

Estimación de tasas de erosión hídrica a partir de Dendrogeomorfología

BODOQUE, J.M.¹, BALLESTEROS-CÁNOVAS, J.A.², RUBIALES, J.M.³, MARTÍN-DUQUE, J.F.⁴ y DÍEZ-HERRERO, A.²

⁽¹⁾ Departamento de Ingeniería Geológica y Minera. Universidad de Castilla-La Mancha. Campus Fábrica de Armas, E-45071, Toledo.

⁽²⁾ Departamento de Investigación y Prospectiva Geocientífica, Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Ríos Rosas 23, E-28003, Madrid.

⁽³⁾ Departamento de Silvopascicultura, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Universidad Politécnica de Madrid, E-28040 Madrid.

⁽⁴⁾ Departamento de Geodinámica, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, E-28040 Madrid.

Resumen

La senda Schmid es un camino bien conocido dentro de la Sierra de Guadarrama, caracterizándose por presentar un uso recreativo casi exclusivo, generalmente asociado al senderismo. Como resultado, se ha producido un proceso acelerado de erosión hídrica que ha derivado en la exposición de raíces de *Pinus sylvestris* L. Investigaciones previas llevadas a cabo en esta área, han utilizado técnicas dendrogeomorfológicas para estimar tasas de erosión hídrica basadas en el análisis del cambio del patrón morfológico de las series de anillos de crecimiento. Para ello, se calculó el cociente definido por la profundidad de rebajamiento existente entre la parte superior de la raíz hasta la superficie actual del suelo; y el número de anillos que denotan exposición subaérea, al definir éstos un patrón de crecimiento excéntrico.

En este trabajo se han reevaluado, a partir de 18 muestras tomadas a lo largo de la senda, tasas de erosión hídrica sobre la base de la determinación del primer año de exposición mediante el análisis anatómico. Para ello, en laboratorio se obtuvieron imágenes de láminas delgadas de madera de raíz, las cuales fueron adquiridas por medio de un dispositivo digital acoplado a un microscopio óptico.

Los parámetros considerados fueron: a) anchura del anillo de crecimiento; b) número de células por anillo; c) porcentaje de madera tardía; y d) diámetro de la luz celular en la madera temprana. Una vez finalizado el estudio anatómico, y con el fin de validar las conclusiones preliminares derivadas de éste, se realizó un análisis ANOVA, verificándose diferencias que han permitido utilizar la fecha de exposición para reevaluar las tasas con una mayor precisión que por medio del simple cambio de patrón excéntrico. Los resultados de tasas de erosión acelerada obtenidos y sus tendencias evolutivas en el tiempo podrían ayudar a la gestión adecuada y regulación del tránsito de excursionistas en áreas de especial fragilidad.

Palabras clave

análisis anatómico, anillos de crecimiento, raíces, senderismo, Sierra de Guadarrama.

1. Introducción

El procedimiento empleado para la estimación de tasas de erosión a partir de raíces expuestas se basa en el hecho siguiente (CARRARA & CARROLL, 1979): 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 cambial 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 tejido está vivo. La denudación existente en el entorno de la raíz expuesta se determina midiendo la distancia existente entre la parte superior de la raíz y el suelo. El cociente entre esta medida y el intervalo temporal que ha permanecido la raíz expuesta, define una aproximación a la tasa de erosión en mm/año (LAMARCHE, 1963, 1968; EARDLEY & VIAVANT, 1967; McCORD, 1987; BODOQUE *et al.*, 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 (FAYLE, 1968; GÄRTNER *et al.*, 2001; MALIK & MATYJA, 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, disponibilidad de agua). De hecho, la caracterización de los cambios en la estructura microscópica de la raíz (anchura del anillo de crecimiento, porcentaje de madera tardía, canales resiníferos, diámetro máximo de la luz de la traqueida de la madera temprana), permite determinar con exactitud el primer año de exposición (GÄRTNER *et al.*, 2001). El conocimiento detallado de estos cambios constituye una poderosa herramienta, que puede ser utilizada para cuantificar tasas de erosión en áreas donde no se dispone de medidas *in situ* de este parámetro.

2. Objetivos

En este trabajo se describe la utilización de la Dendrogeomorfología para la determinación de tasas de erosión hídrica. Los objetivos a alcanzar fueron: a) validar los métodos dendrogeomorfológicos en laderas expuestas; b) estimar las tasas de erosión laminar en las áreas de estudio.

3. La Zona de Estudio: La Senda Schmid

El área de muestreo corresponde a un camino bien conocido dentro de la Sierra de Guadarrama: la Senda Schmid, localizada dentro de los denominados ‘Montes de Valsaín’. Más concretamente, se sitúa a media ladera de la falda norte de Siete Picos, uniendo los puertos de Navacerrada y de la Fuenfría (Figura 1). La Senda tiene un uso recreativo casi exclusivo, generalmente asociado a senderismo y ciclismo de montaña. Aunque su uso intensivo se inicia en la década de los setenta, sin embargo, la implantación de la actividad recreativa se remonta a finales del siglo XIX.

Desde un punto de vista geomorfológico, la Senda se sitúa en la unidad de ‘laderas’ (PEDRAZA *et al.*, 1990). Dicha unidad se desarrolla mayoritariamente sobre sustratos de monzogranitos porfídicos de grano grueso, y sólo una pequeña parte próxima al puerto de la Fuenfría lo hace sobre gneises glandulares (ITGE, 1990). En determinados sectores del camino aparece un recubrimiento de formaciones superficiales coluvionares, desarrolladas

sobre todo a expensas del sustrato monzogranítico. La senda discurre por un intervalo de altitud media sobre el nivel del mar entre 1780 m y 1870 m. La orientación general de la ladera sobre la que se sitúa es norte y su pendiente media es de 23°.

El clima es templado de latitudes medias, mesotérmico (Csbk'3j, según Köppen), de tipo mediterráneo continentalizado (por la distancia a la costa) y con influencia de montaña. La temperatura media es de 6° C, mientras que la precipitación media es de unos 1400 mm anuales, concentrados entre los meses de octubre y mayo.

El tipo de suelo es una asociación de leptosoles líticos, úmbricos y dístricos, de textura franco-arenosa. En lo que a la vegetación se refiere, la especie dominante en este entorno es *Pinus sylvestris*, con un sotobosque acompañante formado por enebro rastrero (*Juniperus communis* subsp. *alpina*), piorno serrano (*Cytisus balansae*) y cambrón o cambroño (*Adenocarpus hispanicus*).

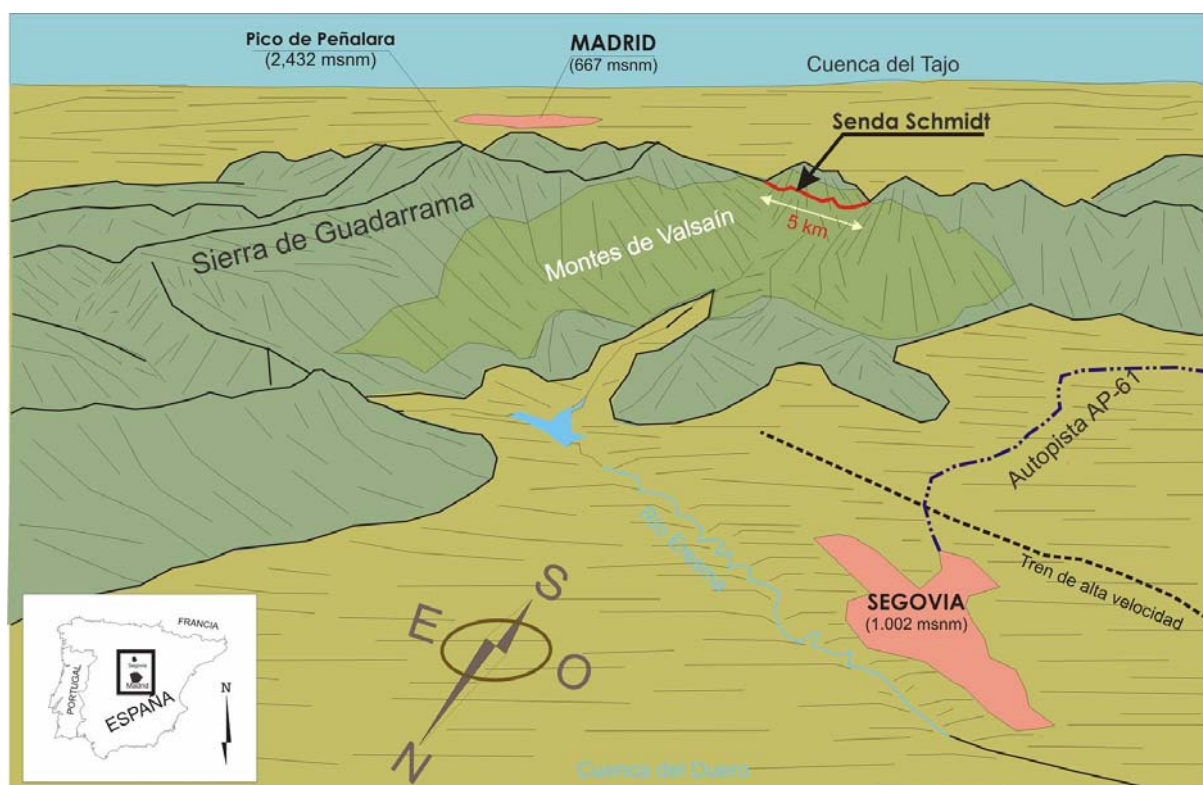


Figura.1. Localización del área de estudio en el contexto de la sierra de Guadarrama y los montes de Valsain.

4. Metodología

4.1 Estrategia de muestreo

En la senda Schmidt se cortaron 36 secciones de raíces expuestas de *Pinus sylvestris* (Figura 2), de las cuales únicamente se consideraron 18 para realizar el análisis anatómico. Las secciones se cortaron con una sierra de mano, obteniéndose testigos cilíndricos de unos 15 cm de longitud. En todos los casos se tomaron muestras de raíces orientadas según la dirección de máxima pendiente de la ladera y a una distancia del tronco superior a un metro y medio, para evitar interferencias en su crecimiento por efecto mecánico de tronco y copa.



Figura 2. Raíces expuestas de *Pinus sylvestris* en la Senda Schmidt.

4.2 Preparación y análisis de las muestras

Las muestras fueron preparadas de acuerdo con el método descrito por GÄRTNER *et al.* (2001). Se obtuvieron secciones transversales de aproximadamente un centímetro de ancho y 20 micras de espesor, con microtomo de carro deslizante y siguiendo la dirección radial. Se llevo a cabo un protocolo de tinción de lignina con safranina (SCHWEINGRÜBER, 1990). Posteriormente, se deshidrataron con alcohol (40 y 96%) y se lavaron con un disolvente apolar compuesto por aceites cítricos (*Histoclear*). Las muestras se montaron sobre portaobjetos y cubreobjetos con una resina tipo epoxy (*Eukit*), secándose después a temperatura ambiente.

Las secciones transversales fueron observadas al tiempo que fotografiadas haciendo uso de un dispositivo digital sobre el microscopio óptico. Se tomaron medidas en dirección perpendicular al anillo de crecimiento de los siguientes parámetros: a) anchura del anillo de crecimiento; b) número de células por anillo; c) porcentaje de madera tardía; y d) diámetro de la luz celular en la madera temprana. También se intentó estimar la abundancia de canales resiníferos a partir de conteos sobre el plano transversal.

Sobre la base de las medidas obtenidas, se realizó un análisis ANOVA seguido de un contraste estadístico de rangos múltiples, al objeto de verificar la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre los dos grupos homogéneos de medidas (anillos expuestos, anillos no expuestos). Los anillos de crecimiento fueron datados simplemente por conteo. Sincronizar (*crossdating*) de esta manera puede inducir a estimaciones de edad erróneas, dado que no se puede conocer con precisión la existencia de anillos falsos, dobles o en cuña. Como consecuencia, las edades estimadas deben considerarse aproximadas. La denudación existente en el entorno de la raíz expuesta se determina midiendo la distancia existente entre la parte superior de la raíz y el suelo. Finalmente, el cociente entre la altura de suelo denudado y el intervalo temporal que ha permanecido la raíz expuesta, ha permitido estimar la tasa de erosión en mm/año

5. Resultados

5.1. Determinación del primer año de exposición

El análisis estadístico de los resultados (Tabla 1), ha revelado la existencia de diferencias estadísticas significativas, a un nivel de confianza del 95%, entre los grupos de medida (anillos pre-expuestos y anillos post-expuestos) de 13 de las 17 muestras analizadas para la variable ratio (%) de madera tardía (Figura 3); mientras que para las variables crecimiento anual (mm) y anchura de anillo (número de células), todas las muestras mostraron la existencia de diferencias significativas. De igual forma, se ha comprobado que el lumen celular de las traqueidas disminuye sensiblemente en los anillos cubiertos, frente a los anillosexpuestos, considerando 10 anillos en cada grupo (Figura 4).

A la vista de estos resultados, se han podido distinguir tres zonas a lo largo del registro de anillos de crecimiento de las raíces donde los comportamientos anatómicos muestran diferencias que se relacionan con estadios de estrés existente en la raíz como consecuencia de la denudación de la cobertura edáfica. Estos son:

1. Raíz enterrada bajo una cobertura edáfica: en esta zona del registro de anillos de crecimiento de la raíz, el comportamiento anatómico es el usual para raíces enterradas de *Pinus sylvestris*. Esta zona se diferencia porque los anillos son normalmente estrechos (en relación con los anillos de la zona expuesta), el número de traqueidas por anillo es bajo y la madera tardía está delimitada por una o dos filas discontinuas de células de paredes delgadas que ocupan una pequeña proporción en el conjunto del anillo. Esto hace que sea difícil distinguir las fronteras entre madera temprana y madera tardía de los anillos anuales. Pueden existir canales resiníferos, de origen fisiológico, que aparecen distribuidos de forma deslocalizada y no en bandas tangenciales como pudieran aparecer los canales resiníferos traumáticos.
2. Adaptación de la raíz al estrés debido a la disminución de cobertura edáfica a niveles drásticos: en esta zona del registro anual de anillos de crecimiento, la raíz muestra un aumento sensible en su anchura durante dos o tres años sucesivos. Es frecuente la aparición de canales resiníferos traumáticos en bandas tangenciales en la madera temprana. La diferencia respecto a los canales resiníferos fisiológicos se aprecia por la disposición tangencial de los traumáticos y por su aumento en número. En la parte final del anillo, las filas de traqueidas se caracterizan por presentar una pared celular extremadamente gruesa que favorece la diferenciación de los bordes que definen la madera tardía, facilitando, por otro lado la presencia de falsos anillos. El número de traqueidas por anillo, así como el aumento en grosor de la pared celular, está acompañado por una reducción notable en el lumen celular.
3. Adaptación de la raíz al estrés resultante por su exposición: esta zona es la consecuencia de la adaptación, por parte de las raíces, a las condiciones de estrés resultante de su exposición aérea. Las muestras analizadas no muestran una pauta constante de comportamiento reconocible a excepción de la presencia abundante y sistemática de traqueidas con paredes gruesas y lumen celular pequeño. En algunas muestras, las pautas de comportamiento se mantienen iguales que en el caso de la zona 2; es decir, continúa la existencia de anillos anchos alternados con un aumento de canales resiníferos. Sin embargo, en otras muestras, aparece una alternancia muy



marcada en la anchura de anillos, una variabilidad en el ratio madera temprana/madera tardía y un tamaño del lumen celular cambiante.

Tabla 1. Resumen de los datos obtenidos en el análisis estadístico realizado sobre los grupos homogéneos considerados (anillo no expuesto –N–; anillo expuesto –E–). En naranja se resaltan las muestras cuyos grupos, a un nivel de confianza del 95%, no definen diferencias estadísticamente significativas.

Muestra	Nº muestras	Zona	Crecimiento anual (mm)		Anchura de anillo (número de células)		Ratio (%) de madera tardía	
			Media	Gupos homogéneos	Media	Gupos homogéneos	Gupos homogéneos	Media
VAL01	107	N	0,45	a	5,50	A	25,59	a
	10	E	1,88	b	30,90	B	49,32	b
VAL02	47	N	0,68	a	4,87	A	22,00	a
	12	E	2,74	b	26,92	B	45,92	b
VAL03	25	N	0,59	a	5,52	A	16,84	a
	12	E	3,40	b	53,00	B	36,50	b
VAL04	19	N	0,48	a	4,79	A	19,25	a
	30	E	1,15	b	15,00	B	45,15	b
VAL05	20	N	0,17	a	3,20	A	18,36	a
	9	E	0,68	b	28,33	B	37,70	b
VAL06	19	N	0,48	a	4,79	A	19,25	a
	14	E	1,16	b	15,00	B	45,16	b
VAL07	32	N	0,29	a	4,12	A	25,20	a
	20	E	1,14	b	17,20	B	43,73	b
VAL08	15	N	1,94	a	14,90	A	25,49	a
	6	E	2,90	b	25,00	B	55,61	b
VAL09	58	N	0,29	a	3,59	A	29,00	a
	18	E	2,11	b	30,56	B	48,56	b
VAL10	88	N	0,85	a	5,78	A	18,90	a
	4	E	5,43	b	49,25	B	21,55	a
VAL11	43	N	0,184	a	5,85	A	2,28	a
	17	E	1,288	b	33,76	B	45,06	b
VAL12	40	N	0,314	a	5,57	A	8,17	a
	26	E	0,878	b	27,23	B	58,24	b
VAL13	73	N	0,181	a	4,33	A	4,28	a
	27	E	0,986	b	21,33	B	44,11	b
VAL14	42	N	0,344	a	8,57	A	29,45	a
	26	E	1,283	b	33,50	B	30,92	a
VAL15	33	N	0,555	a	12,24	A	39,88	a
	20	E	1,471	b	32,3	B	44,97	a
VAL16	46	N	0,215	a	5,08	A	5,11	a
	41	E	0,612	b	13,19	B	31,63	b
VAL17	26	N	0,794	a	7,61	A	23,60	a
	21	E	1,992	b	21,05	B	30,06	a

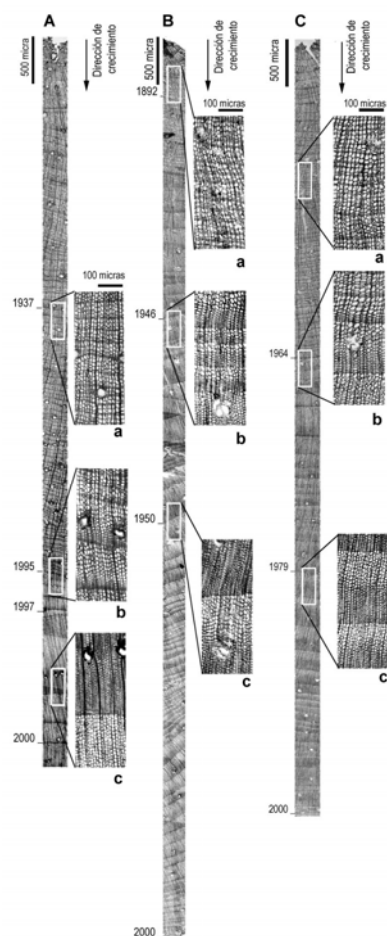


Figura 3. Secciones transversales y zonas características representativas de los testigos de raíz muestreados.

5.2. Tasas de erosión hídrica estimadas

Para conseguir que el conjunto de medidas de las tasas de erosión estimadas ajusten a una distribución normal, es decir, que la muestra sea lo más ‘centrada’ e ‘insesgada’ posible, o lo que es lo mismo, que la mayoría de los valores se agrupen alrededor de la media, así como que los valores extremos se sitúen de modo simétrico respecto de la media y con frecuencias similares, se realizó una transformación logarítmica de los datos. La estimación del valor medio de la variable log-normal mediante inferencia estadística, permitió definir el intervalo en el que estaba contenida la media poblacional. Para transformar los valores obtenidos a unidades de mm/año, se utilizó el antilogaritmo natural, de modo que el valor medio de la tasa de erosión existente en la senda Schmid se encuentra dentro del intervalo 1,73 mm/año – 2,97 mm/año, a un nivel de significación del 95 %. Estos valores son similares a los estimados por BODOQUE *et al.* (2005), los cuales estuvieron basados en la determinación del primer año de exposición mediante análisis macroscópico de las series de anillos de crecimiento.

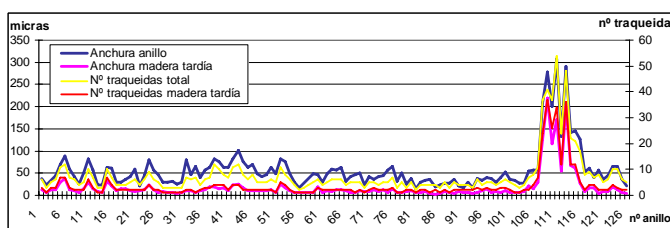
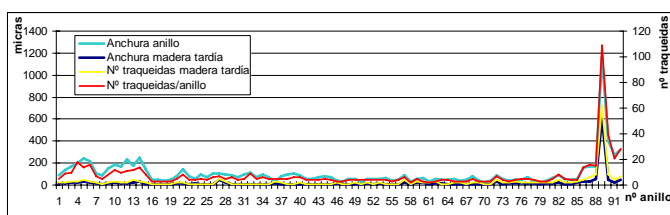


Figura 4. Series temporales en las que se muestra como distintos parámetros anatómicos responden abruptamente a la exposición

6. Discusión

En zonas donde la vegetación es abundante, procesos intensos de erosión hídrica pueden tener como consecuencia la exposición del sistema radicular arbóreo que puede ser utilizado para el estudio del proceso. Al igual que sucede con otras especies de coníferas (FAYLE, 1968; GÄRTNER *et al.*, 2001; GÄRTNER, 2003), las raíces de *Pinus sylvestris* estudiadas para determinar el primer momento de exposición (RUBIALES *et al.*, 2008) y estimar con ello tasas locales de erosión (BODOQUE *et al.*, 2005) muestran patrones de crecimiento característicos. Los resultados del estudio anatómico presentado en este trabajo correlaciona dicho cambio con el patrón de crecimiento (concéntrico hacia excéntrico), así como con distintos cambios a nivel anatómico. En este sentido, la metodología empleada para la preparación anatómica de las muestras, cuya finalidad es caracterizar este cambio anatómico, ha sido la misma que de forma generalizada han venido utilizando otros autores (SWEINGRUBER, 1990). Sin embargo, en relación con las técnicas de análisis se debe comentar que sería interesante realizar las mediciones con un programa específico desarrollado para el estudio anatómico de tejidos vegetales (p.e. *WinDendro*). Con todo, a pesar de haber utilizado un programa de análisis de imágenes no específico (*ImageProPlus*), la estrategia de medición de las variables, en especial del lumen celular de la traqueidas de la madera temprana, basadas en la elección aleatoria de un número de 12 células, asegura la objetividad de los resultados. De igual forma, un proceso de datación cruzada debería haberse llevado a cabo para asegurar la perfecta asignación de fechas a cada anillo de crecimiento. Autores como FRITTS (1976) consideran que en cualquier estudio dendrogeomorfológico debe realizarse un proceso de datación cruzada para validar los resultados. Falsos, dobles y anillos estrechos suelen darse con frecuencia en raíces, lo cual dificulta el proceso de datación por simple conteo.

7. Conclusiones

Los resultados obtenidos indican que la utilización de raíces expuestas como indicadores geomorfológicos, para cuantificar la erosión hídrica existente en un territorio, se muestra como un método con grandes posibilidades de aplicación. Esta técnica puede ser especialmente útil, bien para caracterizar la influencia antrópica en los procesos de erosión hídrica, como en el caso aquí expuesto, bien para interpretar variaciones climáticas en zonas donde la influencia antrópica sea mínima. Las tasas de erosión estimadas presentan un grado de fiabilidad razonable, dado que el primer año de exposición se determinó con precisión mediante el análisis anatómico realizado. A este respecto, se pueden utilizar como indicadores para tal determinación el incremento en la anchura del anillo de crecimiento, tanto en términos absolutos como en el número de células por anillo, y el aumento en el porcentaje de madera tardía.

8. Agradecimientos

Este trabajo de investigación ha sido financiado parcialmente por el proyecto CICYT Dendro-Avenidas (CGL2007-62063) y por el proyecto Georiada (Instituto Geológico y Minero de España).

9. Bibliografía

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 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.

EARDLEY, A.J., VIAVANT, W.; 1967. Rates of denudation as measured by Bristlecone Pines. Cedar Breaks, Utah. *Utah Geological and Mineralogical Survey, Special Studies*, 21.

FAYLE, D.F.C.; 1968. Radial Growth in Tree Roots. Distribution, Timing, Anatomy, Faculty of Forestry, University of Toronto, *Technical Report No. 9*, Toronto.

FRITTS, H.C.; 1976. Tree rings and climate. New York, NY: Academic Press.

GÄRTNER, H., FRITZ, H., SCHWEINGRUBER, F.H., DIKAU, R.; 2001. Determination of erosion rates by analyzing structural changes in the growth pattern of exposed roots. *Dendrochronologia*, 19: 1-11.

GÄRTNER, H.; 2003. The applicability of roots in Dendrogeomorphology. In: Schleser, G., Winiger, M., Bräuning, A., Gärtner, H., Helle, G., Jansma, E., Neuwirth, B. & K. Treydte (Eds.) (2003): *TRACE - Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology* Vol. 1, 120-124.

ITGE; 1990. Hoja 507 (17-20) El Espinar (mapa y memoria). En: Mapa geológico de España, Escala 1:50.000, Segunda Serie, Primera Edición, *Instituto Tecnológico Geominero de España*, Madrid.

LA MARCHE, V.C.; 1963. Origin and geologic significance of buttress roots of bristlecone pines, White Mountains, California, U.S. *Geological Survey Professional Paper* 475-C, C149-C150.

LA MARCHE, V.C.; 1968. Rates of slope degradation as determined from botanical evidence, White Mountains, California, U.S. *Geological Survey Professional Paper* 32-I, 341-377.

MALIK, M., MATYJA, M.; 2008. Bank erosion history of a mountain stream determined by means of anatomical changes in exposed tree roots over the last 100 years (Bílá Opava River — Czech Republic). *Geomorphology* 98, 126-142.

McCORD, V.A.S.; 1987. Late Holocene sediment yield and transport in a northern Arizona drainage basin reconstructed by tree-ring analysis. In: G.C. Jacoby, Jr. and J.W. Hornbeck, compilers, *Proceedings of the International Symposium on Ecological Aspects of Tree-Ring Analysis*, August 17-21, 1986, Tarrytown, New York. U.S. Department of Energy, Publication CONF-8608144, 213-223.



PEDRAZA, J., VILLASANTE, R., CENTENO, J.D., FERNÁNDEZ, P.; 1990. Geomorfología. En Mapa Geológico de España, Escala 1:50.000, Cercedilla (508). *Instituto Tecnológico Geominero de España*, Madrid.

RUBIALES, J. M., BODOQUE, J.M., BALLESTEROS, J.A., DIEZ-HERRERO, A.; 2008. Response of *Pinus sylvestris* roots to sheet-erosion exposure:an anatomical approach. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 8, 223–231.

SCHWEINGRUBER, F.H.; 1990. Anatomie Europäischer Hölzer. Haupt, Bern.

