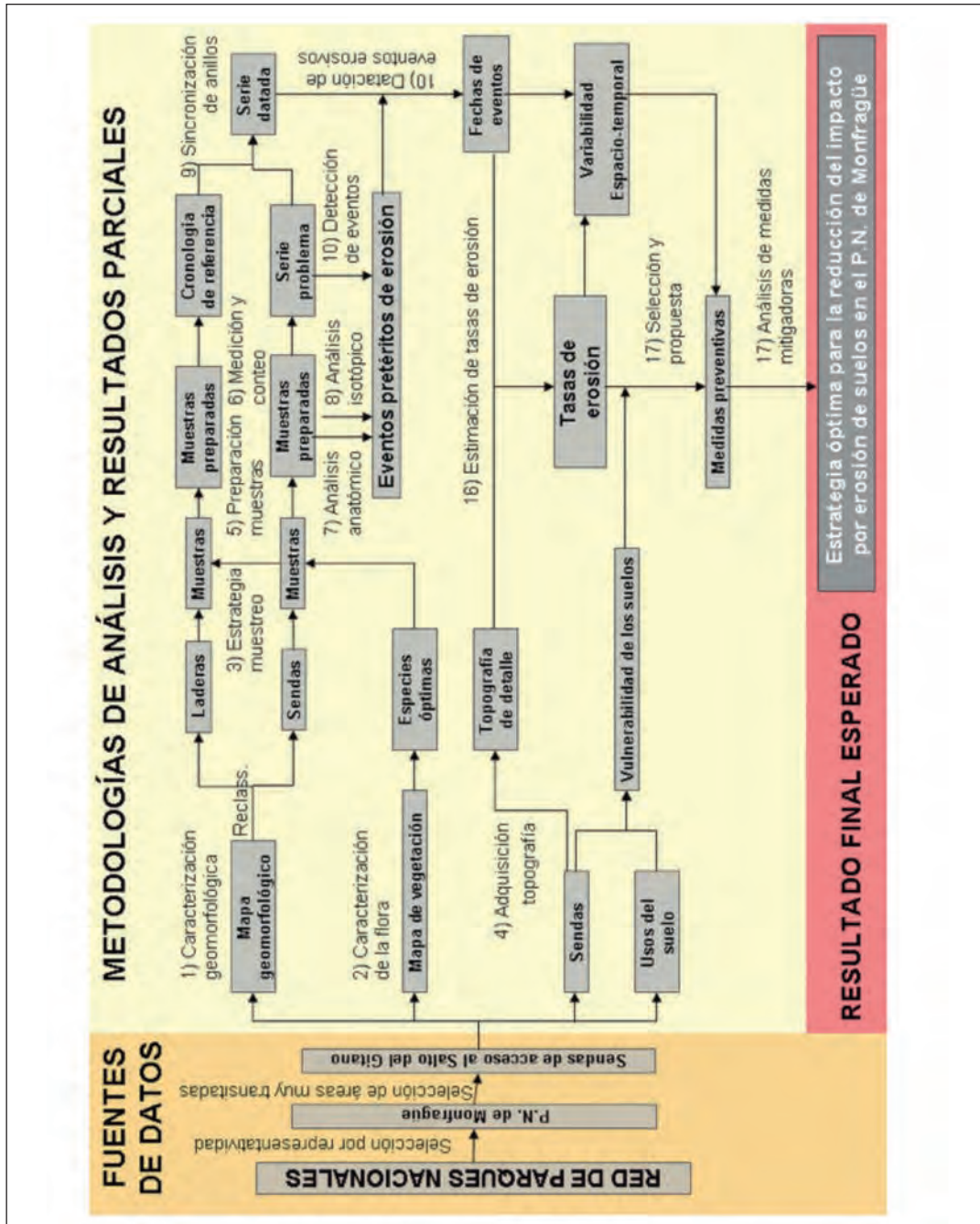


Figura 2. Diagrama de flujo con las interrelaciones entre todas las tareas y actividades de la metodología para el estudio del impacto por erosión de suelos en las sendas del P.N. de Monfragüe, desde las fuentes de datos a los resultados finales.

Figure 2. Flowchart with the interrelationships between all the tasks and activities of the methodology to study the impact of soil erosion in the paths of Monfragüe National Park, from data sources to the final results.

en las plantas leñosas, tanto en forma de cicatrices o formaciones anómalas de la madera como en anomalías en las secuencias de crecimiento de los anillos (BALLESTEROS *et al.*, 2010).

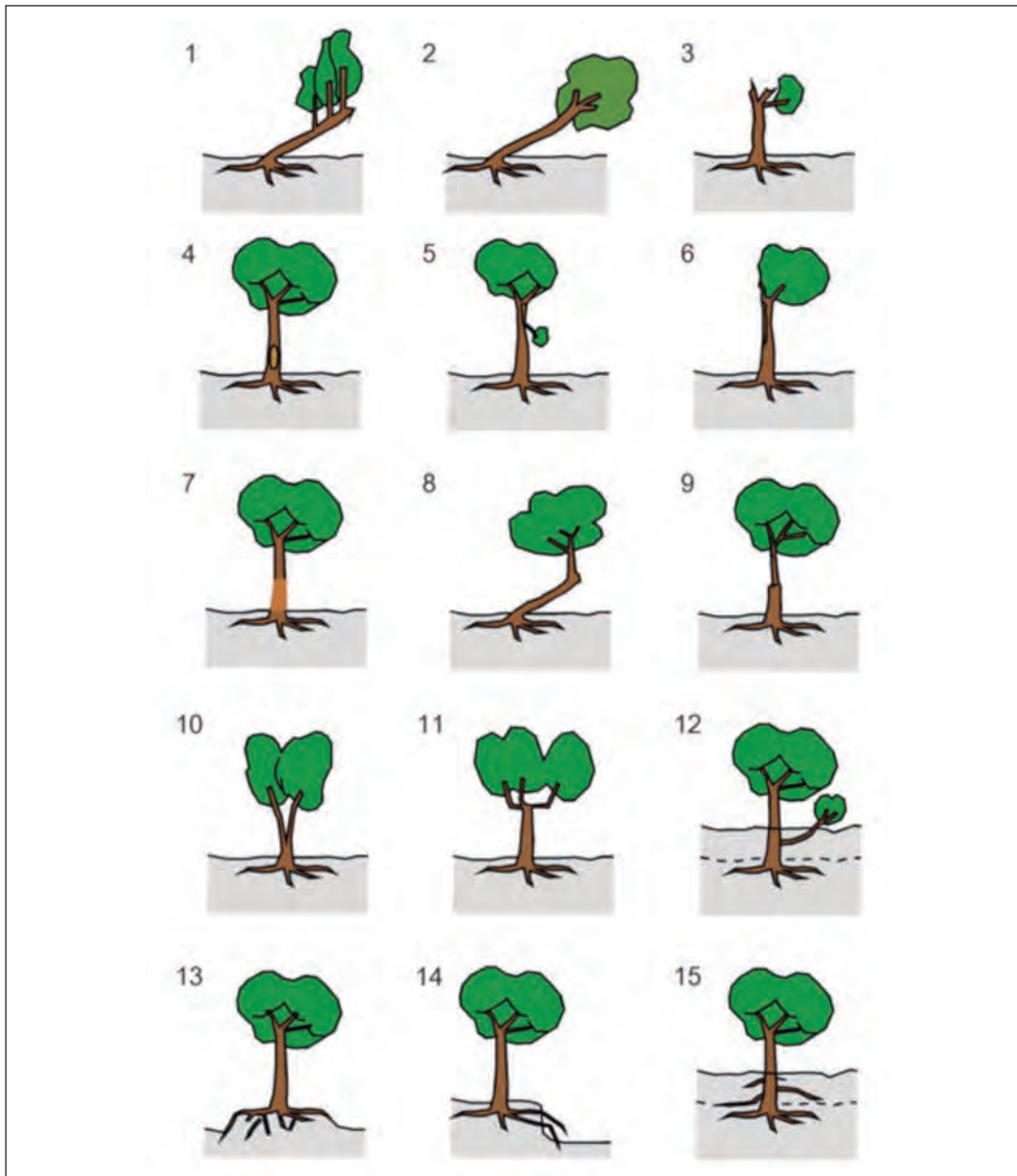
El muestreo de los ejemplares debe ser riguroso, seleccionando aquellos individuos que presenten caracteres externos que evidencian la relación entre los daños observados y el tipo de evento geomorfológico que quiere analizarse, en este caso las avenidas súbitas (Figura 3). También deben muestrearse ejemplares no dañados, que sirvan de modelo de comparación y para poder discernir otro tipo de anomalías debidas a las oscilaciones climáticas, plagas, tratamientos forestales, hervivoría... En árboles vivos, habitualmente se extraen muestras con la barrena de Pressler, lo cual permite obtener una representación de todos los anillos de crecimiento formados desde la corteza hasta el interior del tronco, sin perjuicio para la vitalidad del ejemplar muestreado. En determinados casos, es posible extraer cuñas en la zona de la herida o secciones completas en el caso de árboles muertos o que hayan sido apeados por trabajos relacionados con la gestión forestal. Las muestras de madera extraídas en el campo serán adecuadamente preparadas para su estudio, siendo preciso su cortado, pulido, limpieza y secado (en estufa o al aire libre).

El análisis de las muestras consiste básicamente en el conteo y la medición precisa y contrastada de la anchura de los anillos de crecimiento utilizando una mesa de medición LINTAB (resolución 0,01 mm) conectada al programa informático TSAPWin (*Time Series Analysis and Presentation for Windows*); aunque de forma complementaria pueden utilizarse otras técnicas como la medición de la densidad de la madera o análisis anatómicos específicos para determinar anomalías.

La datación dendrocronológica consiste en la transformación de las series de incrementos del crecimiento (anchura del anillo) o de otros datos, en secuencias dendrocronológicas, mediante la asignación precisa de fechas que aseguren que cada valor se corresponde con el año en que fue formado el anillo de crecimiento. El grosor de los anillos formados simultáneamente en diferentes

individuos no suele presentar coincidencias en sus valores, a causa de diferencias en cuanto a la edad o en relación con muchos otros factores intrínsecos o extrínsecos y, por ello, es preciso utilizar diversas técnicas que permitan comparar las series entre sí y localizar patrones sincrónicos de crecimiento; como el programa de correlación estadística COFECHA. Los resultados de la aplicación de las distintas técnicas de sincronización ofrecen una gran complejidad y requiere contar con la necesaria experiencia que permita tomar las decisiones más adecuadas en cada problema planteado. A partir de las series de anillos sincronizados y datados se puede proceder a la datación de las anomalías asociadas a diferentes consecuencias de eventos de avenida torrencial (descortezados y heridas, cicatrices, formación de callos y/o madera de reacción, perturbaciones en el crecimiento, anillos indicadores...); y a la obtención de un listado o base de datos de estos eventos (Figura 4). Hay que tener en cuenta que la datación dendrocronológica de un daño o anomalía se corresponde con los eventos sucedidos desde el final del crecimiento del último anillo bien formado (final periodo vegetativo; normalmente en otoño del año anterior) hasta los eventos previos al crecimiento del año (inicio periodo vegetativo; normalmente en primavera del año en curso), de manera que la fecha indicada no se corresponde exactamente con el año natural.

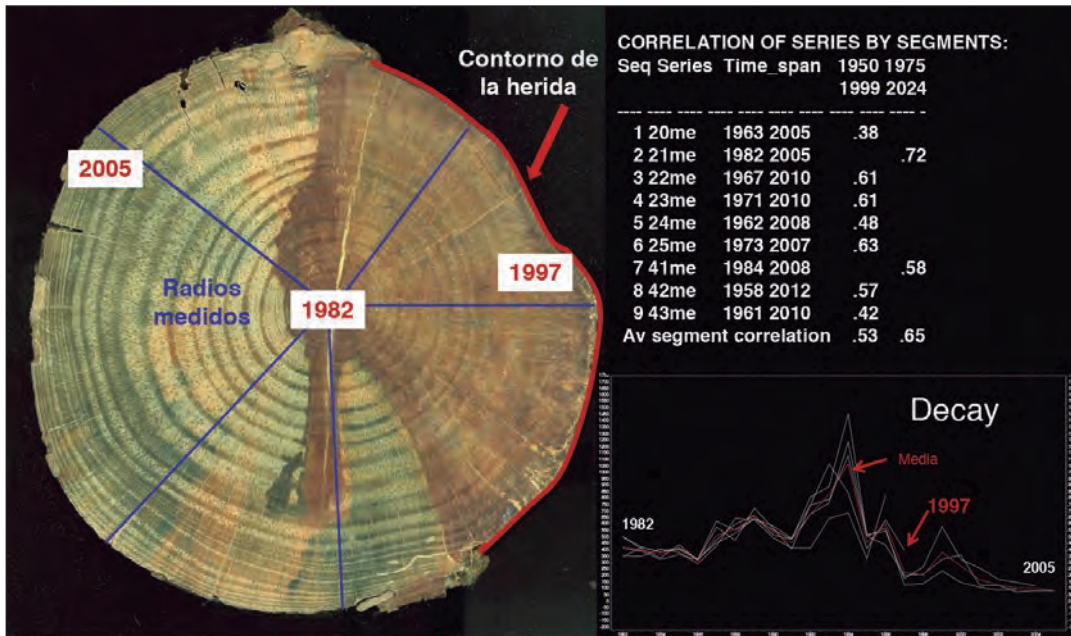
A partir de los resultados dendrogeomorfológicos obtenidos se trata de estudiar la ocurrencia y magnitud de estos eventos pasados de avenida (*flash floods*) para la gestión del riesgo por inundaciones en una cuenca de montaña no aforada y con un número de elementos en exposición (principalmente personas practicando senderismo) muy elevado. Para ello se ha procedido en primer lugar a la modelización hidrometeorológica de caudales de avenida a partir del registro de precipitaciones máximas en la cuenca. Posteriormente, se ha modelizado hidráulicamente dichos caudales en el tramo de río de interés, en busca del valor de caudal que minimizase el error cuadrático medio en las localizaciones respecto a la altura de los descortezados de los árboles dañados.



**Figura 3.** Tipologías de los principales indicios dendrogeomorfológicos macroscópicos individuales útiles en el estudio de las avenidas torrenciales: 1, inclinado y crecimiento en candelabro; 2, inclinado; 3, decapitado; 4, descortezado; 5, arranque de ramas; 6, pérdida parcial de la copa; 7, abrasión de la corteza; 8, codo en el tronco; 9, estrechamiento brusco del tronco; 10, bifurcado; 11, candelabro; 12, enterramiento de ramas; 13, efecto pedestal; 14, raíces expuestas; 15, raíces adventicias. Ver explicaciones en DÍEZ-HERRERO *et al.* (2007).

**Figure 3.** Types of main dendrogeomorphological macroscopic evidence useful in the study of torrential floods: 1, Pitched and growth candlestick; 2, tilted; 3, beheaded; 4, debarking; 5, removing branches; 6, partial crown loss; 7, abrasion of the bark; 8, elbow on the trunk; 9, sharp narrowing of the trunk; 10, bifurcated stems; 11, candlestick; 12, branches burial; 13, pedestal effect; 14, exposed roots; 15, adventitious roots. See additional explanations in DÍEZ-HERRERO *et al.* (2007).





**Figura 4.** Resultado de la correlación entre diferentes series de medidas de anchura de los anillos de una muestra para la datación cruzada de los anillos correspondientes a un evento de avenida torrencial.

**Figure 4.** Results of the correlation between different sets of measurements of tree-ring width of a sample for the cross-dating of the rings corresponding to a torrential flood event.

Para poder proceder al siguiente análisis se debió seleccionar entre los distintos eventos mostrados por la edad de los descortezados, aquel que presentase un número significativo de datos. Eso reducía las posibilidades a dos eventos principalmente, el asociado al año 1962 y el asociado a 1997. De entre estas dos posibilidades, se escogió la de 1997, por la disponibilidad de datos de precipitación para ese año, algo que no ocurría en 1962. Además, esta fecha más reciente aportaba otra ventaja, al estar más próxima a la actualidad, existía una mayor disponibilidad de datos próximos a esa fecha y necesarios para nuestro análisis, como las lluvias del pluviómetro, un MDE de detalle y ortofotos para determinar los usos del suelo.

Ante la inexistencia de un registro de caudales en la cuenca, no es posible afrontar la estimación de cuantiles de avenida mediante el análisis estadístico de frecuencias sobre la variable caudal punta. Por ello, se plantea el desarrollo de un mo-

delo para la simulación del proceso precipitación – escorrentía, para lo cual se utilizará el *software* HEC-HMS. Para alimentar este modelo, se ha procedido a la estimación de las variables necesarias, tales como el valor de Número de Curva (SCS); método de propagación de la onda de avenida, Muskingum-Cunge; método de transformación lluvia-escorrentía (Hidrograma Unitario de Clark), para lo que se estimaron el tiempo de concentración ( $T_c$ ) y coeficiente de almacenamiento; así como los hietogramas de precipitaciones.

Este último punto, las precipitaciones, han sido objeto de análisis exhaustivo. En primer lugar, para la definición de los eventos de precipitación máximos asociados a las fechas ofrecidas por la datación dendrogeomorfológica y caracterización de los mismos (duración y forma). Y en segundo lugar, para la estimación de cuantiles de precipitación para distintos periodos de retorno (entre 2 y 20.000 años).

La obtención de los cuantiles máximos de precipitación se afrontó de dos formas distintas; por un lado a partir del tradicional uso de series de datos máximos anuales, a los que se ajustaron distintas funciones de distribución de frecuencias (SQRT-ET<sub>MAX</sub>, GEV-mom, GEV-Lmom, GEV-pwm). Por otro lado, se procedió también al análisis de series de datos de excedencias sobre un umbral (*peak over threshold*, POT) mediante el ajuste de función Pareto General (GP-POT). La utilización de esta última técnica se ha mostrado como óptima para el análisis de eventos extremos, por su mejor representación de la parte alta de la curva descrita por la función de frecuencias.

Una última consideración tomada en cuenta para la distribución de las precipitaciones a modelizar ha sido su distribución temporal a lo largo del día. Ante la falta de datos continuos de precipitaciones, se han considerado tres situaciones diferentes: hietograma simétrico; hietograma sesgado a la izquierda (inicio del evento); e hietograma sesgado a la derecha (final del evento). Para la distribución de la precipitación máxima diaria de los distintos periodos de retorno a lo largo de las 24 horas, se ha utilizado en los tres casos el método de los bloques alternos.

Así, con los distintos modelos meteorológicos, el modelo de cuenca y con las especificaciones de control definidas, se procedió a la modelización hidrometeorológica de caudales de avenida para la cuenca del río Taburiente; lo que proporcionó los caudales punta máximos para los mismos periodos de retorno. A partir de estos caudales se procedió a la modelización hidráulica de los mismos.

Para llevar a cabo la modelización hidráulica de caudales se eligió el software libre Iber, desarrollado por un grupo de instituciones de investigación españolas, y que permite la modelización hidráulica 2D de caudales de avenida. Para la modelización hidráulica se eligieron los caudales punta obtenidos del modelo hidrometeorológico debido a que por falta de posible calibración, ofrecían mayor confianza que la utilización de los hidrogramas completos de avenida. Por otro lado, es imprescindible para este tipo de modelizaciones la disponibilidad de un MDE de alta re-

solución, capaz de representar la variabilidad topográfica del lecho y llanura de inundación. En este caso, se disponía de datos LIDAR con una resolución espacial de 1x1 m.

Se plantearon en este punto las posibles diferencias topográficas existentes en la zona entre 1997 y 2009 (fecha de los datos LIDAR), lo cual, en un ambiente de lecho móvil como en el que se analiza, podría provocar errores en la estimación de la altura de la lámina de agua que se propagasen a sucesivos análisis. Para tratar de limitar esta fuente de error, se procedió a generar un segundo MDE representativo de la cota máxima que podría haber tenido el lecho del cauce en 1997, a partir de la generación de una superficie sintética para el área de distribución de los árboles con descortezados, la cual enrasaba la cota topográfica a la que se encuentra la base de dichos árboles.

Otra variable que podría haber sufrido cambios significativos desde la fecha del evento a la actualidad es la de rugosidad de lecho (coeficiente  $n$  de Manning). Para valorar la influencia de esta variación de rugosidad, se generaron mapas de rugosidad del lecho y orillas a partir de ortofotos correspondientes a los años 2002 y 2009. La variación en los resultados de la modelizaciones hidráulicas debido a la variación de este parámetro en el tiempo fue despreciable.

Sobre ambas superficies topográficas se procedió a modelar en primer lugar el caudal asociado a las precipitaciones registradas en la estación meteorológica más próxima a la «Playa de Taburiente». Y ante los resultados obtenidos (la lámina de agua no llegaba a alcanzar la base de la mayoría de los árboles dañados en ese evento), se procedió a continuar la modelización sobre un rango amplio de caudales, con el objetivo de definir el que presentase un menor RMSE con respecto a la altura a la que se disponen los descortezados.

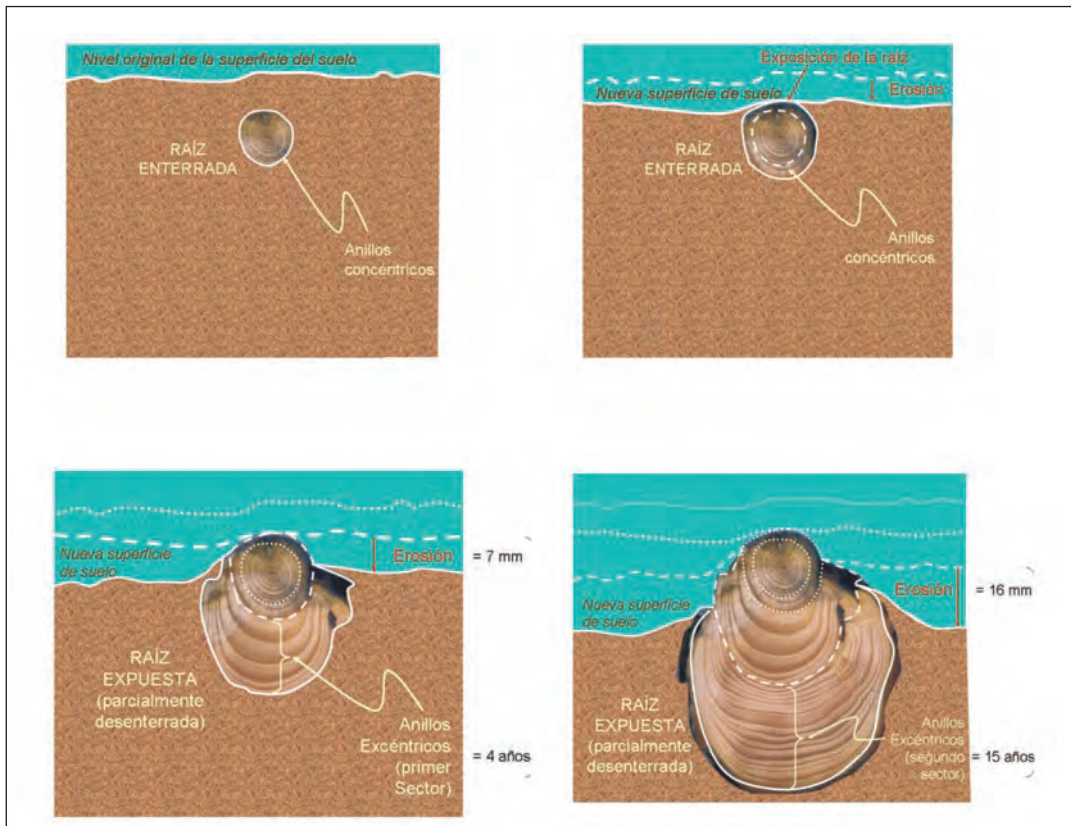
Una vez obtenidos los resultados de las simulaciones, y determinado el valor de caudal que minimizaba el valor de RMSE frente a los descortezados, se planteó la influencia que posibles mínimos errores de localización espacial de los

árboles podría tener en los resultados obtenidos. Para analizar esta posible fuente de errores, se observó el comportamiento de los resultados considerando un posible desplazamiento del árbol en el rango de un buffer de 3x3 pixels. De los resultados obtenidos se desprende una tendencia en los valores de RMSE semejante a la obtenida previamente.

### Metodología para el estudio de los impactos por erosión de suelos acelerada

El procedimiento empleado para la estimación de tasas de erosión a partir de raíces expuestas se

basa en el hecho siguiente (CARRARA & CARROLL, 1979; Figura 5): las raíces, en condiciones de desarrollo normal, aumentan de tamaño como consecuencia de la formación de un anillo cada año, el cual se dispone de manera concéntrica con respecto del eje inicial de desarrollo. Sin embargo, cuando desaparece el suelo existente sobre ellas, éstas quedan expuestas. Si una vez expuestas, y debido a distintas causas, quedan desprovistas de la corteza que les sirve de protección frente a los agentes externos, el tejido vegetal de la parte superior muere. Entonces, el patrón de crecimiento anual de los anillos deja de ser concéntrico para pasar a ser excéntrico, ya que la raíz únicamente se desarrolla donde el te-



**Figura 5.** A) Patrón de crecimiento concéntrico en raíces no expuestas; B) momento en el que se produce la exposición subaérea; y C y D) patrón de crecimiento excéntrico en raíces expuestas. Los anillos que denotan exposición, junto con la altura de suelo desnudado, determinan la tasa de erosión resultante.

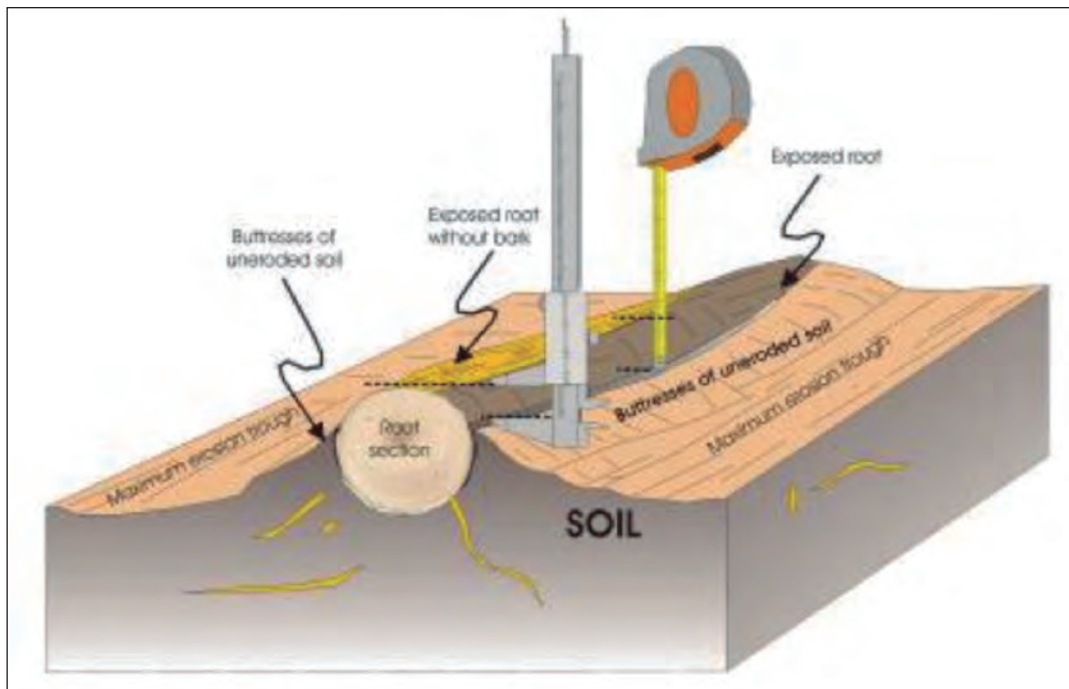
**Figure 5.** A) Concentric growth-pattern in non-exposed roots; B) at which time the subaerial exposure occurs; and C and D) eccentric growth-pattern of exposed roots. Denoting exposure rings, including the height of bare soil, resulting determine erosion rate.

jido está vivo. Si no se produce descortezado, la raíz también experimenta cambios estructurales en respuesta a la exposición. Así, es común que los anillos que se forman tras la exposición tengan anchuras significativamente mayores, que las de aquéllos otros formados en condiciones normales de recubrimiento edáfico.

La erosión laminar existente en el entorno de la raíz expuesta se determina midiendo la distancia existente entre la parte superior de la raíz y el suelo (*Ex*). El cociente entre esta medida y el intervalo temporal que ha permanecido la raíz expuesta, define una aproximación a la tasa de erosión en unidades de mm/año (Figuras 5 y 6; BODOQUE *et al.*, 2002 y 2005). Cuando la raíz queda expuesta, además del cambio en el patrón de crecimiento de la raíz y de la aparición de procesos de reacción en madera, se modifica la estructura anatómica de la raíz (RUBIALES *et al.*, 2008). Estos cambios se desencadenan básicamente por la acción de dos factores: (a) estrés

mecánico; (b) exposición subaérea (incidencia de la luz, variaciones de temperatura...).

En relación con los párrafos previos, buena parte del esfuerzo investigador realizado hasta la fecha se ha centrado en la determinación precisa con criterios anatómicos del primer año de exposición. La determinación rigurosa del parámetro *Ex* ha recibido poca atención por parte de la comunidad de dendrogeomorfológica. Así, se ha avanzado en la estimación del crecimiento secundario, el cual define un factor corrector que debe ser aplicado a las tasas. Sin embargo, se ha obviado la variabilidad de la microtopografía del suelo a la hora de determinar *Ex*. En este trabajo, se han estimado tasas de erosión laminar, en base a la utilización de una aproximación dendrogeomorfológica en la que se ha prestado especial atención a la caracterización de la microtopografía del suelo. Para ello, se han realizado réplicas de escayola de las raíces expuestas y su entorno, que a posteriori fueron escaneadas utilizando



**Figura 6.** Métodos clásicos para la medida del parámetro *Ex* en una raíz expuesta, empleando calibrador o flexómetro.

**Figure 6.** Classical methods for measuring the parameter *Ex* in exposed roots, using calipers or flexometer.

*Proyectos de investigación en parques nacionales: 2010-2013*

**Figura 7.** Proceso de fabricación de las réplicas en escayola dental de las raíces expuestas del Parque Nacional de Monfragüe. Ver más explicaciones en BODOQUE *et al.* (2012).

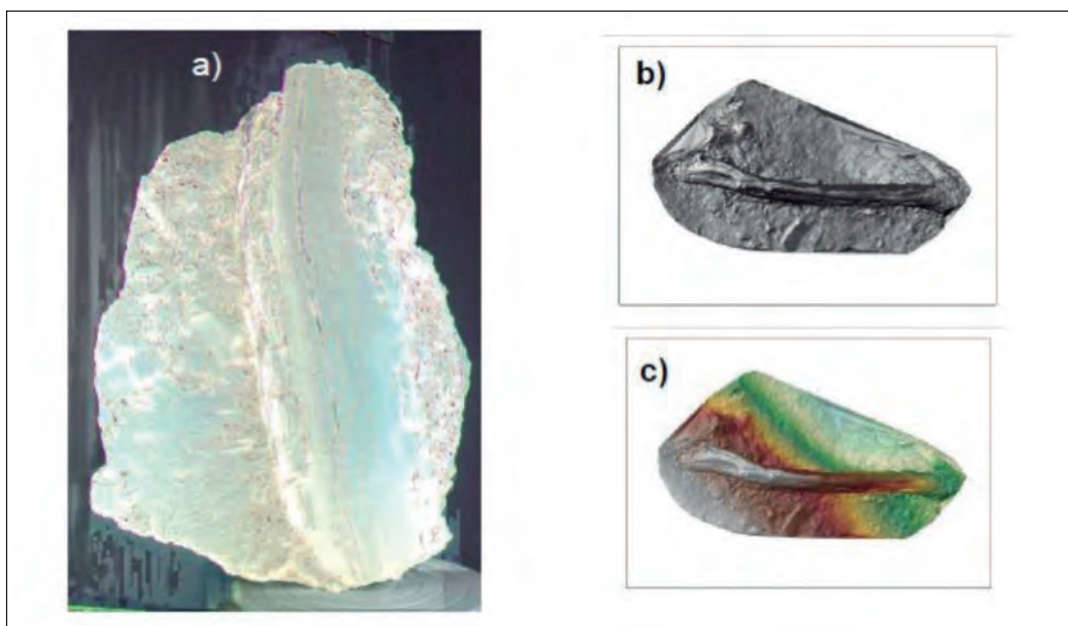
**Figure 7.** Making process of dental plaster replicas of the exposed roots from Monfragüe National Park. See more explanations in BODOQUE *et al.* (2012).

laser escáner 3D de gabinete. El proceso de obtención de réplicas de raíces expuestas consta de dos etapas (BODOQUE *et al.*, 2012): i) proceso de moldeo en campo; y ii) un proceso de vaciado o replicado posterior en laboratorio.

El proceso de obtención de los moldes comenzó con la limpieza de las raíces expuestas con brocha y cepillo. Seguidamente, se consolidó el entorno de la raíz vaporizando con resina Fluoline A. Una vez curada la resina, se aplicó desmoldante Molykote, tanto a la raíz como al suelo. El molde se realizó aplicando diversas capas de silicona RTV-2, silastic 3481, catalizador rápido silastic 81 F en la primera capa y catalizador muy rápido 81-VF en las siguientes. Para la obtención de las réplicas en laboratorio, los moldes se cubrieron con silicona ácida transparente. Seguidamente, los moldes se limpiaron de tierra y otros elementos, aplicándoseles después con brocha una capa de escayola exaduro dental (dureza brinell 2.500-3.000 kg/cm<sup>2</sup>). Una vez

fraguada, se humectó y se aplicó una segunda capa más gruesa de exaduro en agua en una relación 3.5-4:1. Tras una hora de fraguado se retiró la réplica y se dejó que perdiera el exceso de humedad, al objeto de que alcanzara la dureza final (3.000 kg/cm<sup>2</sup>).

Para el escaneo de las réplicas se utilizó un escáner laser 3D de mano de alta resolución (modelo NextEngine). Se trata de un dispositivo de mano que puede capturar millones de puntos y, en consecuencia, representar tridimensionalmente cualquier objeto. Las réplicas fueron escaneadas con resolución milimétrica y desde distintas perspectivas para evitar la presencia de huecos generados en la zona de sombra (Figura 8). En cada replica se realizaron al menos diez escaneos individuales, al objeto de poder garantizar un escaneo completo. Los diferentes escaneos fueron unificados y corregidos para poder eliminar defectos asociados al proceso de escaneo. Los datos obtenidos fueron convertidos a formato *xyz* para



**Figura 8.** Proceso de escaneo 3D de las réplicas de escayola de las raíces expuestas del parque nacional de Monfragüe: a) Ejemplo de una de las raíces escaneadas; b) modelo digital de sombreados obtenido tras el escaneo; c) modelo digital de elevaciones derivado del escaneo.

**Figure 8.** Process of 3D scanning of plaster replicas of the exposed roots from Monfragüe National Park: a) Example of a scanned root. b) Shaded digital model obtained after scanning; c) digital elevation model derived from scanning.

de este modo poder realizar el análisis espacial de la información en herramientas SIG.

En las zonas que no son fácilmente accesibles para el escaneo 3D de campo o la realización de moldes, se recurrió a la utilización de galgas de perfilar para obtener un perfil de la raíz y el suelo sobre el que poder evaluar las tasas de erosión. La galga de perfilar, o medidor de perfiles, posee finas puntas de acero inoxidable de 0,75 mm de diámetro que permiten obtener un perfil de la raíz y el suelo con bastante precisión. Para ello, se disponía la galga transversalmente a la raíz, nivelándola en la horizontal para que todas las medidas pudieran ser comparadas y se movían las puntas de acero hasta que se adaptaban a la topografía del suelo. El perfil obtenido se traspasaba a un papel milimetrado, teniendo a lo largo del perfil la cantidad de suelo erosionado con una precisión inferior al milímetro. Estos datos han servido, posteriormente, para calcular las tasas de erosión. Cada uno de los perfiles realizados se numeraba, se georreferenciaba con un GPS, y se tomaban datos de fecha, hora, orientación del perfil con respecto al Norte y pendiente del camino, y se tomaba una muestra del suelo para realizar análisis edafológicos. Una vez recolectados todos los datos, se procedía a cortar una pequeña muestra de la raíz sobre la que se realizaría posteriormente el estudio dendrogeomorfológico analizando el crecimiento excéntrico de los anillos al quedar expuesta la raíz por la erosión del suelo.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE SU VALIDEZ

### Resultados de la aplicación al riesgo por avenidas torrenciales en el P.N. de la Caldera de Taburiente

La Caldera de Taburiente ocupa 4690 ha del sector centro-septentrional de la isla de la Palma (Islas Canarias), y fue declarada Parque Nacional en el año 1954. Se extiende entre las coordenadas de latitud 28°40' y 28°46' N y longitud 14°08' y 14°13' O y presenta un rango altitudinal entre los 2426 msnm del Roque de los Muchachos y los

430 m del fondo del barranco de Las Angustias a su salida del parque nacional. El estudio se ha centrado en un tramo del fondo aluvial-coluvial del barranco de Taburiente, desde la confluencia de sus tributarios (los barrancos Verduras de Alfonso y Cantos de Turugumay), hasta su paso por las inmediaciones del Centro de Servicios del Parque.

Se trata de una llanura aluvial formada por grandes barras de bloques y gravas entre las que discurren uno o varios hilos de corriente, con una terraza baja separada por un escarpe de banco de orilla de unos 2,3 m de altura media (Figura 9). Las barras estabilizadas y las terrazas presentan vegetación arbórea de pino canario (*Pinus canariensis* Chr. Sm. ex DC.) y sauce canario (*Salix canariensis* C. Sm. ex Link). En esta zona convergen buena parte de los senderos más transitados y se encuentra la única zona de acampada autorizada, estimándose una población expuesta anual media en tránsito por el sistema de barrancos en unas 67.000 personas (A. Palomares, com. per.).

En estos barrancos son frecuentes e intensas las avenidas súbitas (Figura 9), las cuales han producido incluso víctimas mortales entre practicantes de senderismo (3 fallecidos en noviembre de 2001); varias situaciones de movilización de medios de protección civil al quedar grupos numerosos de visitantes incomunicados por la inundación (la última el 22 de octubre de 2011); e importantes pérdidas económicas al interferir las avenidas con los proyectos de repoblación de las riberas con especies autóctonas y endemismos (superiores a los 700.000 euros en los últimos años; Figura 10) e infraestructuras (puentes, conducciones de agua, sistemas hidroeléctricos) y las sendas más transitadas (DÍEZ-HERRERO *et al.*, 2012a, 2012b, 2012c, 2013a y 2013b).

Ante la imposibilidad de realizar análisis de peligrosidad con métodos hidrológico-hidráulicos convencionales por no existir estaciones de aforo representativas ni datos pluviométricos con series largas y discriminación temporal adecuada, se ha recurrido a los métodos dendrogeomorfológicos para la datación de eventos de avenidas. En total se muestrearon 73 ejemplares de *Pinus canariensis* mediante barrena de Pressler y, además,



**Figura 9.** Vista general de la Playa de Taburiente desde el centro del barranco de Taburiente, hacia la confluencia de los afluentes (izquierda); y evento de avenida súbita en la Playa de Taburiente en el año 2009 (derecha; foto Ezequiel Alfonso).

**Figure 9.** Panoramic view of the 'Playa de Taburiente' reach from the center of Taburiente gorge, to the confluence of the tributaries (left); event of flash flood in 'Playa de Taburiente' reach in 2009 (right; photo Ezequiel Alfonso).

se obtuvieron varias cuñas y secciones discoidales con motosierra mecánica en tres ejemplares muertos y en un resto de madera subfósil localizado en el relleno de la terraza. Al menos se extrajeron, en los árboles afectados (con heridas producidas por la carga sólida transportada durante las riadas y/o con otros daños como desenraizamiento, pér-

rida de la guía principal, ...; Figura 11), dos muestras completas por árbol (desde la corteza hasta la médula). Otras muestras se extrajeron cerca de las heridas, de manera que el contraste entre las diversas secuencias de crecimiento permitiera identificar el año en que se produjo el daño (BALLESTEROS *et al.*, 2010). También se ex-



**Figura 10.** Efectos de las avenidas súbitas en las plantaciones de sauces canarios en el barranco de Verduras de Alfonso (antes de la riada, en 2009; izquierda); y después de la misma (derecha). Utilícese como referencia el ejemplar de pino canario en el centro del cauce. Fotos: Ángel Palomares.

**Figure 10.** Effects of flash floods in Canarian willow plantations in the 'Verduras de Alfonso' gorge (before the 2009 flood, left); and thereafter (right). Use as a reference the Canarian pine tree in the center of the channel. Photos: Angel Palomares.





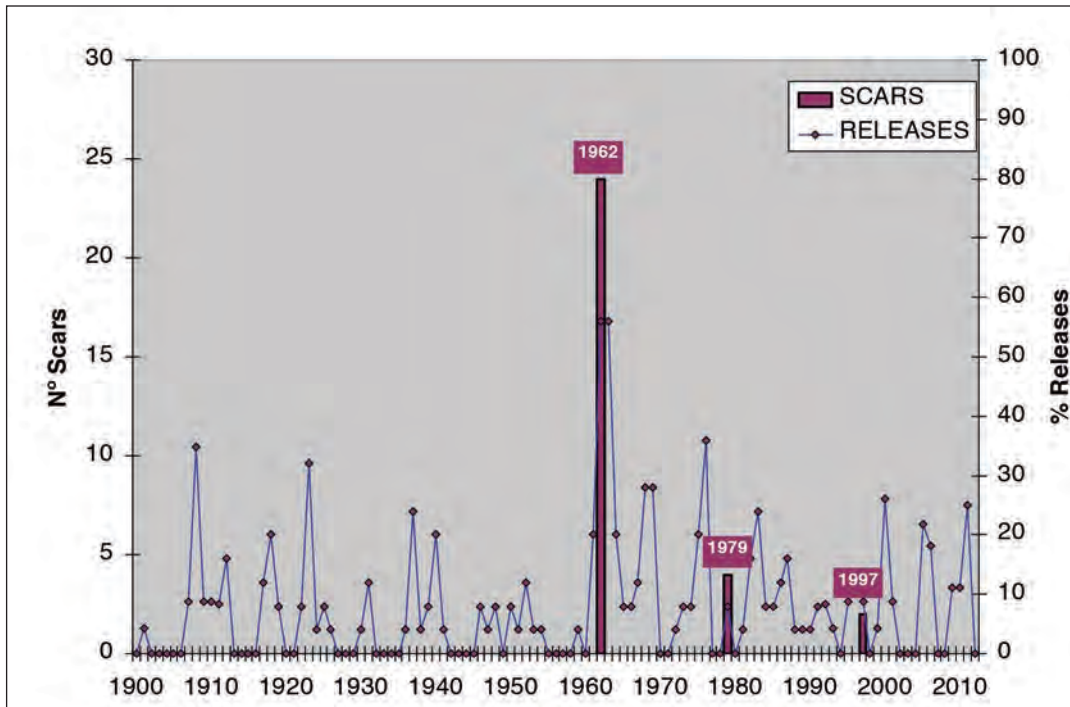
**Figura 11.** Tipos más comunes de evidencias dendrogeomorfológicas muestreadas y analizadas en la Playa de Taburiente: descortezado en el fuste por impacto de carga sólida arrastrada durante avenidas (izquierda); y descortezados con raíces expuestas por erosión del pie (derecha).

**Figure 11.** Most common types of dendrogeomorphological evidence sampled and analyzed at the 'Playa de Taburiente' reach: scars by debarking impacts of solid load during floods (left); and scars with exposed roots by erosion of the tree-foot (right).

trajeron muestras de 16 árboles no dañados para elaborar una cronología de referencia (STOFFEL *et al.*, 2010).

A partir del análisis de las secuencias de crecimiento en grosor de los árboles afectados se ha podido reconstruir el registro reciente (últimos 50 años) de los eventos de avenidas torrenciales que han sufrido estos barrancos. Se han datado 60 daños en 8 años diferentes, siendo especialmente relevantes los producidos en 1962 y 1997, pues se repiten sistemáticamente en muchos de los ejemplares muestreados (en el 48% y el 22%, respectivamente, de los árboles dañados), mientras que en el resto de los años identificados (1979, 1993, 2001, 2003, 2007 y 2009) los porcentajes de replicación son inferiores al 15% (Figura 12), lo cual aporta información acerca de la magnitud y extensión de las avenidas (GÉNOVA *et al.*, 2013a y b).

Estos datos dendrogeomorfológicos han sido contrastados con los procedentes de los registros meteorológicos e histórico-documentales. El análisis meteorológico se ha centrado en la identificación de aquellos episodios de precipitación torrencial capaces de generar avenidas súbitas o repentinas. Sin embargo, uno de los principales inconvenientes para este trabajo ha sido la escasez de datos meteorológicos, pues sólo uno de los 5 pluviómetros instalados en el interior de La Caldera y en el entorno del Parque Nacional (C106U) tiene datos diarios. Aún así, aunque este pluviómetro se instala en octubre de 1957, deja de registrar datos un año más tarde y sólo a partir de 1978 el registro adquiere una cierta continuidad, pero sólo hay 22 años con registro completo. Se han identificado 11 días en que la precipitación fue igual o superior a 200 mm/ 24 horas, los cuales suponen el 45% de los días más lluviosos. Se debe destacar el carác-



**Figura 12.** Número de árboles que presentan heridas datadas y liberaciones de la anchura de anillos entre los años 1900 y 2011 en el sector de la Playa de Taburiente.

**Figure 12.** Number of trees that have wounds (scars) and ring width releases dated between 1900 and 2011 in the area of Playa de Taburiente.

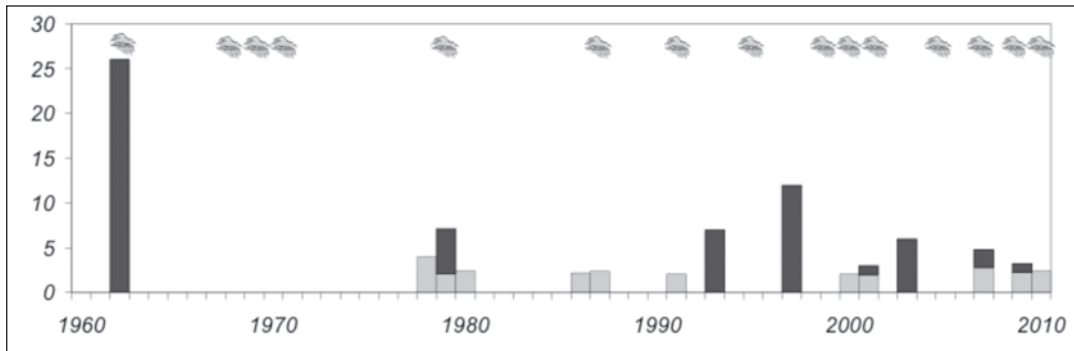
ter local de estas precipitaciones, ya que muchos de los datos de las precipitaciones intensas sólo se registraron en las inmediaciones de la Caldera; esto es probablemente debido al efecto orográfico de las pronunciadas pendientes y de su orientación, que es favorable a los vientos del oeste y suroeste, característica de las principales tormentas que afectan a las Islas Canarias. Por lo tanto, el alto número de episodios registrados no es sorprendente y es posible que se hayan producido más episodios, ya que la serie de datos presenta numerosas lagunas.


Respecto a la información histórico-documental se utilizaron varios tipos de fuentes de datos (documentos civiles, militares y eclesiásticos procedentes de archivos, fuentes de bibliotecas y hemerotecas, informes técnicos impresos, ico-


nografía...). Además, se realizaron varias entrevistas a los agentes y guías del Parque Nacional, con el fin de caracterizar los niveles y áreas inundadas en las avenidas más recientes (desde 1970 hasta nuestros días) y se recopilaron numerosas fotografías y grabaciones de vídeo.

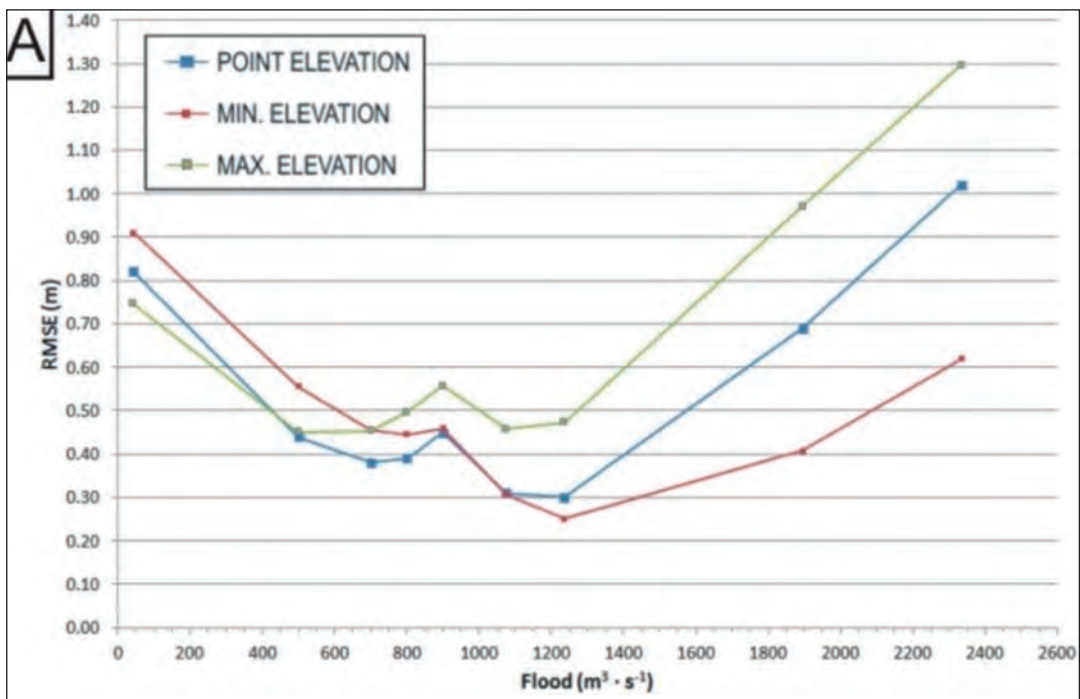
En la Figura 13 se recogen las diversas informaciones disponibles para los últimos 50 años, tanto las avenidas registradas en los árboles dañados como las indicadas por datos meteorológicos y las recogidas en las fuentes documentales. Este registro multidisciplinar y la información dendrogeomorfológica asociada podrá ser utilizado en el análisis de la frecuencia, magnitud y distribución espacial tridimensional de las avenidas torrenciales y en el desarrollo de planes para la prevención y mitigación de riesgos.

## Proyectos de investigación en parques nacionales: 2010-2013



**Figura 13.** Recopilación multidisciplinaria de indicios de avenidas torrenciales en la Caldera de Taburiente en los últimos 50 años. Las columnas negras representan el número de árboles dañados y las grises los eventos registrados de precipitación ( $\geq 200$  mm/24 horas/100). El símbolo  señala los años de eventos registrados en documentos hemerográficos.

**Figure 13.** Multidisciplinary recopilation of evidence of torrential floods in the Caldera de Taburiente National Park during the last 50 years. The black columns represent the number of injured trees and the grey bars are the precipitation amounts recorded in the large events ( $\geq 200$  mm/24 hrs /100). The symbol  indicates the years of recorded hemerographic documents of the events.



**Figura 14.** Aproximaciones de los valores de caudales que engrasan en el modelo hidráulico las alturas de los descortezados producidos por la avenida de 1997, con los menores errores mínimos cuadráticos (RMSE).

**Figure 14.** Approaches of discharge values that fit the scar heights in the hydraulic model of the 1997 flood event, with the root mean square errors (RMSE).

DÍEZ-HERRERO, A. Y COLS.

«Investigaciones dendrogeomorfológicas»

A través de la metodología expuesta en el apartado metodológico, se obtuvo que el valor de caudal líquido que minimizaba el valor de RMSE frente a la altura de los descortezados para el evento de 1997 era de  $1.235 \text{ m}^3/\text{s}$  (Figura 14). El cual, se corresponde con un periodo de retorno a 1000 años, en función de lo obtenido a partir del modelo hidrometeorológico.

Este resultado abre varios planteamientos, desde la perspectiva de que las precipitaciones registradas en las fechas del evento muestran una recurrencia en torno a los 2 años. Por un lado, la posible subestimación de las precipitaciones producidas en la cuenca durante el evento analizado, debido a la existencia de una inadecuada red de control y a la alta variabilidad en la intensidad de precipitación en la zona, que puede verse condicionada también por efectos orográficos que no pueden ser registrados por la red de monitorización existente.

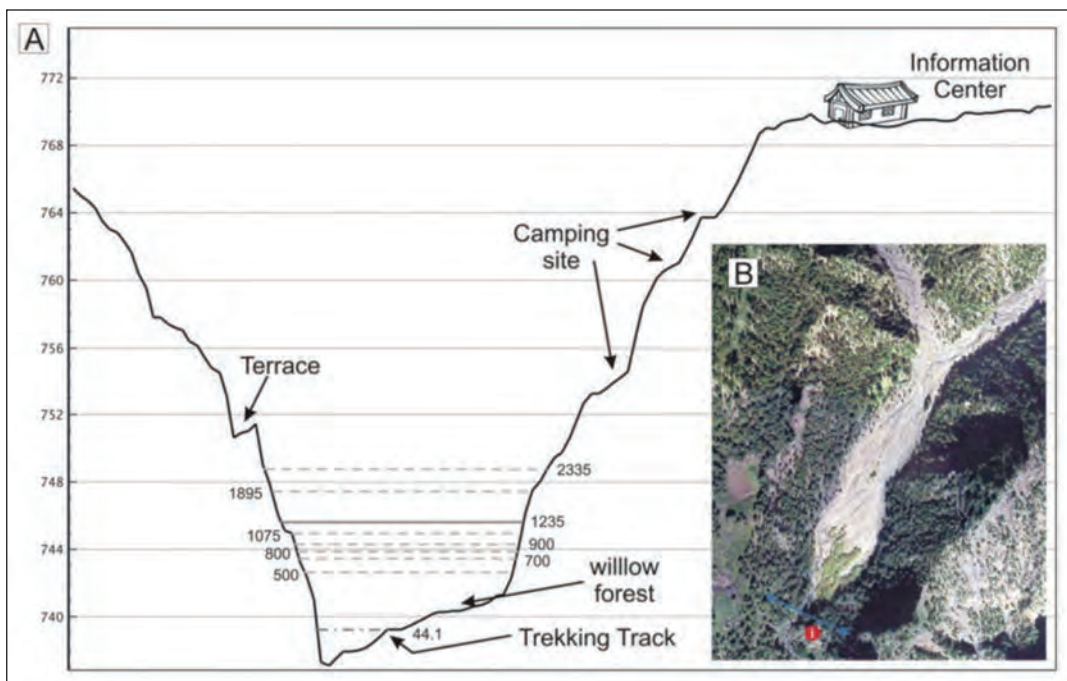
En segundo lugar, la incertidumbre que genera la imposibilidad de calibración tanto de la modelización hidrometeorológica como de la hidráulica. Lo cual deja en manos del criterio del investigador tanto la calidad de los datos de entrada a los modelos como la validez de los resultados obtenidos.

Por último, aunque no menos importante, el papel que la carga sólida tiene en este tipo de eventos de alta energía. Hay que tener en cuenta que los procesos de transporte de sedimento y movilidad del lecho no han sido contemplados en el modelo hidráulico, ante la ausencia de información de sedimentogramas en la zona y la dificultad de caracterizar un lecho tan heterogéneo granulométricamente como en el que nos encontramos, a partir de un solo valor de tamaño ( $D_{50}$ ). Esta carga sólida puede provocar cambios importantes en la dinámica del fluido, y su concentración lleva a que los eventos de avenida ocurridos en la «Playa de Taburiente» se puedan encontrar en la zona de transición entre la avenidas fluviales, los flujos hiper-concentrados y los flujos de derrubios.

Ante todo esto, y desde el punto de vista de la gestión del riesgo dentro del Parque, los resulta-

dos aquí mostrados permiten varios planteamientos:

- A partir de los resultados de la modelización hidráulica de caudales de avenida, la localización de las principales infraestructuras asociadas al área de la «Playa de Taburiente» parece a salvo (Figura 15) de verse afectadas por eventos como los acaecidos en el año 1997. No así algunos de los caminos utilizados por los visitantes del parque, en los cuales el riesgo para los usuarios es muy elevado. Sin embargo, este resultado no debe distraernos del dato mostrado por la recurrencia de las precipitaciones que desembocaron en dicho evento de avenida.
- Desde el punto de vista del análisis de los eventos de precipitación que desencadenan estas avenidas, parece necesaria la mejora de la red de monitoreo, aspecto que ya se ha comenzado a tratar dentro del proyecto con la instalación de una estación meteorológica completa en una localización de mayor altura dentro de la cuenca, para tratar de evaluar el efecto orográfico sobre la intensidad de precipitación en la cuenca.
- La frecuencia de ocurrencia de eventos de alta energía en la zona de la «Playa de Taburiente» no puede explicarse a partir de la utilización de modelos hidráulicos que no consideren el transporte de sedimento. Sin embargo, la disponibilidad de datos para alimentar a estos modelos es nula.
- La cartografía obtenida a partir del modelo hidráulico puede servir de base para la delimitación de zonas de alta peligrosidad frente a avenidas súbitas (Figura 16). La propuesta de alta peligrosidad debe basarse no en los periodos de retorno obtenidos del modelo hidráulico, sino más bien de los obtenidos del análisis de precipitaciones. Y puede ser por tanto una herramienta de gran utilidad en una ordenación del territorio, dentro de los límites del Parque, enfocada a minimizar el riesgo potencial para los usuarios y visitantes.



**Figura 15. A)** Perfil transversal al barranco de Taburiente (escala vertical exagerada), con la situación de algunos elementos expuestos del parque nacional, como el centro de servicios de la Playa de Taburiente, la zona de acampada y la senda de acceso, o el bosqueque de sauces canarios (ver situación en la ortofoto **B**), respecto a las zonas potencialmente inundables por avenidas con diferentes valores de caudales (líneas horizontales discontinuas), según el modelo hidráulico; en línea continua, el caudal estimado para el evento del año 1997.

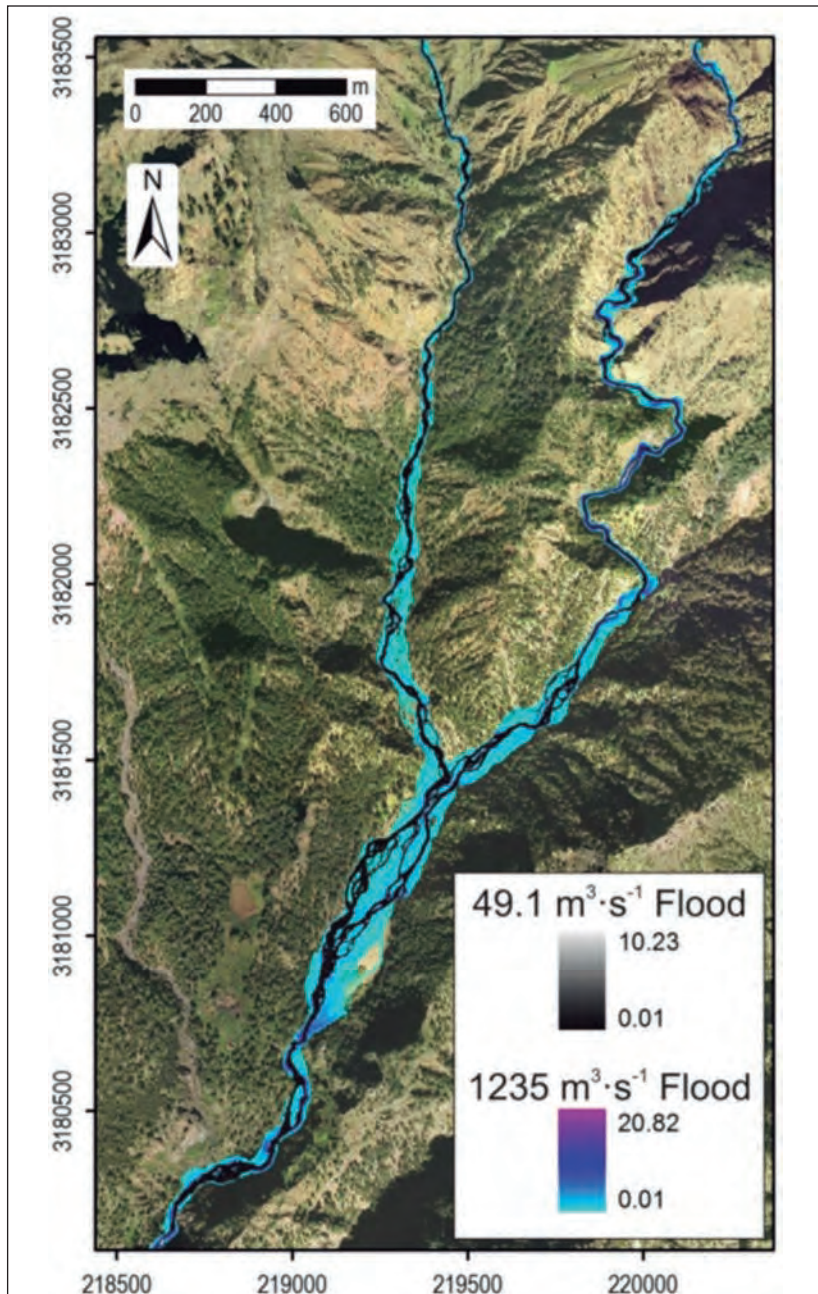
**Figure 15. A)** Cross section of the Taburiente gorge (vertical scale exaggerated), with the situation of some exposed elements of the national park, like the service center of the Playa de Taburiente, the camping area and trail access, or the Canarian willow grove (see situation orthophoto **B**), regarding the potential flooded areas with different discharges (dashed horizontal lines), according to the hydraulic model; continuous line, the estimated flow for the 1997 event.

## Resultados de la aplicación al impacto de la erosión de suelos

### *P.N. de Monfragüe*

La zona de estudio se encuentra ubicada dentro de los límites del Parque Nacional de Monfragüe que, con una superficie de 17862 ha, se sitúa en la provincia de Cáceres. Concretamente en las sendas que dan acceso al Castillo y Ermita de Monfragüe en la sierra de Monfragüe por su vertiente sur, y por su vertiente norte ( $X_{UTM}$ : 752197;  $Y_{UTM}$ : 4412922). En estas sendas, el tráfico continuo de senderistas y visitantes, ha producido importantes procesos de erosión acelerada, que se manifiestan en la presencia de raíces expuestas y re-

guerización (BALLESTEROS *et al.*, 2012). La litología en la zona de estudio se caracteriza por la presencia de pizarras y cuarcitas, estas últimas de gran dureza y resistencia a la erosión. Desde el punto de vista climatológico, la zona de estudio está dominada por el clima mediterráneo con influencia atlántica. Se caracteriza por amplios periodos de sequía estival con veranos muy calurosos (temperatura media anual 18°C con máximas de 45°C en verano) y otoños-inviernos en los que se concentran la mayor cantidad de pluviosidad (~650 mm anuales con temperaturas mínimas de 6°C). Esto hace que desde el punto de vista bioclimático la zona de estudio se enmarca en el piso mesomediterráneo, con ombroclima de seco (precipitaciones entre 350 y 600 mm) a subhúmedo



**Figura 16.** Áreas inundables y calados (profundidades de la lámina de agua) en los barrancos de Verduras de Alfonso, Cantos de Turugumay y tras su confluencia en el barranco de Taburiente, para las avenidas de 1235 m<sup>3</sup>/s (estimado para el año 1997) y para su equivalente según el modelo hidrológico con las lluvias registradas (49,1 m<sup>3</sup>/s).

**Figure 16.** Flooded areas and water depth of in the gorges of 'Verduras Alfonso' and 'Cantos de Turugumay', and after its confluence in the Taburiente gorge, for the discharge of 1235 m<sup>3</sup>/s (estimated for 1997 flood) and its equivalent from the rainfall-runoff model with recorded rainfall (49.1 m<sup>3</sup>/s).



**Figura 17.** Vistas de los caminos y sendas de acceso y circunvalación al castillo y ermita de Monfragüe, donde se pueden reconocer diferentes conjuntos de raíces expuestas como consecuencia de la erosión e incisión del suelo por el tránsito concentrado de los visitantes.

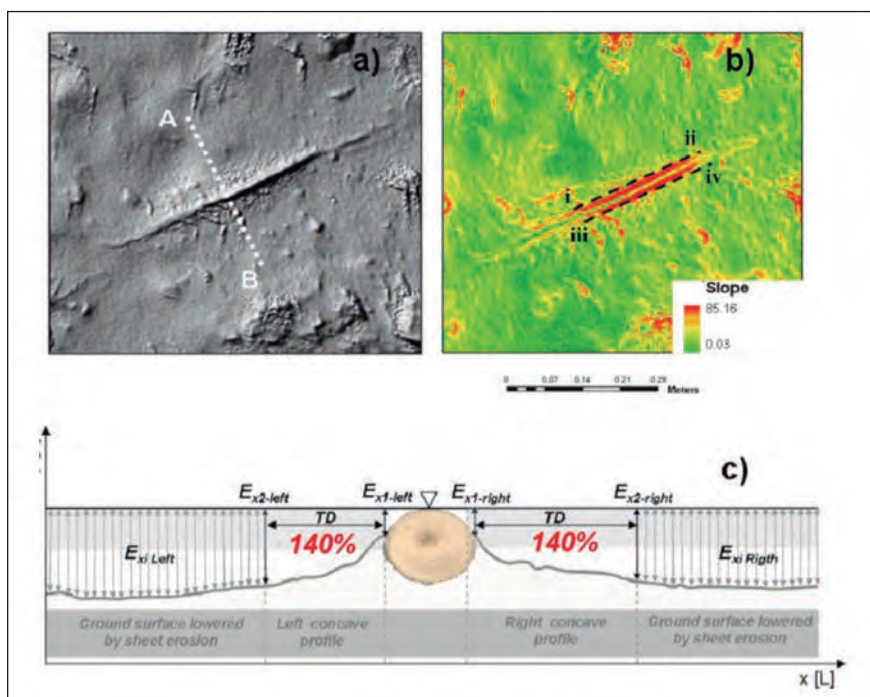
**Figure 17.** Views of paths of access to the castle and chapel Monfragüe where it can be recognized different sets of exposed roots as a result of soil erosion and incision by the concentrated traffic of visitors.



(precipitaciones entre 600 y 1.000 mm). Ambos condicionantes (litológico y climatológico) posibilitan la existencia de un bosque esclerófilo mediterráneo caracterizado por las especies *Pinus pinaster*; *Quercus rotundifolia*; *Olea sylvestris*; *Quercus suber*; *Quercus faginea* variedad *broteroii*; *Arbutus unedo*; *Phyllirea angustifolia*, *Pistacea lentiscus*, *Viburnum tinus*; *Cistus ladanifer*, entre otras.

Las investigaciones realizadas han demostrado, que el método dendrogeomorfológico utilizado hasta la fecha para estimar tasas de erosión laminar podría ser parcialmente erróneo. Principalmente, esto es debido a que no se han tenido en cuenta la rugosidad del suelo y la deforma-

ción del terreno resultado de las presiones radiales que ejercen las raíces durante su crecimiento. Como resultado, la microtopografía del suelo es altamente variable, lo cual obliga a que la estimación del parámetro  $Ex$  se haga considerando la totalidad de la superficie en la que actúa el proceso de erosión laminar. No obstante, en los estudios dendrogeomorfológicos hasta ahora publicados, la medida de  $Ex$  se hacía tomando con flexómetro o calibrador una o varias medidas donde la raíz y suelo convergen (Figura 6). Como resultado, estas medidas no son representativas de las tasas de erosión reales, ya que la variabilidad de la microtopografía se ha obviado.



**Figura 18.** Ubicación en la que el parámetro  $EX$  debe medirse: a) modelo digital de una de las imágenes escaneadas. La línea discontinua A-B representa la localización del perfil transversal; b) mapa de pendientes. Las líneas discontinuas i-ii y iii-iv marcan el límite a partir del cual el parámetro  $EX$  debe medirse; c) vista esquemática de una raíz expuesta en la que se muestra un ejemplo de perfil cóncavo.  $EX1$  representa la localización en la que el parámetro  $EX$  se mide en el método dendrogeomorfológico estándar;  $TD$  es la distancia umbral;  $EX2$  representa la localización a partir de la cual el parámetro  $EX$  debe medirse;  $EXi$  representa la variabilidad en el parámetro  $EX$  debido a la rugosidad del suelo.

**Figure 18.** Location where the parameter  $EX$  should be measured: a.) Digital model of one of the scanned images. The dashed line AB represents the location of cross section; b) slope map. Dashed lines i-ii and iii-iv mark the boundary beyond which the  $EX$  parameter must be measured; c) schematic view of an exposed root where an example is shown with a concave profile.  $EX1$  represents the location at which the parameter is measured in  $EX$  standard dendrogeomorphological method;  $TD$  is the threshold distance;  $EX2$  represents the location from which the  $EX$  parameter to be measured;  $EXi$  represents  $EX$  variability in the parameter due to surface roughness.





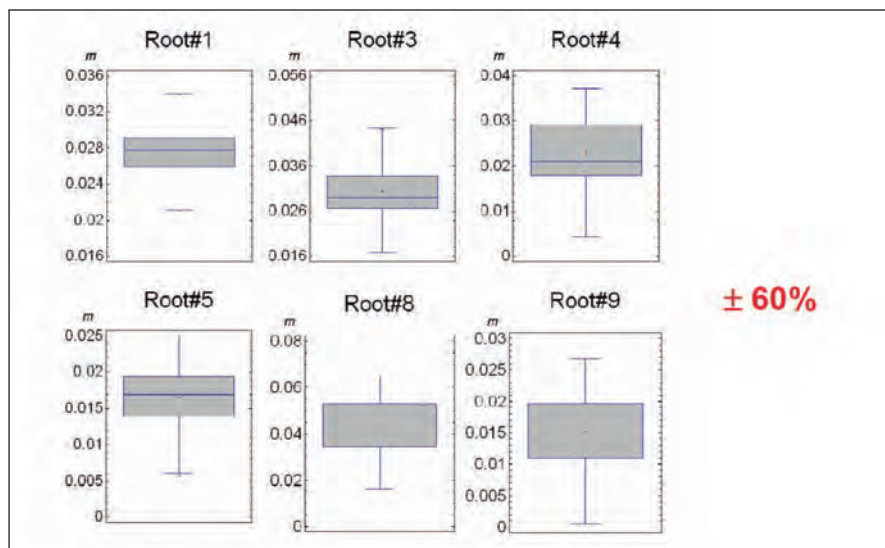
El escaneo de las réplicas de escayola, permitió obtener a escala de partícula la microtopografía de la superficie del suelo en la que aparecen las raíces expuestas. De este modo, se puede reducir la incertidumbre derivada de la utilización del método dendrogeomorfológico estándar, pues la caracterización de  $Ex$  se puede realizar en toda la superficie de interés, en lugar de en dos puntos como se hacía hasta ahora. Así, se obtuvieron tasas más representativas ya que la incertidumbre derivada de la microtopografía del suelo quedó de este modo caracterizada. Los modelos digitales de elevación derivados del escaneo de las réplicas mostraron en todos los casos perfiles cóncavos, de acuerdo con la transversal de la raíz expuesta. Esto se debe a la deformación del suelo debido a las presiones radiales ejercidas por la raíz durante su crecimiento. A partir de una distancia dada el perfil se estabiliza, representando la superficie de rebajamiento como resultado de la erosión laminar (Figura 18). Esta distancia umbral determina el ámbito en el que el parámetro  $Ex$  debe medirse.

El análisis SIG y posterior tratamiento estadístico realizados, permitieron concluir que se produce una infravaloración en las tasas de un 140%

cuando la estimación de  $Ex$  se realiza donde convergen suelo y raíz. Este error se evitaría, si las medidas de  $Ex$  se toman más allá de la distancia umbral que marca el ámbito de actuación de las presiones radiales. Por otro lado, la incertidumbre o variabilidad de las estimación es debida a la rugosidad del terreno se ha estimado en un 60% (Figura 19). Estos resultados demuestran que las medidas de  $Ex$  no deben tomarse puntualmente. En su lugar, se debe considerar la superficie representativa del rebajamiento por erosión laminar, de modo que se puedan obtener estimaciones fiables en las que la incertidumbre quede adecuadamente caracterizada.

#### *PN. de Ordesa y Monte Perdido*

El área de estudio se localiza en el Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido en el Pirineo oscense. Su altitud máxima se alcanza a 3355 m s.n.m. y la más baja a 700 m s.n.m. Los puntos de estudio seleccionado se localizan aproximadamente a 2000 m: Pradera, Mirador de Calcilaruego, Senda de los Cazadores y Faja Pelay. El substrato geológico está formado principalmente por materiales calcáreos, como calizas, areniscas y margas y flysch eocenos. El clima se define



**Figura 19.** Gráficos de cajas y bigotes mostrando la variabilidad en  $Ex$  debido a la rugosidad del suelo.

**Figure 19.** Box and whisker charts showing  $Ex$  variability due to ground roughness.

como continental, pero con influencia mediterránea. La precipitación media anual registrada en la estación de Góritz (2.200 m) es 1.735 mm observándose una gran variabilidad interanual. Las precipitaciones tienden a concentrarse principalmente en otoño y primavera. La temperatura media anual es 5°C, con mínimas mensuales de 1,92°C (febrero) y máximas en torno a 13°C (julio). Aparecen distintas comunidades vegetales, como consecuencia de las diferentes influencias climáticas, exposición y altitud. Entre 1.500-1.700 m aparecen bosques de hayas (*Fagus sylvatica*) y abetos (*Abies alba*) con un sotobosque

dominado por boj (*Buxus sempervirens*). A 2000 metros crece el *Pinus uncinata*, con un sotobosque de *Rhododendron ferrugineum* L. and *Vaccinium muntillus* L.

La obtención de muestras se llevó a cabo durante el mes de octubre de 2011. Tras llevar a cabo un reconocimiento visual en cada uno de los sectores analizados, se procedió al muestreo de las raíces expuestas parcialmente existentes en el camino (Figura 20). Para cada una de las raíces, inicialmente se registró información adicional, como la orientación de la raíz, pendiente local del



**Figura 20.** Etapas de muestreo: A) raíces expuestas en la senda; B) muestreo de una raíz expuesta con sierra de mano; C) vista de la sección de una de las raíces expuestas muestreadas; D) medición con micropofilador de la altura de suelo denudado en la parte alta de la senda; E) Caracterización de la microtopografía de la parte baja de la senda con escáner láser terrestre.

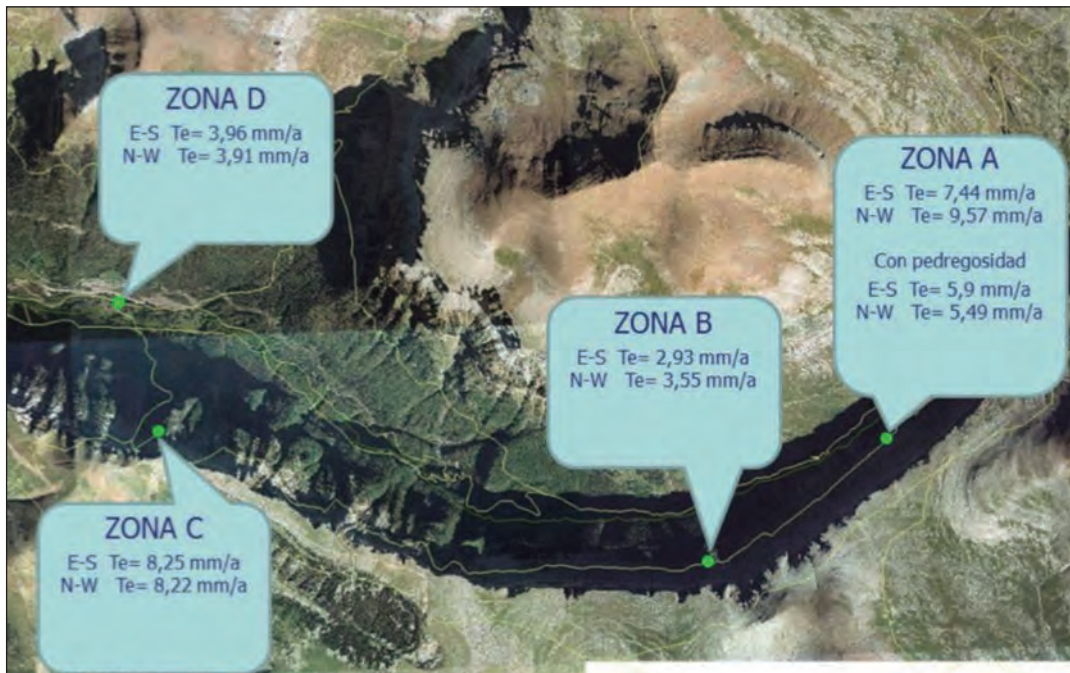
**Figure 20.** Sampling stages: A) exposed roots on the path; B) sampling an exposed root with handsaw; C) cross-sectional view of one of the exposed roots sampled; D) measurement of soil denuded height with micropfiler; E) characterization of the microtopography of the bottom of the path with terrestrial laser scanner.

*Proyectos de investigación en parques nacionales: 2010-2013*

<b>Código muestra</b>	<b>Datación</b>	<b>Diámetro(mm)</b>	<b>Altura suelo denudado, Ex(mm)</b>	<b>Tasa media(mm/año)</b>
MA-01	2005	28	5,93	0,83
MA-02	2006	28	8,47	9,12
MA-03	2005	17	2,40	9,32
MA-04	1996	27	5,10	3,09
MA-05	2004	37	17,60	5,56
MA-06	2008	18	0,17	16,15
MA-07	2007	18	10,80	10,54
MA-08	2005	17	18,10	7,20
MA-10	2002	26	2,50	5,17
MA-11	2000	18	0,30	5,31
MA-12	2003	15	3,84	6,87
MA-13	2006	16	5,10	10,97
MA-14	1995	25	10,20	3,24
MA-15	2002	30	5,80	5,90
MA-18	2002	27	2,30	7,64
MA-19	2003	24	2,60	7,23
MA-20	2000	18	2,50	0,036
MB-01	1996	26	0,55	3,97
MB-02	1998	30	0,54	4,65
MB-03	1994	20	0,64	1,36
MB-04	1993	32	1,37	3,30
MB-06	1980	30	1,14	1,87
MB-07	1994	45	0,32	2,47
MD-01	1991	32	5,88	2,53
MD-01	1991	32	5,59	2,86
MD-02	1988	40	7,60	2,31
MD-03	2004	55	11,30	7,09
MD-05	1997	45	19,98	3,76
MD-06	1998	50	1,81	4,28
MD-09	2003	30	4,61	4,89

**Tabla 2.** Parámetros utilizados en el método dendrogeomorfológico para definir tasas medias de erosión laminar en las muestras tomadas en las sendas del parque nacional de Ordesa y Monte Perdido.

**Table 2.** Parameters used in the dendrogeomorphological method for defining average rates of sheet erosion in samples taken in the paths of the Ordesa and Monte Perdido National Park.



**Figura 21.** Tasas medias de la erosión acelerada de suelos ( $T_e$ , mm/año) en las sendas del parque nacional de Ordesa y Monte Perdido, en las cuatro zonas muestreadas, en función de la orientación cardinal de las laderas y de la pedregosidad del suelo.

**Figure 21.** Average rates of accelerated soil erosion ( $T_e$ , mm/year) in the paths of the Ordesa and Monte Perdido National Park, in the four sampled areas, depending on the orientation of the slope aspect and soil stoniness.

terreno e información gráfica. Posteriormente, se llevó a cabo la adquisición de la microtopografía empleando microperfiladores, en la parte alta de la Senda de los Cazadores, y laser escáner terrestre (TLS), en la parte baja de la Senda de los Cazadores (Figura 20). Una vez obtenida esta información, se procedió a cortar una sección transversal de la raíz por medio de una sierra de mano. Todas las muestras fueron sigladas adecuadamente y almacenadas a temperatura ambiente para un secado controlado de la madera. Posteriormente, se llevó a cabo el lijado y pulido continuo de la sección de la raíz para facilitar el análisis de los anillos de crecimiento.

Se muestrearon y analizaron un total de 30 raíces expuestas. El análisis de la microtopografía del terreno mostró que, en valores medios, la superficie del suelo deja de estar alterada por el crecimiento de la raíz a una distancia media de 32,5

mm con respecto a la raíz expuesta. Las raíces muestreadas definieron edades comprendidas entre 4 y 32 años, mientras que las tasas de erosión estimadas mediante el método dendrogeomorfológico definieron un rango comprendido entre 0,036 y 16,15 mm/año, siendo 5,31 mm/año la tasa de erosión media estimada (Tabla 2). La distribución de las tasas en los diferentes sectores de las sendas es la que muestra la Figura 21.

## RECOMENDACIONES DE GESTIÓN

A partir de los resultados obtenidos (ver apartado anterior), de su interpretación y las conclusiones, se pueden proponer a los gestores de los parques nacionales estudiados y la Red en su

*Proyectos de investigación en parques nacionales: 2010-2013*

conjunto las siguientes acciones concretas de aplicación para realizarse:

- 1) Modificar el trazado de algunos tramos de las sendas y caminos del P.N. de la Caldera de Taburiente allí donde intersectan a sectores de los cauces categorizados como de alta peligrosidad y riesgo para bajos y medios periodos de retorno (ver Figura 16); como ya se ha hecho con la senda de descenso del barranco de Las Angustias en las proximidades de Dos Aguas durante el verano de 2013.
- 2) Elaborar un plan especial de protección civil ante el riesgo por inundaciones, para establecer protocolos de actuación y sistemas de predicción y prevención de posibles daños a los visitantes del P.N. de la Caldera de Taburiente, el personal del parque y las instalaciones de acceso.
- 3) Proteger los nuevos afloramientos de materiales detríticos con restos de árboles, hojas y piñas fósiles aparecidos en la margen derecha del barranco de Taburiente (P.N. de la Caldera de Taburiente; RUBIALES *et al.*, 2013), frente a la depredación por coleccionismo o comercialización, o frente a su utilización por los visitantes por las supuestas propiedades dermatológicas.
- 4) Adecuar los drenajes transversales de caminos forestales, carreteras y la vía de ferrocarril (Cercedilla-Cotos) a los caudales punta extraordinarios con elevada carga sólida, de los torrentes que circulan desde las cumbres a la parte media de las laderas del P.N. de la Sierra de Guadarrama (BALLESTEROS *et al.*, 2013).
- 5) Adecuar y mejorar determinados tramos de los caminos de la Faja Pelay y Senda de los Cazadores (P.N. de Ordesa y Monte Perdido; ver Figura 21) y de la Senda Roja y entorno de la ermita y castillo (P.N. de Monfragüe) para, aumentando la pedregosidad o con ligeras modificaciones puntuales, reducir las tasas de erosión acelerada de suelos como consecuencia de la circulación de visitantes; incluso restringir el tránsito en determinadas épocas y zonas.

- 6) Continuar con las actividades de investigación y control de los procesos activos (avenidas torrenciales, erosión de suelos, movimientos de ladera...) que pueden interferir con las actividades o presencia humana en los parques nacionales, generando situaciones de riesgo.

## CONCLUSIONES

A modo de conclusiones de los resultados del estudio y el proyecto del que deriva, y de su aplicación a la gestión de los parques nacionales y la propia Red, se podría sintetizar en:

- Las técnicas dendrogeomorfológicas se han demostrado **válidas y útiles en la evaluación de los peligros y riesgos** (avenidas e inundaciones) **y de impactos** (erosión de suelos) en los parques nacionales estudiados.
- Los resultados de **áreas potencialmente inundables y zonas de peligrosidad por avenidas** son útiles para la adecuación del trazado de las sendas de acceso de los visitantes, para la ordenación del uso público, y para la planificación y diseño de las instalaciones (puentes, centros de recepción de visitantes e interpretación, paneles, etc.).
- Los resultados de las **tasas de erosión de suelos medias en las sendas y caminos**, y su evolución en el tiempo, son útiles para delimitar y mejorar los tramos más conflictivos, así como para tomar decisiones sobre la capacidad de acogida de los mismos y limitar el flujo de visitantes en determinadas épocas y tramos.
- Las técnicas dendrogeomorfológicas que se han estudiado en cuatro diferentes parques nacionales, tanto del ámbito macaronésico (P.N. de la Caldera de Taburiente), mediterráneo (P.N. de Monfragüe), como de montaña (PP.NN. de Ordesa y Monte Perdido, y Sierra de Guadarrama), podrían ser de **aplicación a otros muchos Parques Nacionales de la Red**, especialmente a aquéllos que tengan problemas de avenidas e inundaciones (PP.NN. de Picos de Europa, Sierra Nevada, Aigües Tortes

y Lago de Sant Maurici...) y erosión de suelos en las sendas más transitadas (PP.NN. de las Tablas de Daimiel, Teide...).

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la colaboración del personal de los parques nacionales de la Caldera de Taburiente, Monfragüe, Ordesa y Monte Perdido, y Sierra de Guadarrama (incluyendo Montes de Valsain), a sus directores o gerentes (en especial a Ángel Palomares, Ángel Rodríguez y Javier Donés), responsables de uso público, los técnicos (Elena Villagrasa), agentes de medioambiente, guardas, guías y vigilantes (Ezequiel Alfonso, José Heriberto Lorenzo, Chamaida, Santiago, Óscar, Jorge, Pedro, Jonás); también al personal de TRAGSA que realiza tareas de mantenimiento en algunos de ellos. Agradecimiento que hacemos extensivo a: el topógrafo Luis Fernández y su ayudante Luis Barca; al fotógrafo profesional Alberto Carrera; a Alfonso Benito, Alfredo Pérez-González y Theodoros Karampaglidis (CENIEH), por faci-

tar el proceso de escaneo 3D de las réplicas, gracias al convenio de colaboración con el IGME; a Ignacio Gutiérrez por su colaboración con la página web del proyecto ([www.idea-gesppnn.es](http://www.idea-gesppnn.es)) y los aspectos topográficos; a Dielmo por el tratamiento de las imágenes Lidar (Jose Carlos y José Vicente); al Gabinete Lingüístico de la UCM por las revisiones del inglés (Bill Newton); al Consejo Insular de Aguas de La Palma; a Maricarmen Villaseca por la gestión administrativa de las órdenes de comisión de servicio y propuestas de gasto; a la OTRI del IGME por la tramitación de las justificaciones y memorias económicas (Inma Gil); y a Clara Rodríguez, Sylvia Hesse, Julia García Oteyza, Miguel Ángel Rodríguez, Klemen Novak, Celia Rodríguez, Virginia Ruiz y Laura Becerril, por su colaboración en el trabajo de campo, laboratorio y gabinete. Esta investigación ha sido financiada por el proyecto IDEA-GesPPNN (MAGRAMA, OAPN 163/2010), gestionado por el Instituto Geológico y Minero de España (MINECO); a cuyo equipo de investigación al completo tenemos que agradecer su participación e interés en el desarrollo del mismo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALESTALO, J. 1971. Dendrochronological interpretation of geomorphic processes. *Fennia* 105: 1-140.
- 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, 119 pp.
- BALLESTEROS CÁNOVAS, J.A., BODOQUE DEL POZO, J.M., DÍEZ HERRERO, A., RUIZ VILLANUEVA, V., NADAL ROMERO, M.E., GÉNOVA FÚSTER, M., RUBIALES JIMÉNEZ J.M., BAEZA CHICO, E., HERNÁNDEZ RUIZ, M. & GUTIÉRREZ PÉREZ, I. 2012. Investigaciones dendrogeomorfológicas aplicadas a la gestión de los impactos por erosión hídrica acelerada de suelos en las sendas del parque nacional de Monfragüe (Cáceres). XI Congreso Nacional de Medio Ambiente (CONAMA 2012), Madrid del 26 al 30 de noviembre de 2012, 21 páginas.
- BALLESTEROS CANOVAS, J.A., RODRÍGUEZ-MORATA, C., GAROFANO-GOMEZ, V., RUBIALES, J.M., SANCHEZ-SALGUERO, R., TOUCHAN, R., MEKO, D., STOFFEL, M., DIEZ-HERRERO, A. & BODOQUE, J.M. 2013. 250 Years of flash-flood activity in an ungauged, managed mountain forest catchment (Valsaín, Central Spain). Accepted Abstracts of the 9th International Conference on Dendrochronology (WorldDendro 2014), p. 12, 13-17 January 2014, Melbourne (Australia).
- BODOQUE DEL POZO, J.M., BALLESTEROS CÁNOVAS, J.A., DÍEZ HERRERO, A., RUIZ VILLANUEVA, V., NADAL ROMERO, M.E., GÉNOVA FÚSTER, M., RUBIALES JIMÉNEZ J.M., BAEZA CHICO, E. & HERNÁNDEZ RUIZ, M. 2012. Nueva propuesta para la mejora de la estimación de tasas de erosión hídrica mediante técnicas dendrogeomorfológicas. En: A. González Díez (Coord.),

*Proyectos de investigación en parques nacionales: 2010-2013*

- Avances de la Geomorfología de España, pp. 207-210. Actas de la XII Reunión Nacional de Geomorfología, Santander, 17-20 septiembre de 2012. PubliCan Ediciones, Universidad de Cantabria, Santander, 690 pp.
- BODOQUE, J.M., DÍEZ, A., MARTÍN-DUQUE, J.F., GÓMEZ, M., GODFREY, A., PEDRAZA, J., CARRASCO, R.M. & SANZ, M.A. 2002. Determinación de tasas de erosión utilizando métodos dendrocronológicos en raíces expuestas. Dos ejemplos en la vertiente septentrional de la Sierra de Guadarrama. En: E. Serrano, A. García de Celis, J.C. Guerra, C.G. Morales and M.T. Ortega (eds.) Estudios recientes (2000-2002) en Geomorfología. Patrimonio, montaña y dinámica territorial. Págs. 167-182. SEG y Universidad de Valladolid), Valladolid.
- BODOQUE, J.M., DÍEZ-HERRERO, A., MARTÍN-DUQUE, J.F., RUBIALES, J.M., GODFREY, A., PEDRAZA, J., CARRASCO, R.M. & SANZ, M.A. 2005. Sheet erosion rates determined by using dendrogeomorphological analysis of exposed tree roots: Two examples from Central Spain. *Catena* 64: 81-102.
- CARRARA, P.E. & CARROLL, T.R., 1979. The determination of erosion rates from exposed tree roots in the Piceance Basin, Colorado. *Earth Surface Processes*, 4: 307-317.
- DÍEZ HERRERO, A., GÉNOVA FÚSTER, M., MAYER SUÁREZ, P., BALLESTEROS CÁNOVAS, J.A., BECERRIL CARRETERO, L., RUBIALES JIMÉNEZ, J.M., HERNÁNDEZ RUIZ, M., SAZ SÁNCHEZ, M.A., BODOQUE DEL POZO, J.M. & RUIZ VILLANUEVA, V. 2012a. Investigaciones dendrogeomorfológicas aplicadas al estudio de la peligrosidad por avenidas e inundaciones en el parque nacional de la Caldera de Taburiente (La Palma, Islas Canarias). XI Congreso Nacional de Medio Ambiente (CONAMA 2012), Madrid del 26 al 30 de noviembre de 2012. 10 páginas.
- DÍEZ HERRERO, A., GÉNOVA FÚSTER, M., MAYER SUÁREZ, P., BALLESTEROS CÁNOVAS, J.A., BECERRIL CARRETERO, L., RUBIALES JIMÉNEZ, J.M., GUTIÉRREZ PÉREZ, I., HERNÁNDEZ RUIZ, M., SAZ SÁNCHEZ, M.A., BODOQUE DEL POZO, J.M. & RUIZ VILLANUEVA, V. 2013a. Estudio de la frecuencia y magnitud de avenidas torrenciales en el P.N. de la Caldera de Taburiente (La Palma) mediante técnicas dendrogeomorfológicas. En: Santamarta Cerezal, J.C. (ed.), *Avances en la investigación de los recursos hídricos en islas y terrenos volcánicos*. pp. 199-209. Colegio de Ingenieros de Montes, Tenerife, 272 pp.
- DÍEZ HERRERO, A., GÉNOVA FÚSTER, M., MAYER SUÁREZ, P., BALLESTEROS CÁNOVAS, J.A., BECERRIL CARRETERO, L., RUBIALES JIMÉNEZ, J.M., HERNÁNDEZ RUIZ, M., SAZ SÁNCHEZ, M.A., BODOQUE DEL POZO, J.M. & RUIZ VILLANUEVA, V. 2012b. Investigaciones dendrogeomorfológicas aplicadas al estudio de la peligrosidad por avenidas e inundaciones en el parque nacional de la Caldera de Taburiente (La Palma, Islas Canarias). En: A. González Díez (coord.), *Avances de la Geomorfología de España*, pp. 159-162. Actas de la XII Reunión Nacional de Geomorfología, Santander, 17-20 septiembre de 2012. PubliCan Ediciones, Universidad de Cantabria, Santander, 690 pp.
- DÍEZ HERRERO, A., GÉNOVA FÚSTER, M., MAYER SUÁREZ, P., BALLESTEROS CÁNOVAS, J.A., BECERRIL CARRETERO, L., RUBIALES JIMÉNEZ, J.M., HERNÁNDEZ RUIZ, M., SAZ SÁNCHEZ, M.A., BODOQUE DEL POZO, J.M. & RUIZ VILLANUEVA, V. 2012c. Investigaciones dendrogeomorfológicas aplicadas al estudio de la peligrosidad por avenidas e inundaciones en el parque nacional de la Caldera de Taburiente (La Palma, Islas Canarias). XI Congreso Nacional de Medio Ambiente (CONAMA 2012), Madrid del 26 al 30 de noviembre de 2012. 10 páginas.
- DÍEZ-HERRERO A., GENOVA M., MAYER P., BALLESTEROS J.A., RUBIALES J.M., SAZ M.A., BECERRIL L., HERNANDEZ M., GUTIERREZ-PEREZ I., BODOQUE J.M. & RUIZ-VILLANUEVA, V. 2013b. Dendrogeomorphological research applied to flood hazard analysis in the 'Caldera de Taburiente' National Park (La Palma, Canary Islands, Spain). 8th IAG International Conference on Geomorphology. Abstracts Volume, p. 500. Oral communication. Paris (France), 27-31 August 2013.
- DÍEZ-HERRERO, A., BALLESTEROS, J.A., BODOQUE, J.M., EGUÍBAR, M.A., FERNÁNDEZ, J.A., GÉNOVA, M., LAÍN, L., LLORENTE, M., RUBIALES, J.M. & STOFFEL, M. 2007. Mejoras en la esti-

- mación de la frecuencia y magnitud de avenidas torrenciales mediante técnicas dendrogeomorfológicas. *Boletín Geológico y Minero* 118 (4): 789-802.
- GÉNOVA FUSTER, M., DÍEZ HERRERO, A., BALLESTEROS CÁNOVAS, J.A., MAYER SUÁREZ, P., RUBIALES JIMÉNEZ, J.M. & SAZ SÁNCHEZ, M.A. 2013a. Datación de avenidas e inundaciones por métodos dendrogeomorfológicos: aplicación en el Parque Nacional de la Caldera de Taburiente (La Palma, Canarias). En: AEET (ed.), Libro de resúmenes de comunicaciones del XI Congreso Nacional de la Asociación Española de Ecología Terrestre. S.06-04-O, pág. 102. Pamplona-Iruña, 6-10 de mayo de 2013. Publicado en Open Access bajo los términos de Creative Commons attribution Non Comercial License. Doi.: 10.7818/AEET.XICongress.2013.
- GÉNOVA, M., DIEZ-HERRERO, A., BALLESTEROS-CÁNOVAS, J.A., MAYER, P., RUBIALES, J.M. & SAZ, M.A. 2013b. Dendrogeomorphological record in Las Angustias stream ('Caldera de Taburiente' National Park, La Palma, Canary Islands, Spain) . Accepted Abstracts of the 9th International Conference on Dendrochronology (WorldDendro 2014), p. 49, 13-17 January 2014, Melbourne (Australia).
- HARRISON, S.S. & RIED, J.R. 1967. A flood-frequency graph based on tree-scar data. *Proc. N. D. Acad. Sci.* 21: 23-33.
- 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.
- RUBIALES, J.M., DÍEZ-HERRERO, A., GÉNOVA, M., BALLESTEROS, J., DE NASCIMENTO, L. & FERNÁNDEZ-PALACIOS, J.M. 2013. Late Holocene wood remains from alluvial/colluvial deposits in the Caldera de Taburiente National Park (La Palma, Canary Islands). En: Fernández-Palacios, J.M., de Nascimento, L., Hernández, J.C., Clemente, S., González, A., Díaz-González, J.P. (Eds.): *Climate Change perspectives from the Atlantic: past, present and future*. Documentos congresuales 33, Servicio de Publicaciones, Universidad de La Laguna, Tenerife, 243-257. Edición en CD-ROM.
- RUBIALES, J.M., BODOQUE, J.M., BALLESTEROS, J.A. & DÍEZ-HERRERO, A. 2008. Response of *Pinus sylvestris* roots to sheet-erosion exposure: an anatomical approach. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 8: 223-231.
- SIGAFOOS, R.S. 1964. Botanical evidence of floods and flood-plain deposition. *Geol. Surv. Prof. Pap. (U.S.)* 485-A: 1-35.
- STOFFEL, M. y BOLLSCHWEILER, M. 2009. What tree rings can tell about earth-surface processes. Teaching the principles of dendrogeomorphology. *Geography Compass* 3: 1013-1037.
- STOFFEL, M., BOLLSCHWEILER, M., BUTLER, D.R., LUCKMAN, B.H. 2010. *Tree rings and natural hazards: a state of the art*. Springer, Heidelberg, New York.