

Trabajo Fin de Grado

Propuestas metodológicas para la cuantificación de los procesos erosivos en espacios quemados: Peñas de Herrera (Zaragoza)

Autor

Yago Martín González

Directora

M^a Teresa Echeverría Arnedo

Facultad de Filosofía y Letras / Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio
2014

Resumen

Los incendios forestales se han convertido en uno de los problemas ambientales más importantes en España. Las alteraciones edáficas y la alteración, cuando no destrucción, de la cobertura vegetal que el fuego genera, unido a las intensas precipitaciones durante los meses posteriores al fuego, agudizan los procesos de erosión y con ello el riesgo de desertificación. Este trabajo, llevado a cabo después del incendio de Calcena de agosto de 2012, es un intento de caracterización y cuantificación de los procesos hidrogeomorfológicos condicionados por las acciones humanas de restauración ambiental post-fuego. En él, se ha experimentado con diversas metodologías para el estudio de la erosión hídrica en espacios quemados de montaña.

Palabras clave: incendio, análisis de los procesos erosivos, Peñas de Herrera, Cordillera Ibérica, España

Abstract

Wildfires have become one of the most important environmental issues in Spain. Soil changes and the disturbance, if not total removal, of the vegetation canopy, as well as the heavy rainstorms during the months after the wildfire, stress the erosion processes and therefore the desertification risk. This work, carried out after the wildfire of Calcena in August of 2012, is an attempt to characterize and quantify the hydro-geomorphologic processes conditioned by post-fire restoration activities. This experiment used different methodologies for the soil erosion assessment in burnt mountain areas.

Key words: wildfire, analyse of erosion processes, Peñas de Herrera, Iberian Range, Spain

Contenidos

1. Introducción	6
1.1. Interés del tema de estudio. Incendios y erosión	6
1.2. Objetivos del trabajo	7
2. Área de estudio	8
2.1. Contexto geográfico general del área de estudio.....	8
2.1.1. Localización.....	8
2.1.2. Características climáticas.....	10
2.1.3. El relieve, formas y procesos.....	13
2.1.4. Vegetación y usos de suelo.	14
2.2. El incendio de Calcena en agosto de 2012	16
2.3. Caracterización de las áreas test	18
2.3.1. Trochas (1 y 2)	18
2.3.2. Descalzamientos	20
3. Metodología.....	20
3.1. Cronograma del proyecto y descripción de trabajo de campo.....	20
3.2. Variables e instrumentación de la metodología empleada	22
3.2.1. Precipitación.....	22
3.2.2. Análisis de la erosión hídrica	22
3.2.2.1. Primer dispositivo experimental: trampa de geotextil	22
3.2.2.2. Segundo dispositivo experimental: canaletas colectoras	23
3.2.2.3. Tercer dispositivo experimental: bocas de rana.	25

3.2.3. Análisis y caracterización de los procesos erosivos de descalzamiento en las terrazas	25
3.3. Problemas metodológicos en el trabajo experimental.....	26
3.3.1. Problemas metodológicos en la trocha 1	26
3.3.1.1. Canaleta	26
3.3.1.2. Bocas de rana	27
3.3.2. Problemas metodológicos en la trocha 2.	31
3.3.2.1. Geotextil.....	32
3.3.2.2. Canaleta	33
3.3.3. Problemas metodológicos en los descalzamientos	34
4.1. Pluviometría.....	34
4.2. Comportamiento erosivo	35
4.2.1. Trocha 1	36
4.2.2. Trocha 2	36
4.2.3. Descalzamientos.....	37
4.3. Evaluación ambiental	41
5. Propuestas metodológicas alternativas.....	43
5.1. Métodos directos	43
5.1.1. Agujas de erosión.	43
5.1.2. Perfiladores microtopográficos	44
5.1.3. Cuencas experimentales.	45
5.1.4. Otros métodos	46
6. Conclusiones.....	47
7. Bibliografía	48
8. Glosario de términos	51

Índice de figuras

<i>Figura 1. Localización Parque Natural del Moncayo</i>	8
<i>Figura 2. Localización área de estudio</i>	9
<i>Figura 3. Climograma de Peñas de Herrera..</i>	10
<i>Figura 4. Captura del radar de la AEMET y de la estación de Tarazona (Zaragoza) el 4 de octubre de 2013</i>	12
<i>Figura 5. Recorte del mapa geomorfológico (Pellicer, 1984).....</i>	13
<i>Figura 6. Perímetro afectado e intensidad del fuego.</i>	16
<i>Figura 7. Tabla de combustibles en la zona de estudio.</i>	17
<i>Figura 8. Mapa de combustibles en la zona quemada en el incendio</i>	17
<i>Figura 9. Localización de las áreas experimentales</i>	18
<i>Figura 10. Cronograma del proyecto.....</i>	21
<i>Figura 11. Comportamiento pluviométrico octubre 2013-marzo 2014.....</i>	35
<i>Figura 12. Descalzamiento 1</i>	38
<i>Figura 13. Descalzamiento 2</i>	38
<i>Figura 14. Descalzamiento 3.</i>	40
<i>Figura 15. Descalzamiento 4</i>	40
<i>Figura 16. Tabla de ventajas e inconvenientes de las agujas de erosión.</i>	44
<i>Figura 17. Perfilador bidimensional de medida vertical (Mosley, 1975).</i>	45
<i>Figura 18. Tabla de ventajas e inconvenientes de los perfiladores microtopográficos.</i>	45

Índice de fotografías

<i>Fotografía 1. Área de estudio.</i>	10
<i>Fotografía 2. Nieve en las Peñas de Herrera (16 de noviembre de 2013).</i>	11
<i>Fotografía 3. Cárcava en las proximidades de las Peñas de Herrera.</i>	14
<i>Fotografía 4. Estado anterior al fuego de las Peñas de Herrera.</i>	15
<i>Fotografía 5. Detalle de la repoblación de pinos en Peñas de Herrera.</i>	15
<i>Fotografía 6. Visión lateral de la trocha 1.</i>	19
<i>Fotografía 7. Visión frontal de la trocha 1.</i>	19
<i>Fotografía 8. Detalle trocha 1.</i>	19
<i>Fotografía 9. Visión general de la trocha 2</i>	20
<i>Fotografía 10. Detalle trocha 2.</i>	20
<i>Fotografía 11. Geotextil en la trocha 2.</i>	23
<i>Fotografía 12. Canaleta instalada en la trocha 1.</i>	24
<i>Fotografía 13. Detalle de canaleta en la trocha 1.</i>	24
<i>Fotografía 14. Canaleta instalada en la trocha 2.</i>	25
<i>Fotografía 15. Bocas de rana instaladas en la trocha 1.</i>	25
<i>Fotografía 16. Toma de fotografía cenital de un descalzamiento.</i>	26
<i>Fotografía 17. Toma de medidas de un descalzamiento.</i>	26
<i>Fotografía 18. Grieta de contacto en la canaleta de la trocha 1.</i>	27
<i>Fotografía 19. Canaleta trocha 1 y boca de rana.</i>	27
<i>Fotografía 20. Respuesta de la boca de rana al primer evento de precipitación.</i>	28
<i>Fotografía 21. Obstrucción de la boca de rana izquierda (7/11/2013).</i>	28
<i>Fotografía 22. Hielo en la boca de rana.</i>	29
<i>Fotografía 23. Efecto del viento en la boca de rana.</i>	29
<i>Fotografía 24. Boca de rana desplazada.</i>	30
<i>Fotografía 25. Detalle de boca de rana desplazada.</i>	30
<i>Fotografía 26. Grieta en el contacto boca de rana-sustrato.</i>	30
<i>Fotografía 27. Boca de rana izquierda en febrero de 2014.</i>	31
<i>Fotografía 28. Sedimento atrapado en la boca de rana (febrero 2014).</i>	31
<i>Fotografía 29. Boca de rana derecha en febrero de 2014.</i>	31
<i>Fotografía 30. Trampa de geotextil en la trocha 2.</i>	32
<i>Fotografía 31. Contacto geotextil con sustrato en la trocha 2.</i>	32
<i>Fotografía 32. Geotextil después de la tormenta del 4 de octubre.</i>	33
<i>Fotografía 33. Detalle del sedimento atrapado sobre el geotextil.</i>	33
<i>Fotografía 34. Detalle de la desconexión manguera-orificio.</i>	34
<i>Fotografía 35. Canaleta instalada en la trocha 2.</i>	34
<i>Fotografía 36. Detalle de la actividad del splash y la escorrentía laminar.</i>	37
<i>Fotografía 37. Aspecto general de las laderas de las Peñas de Herrera.</i>	42
<i>Fotografía 38. Retroexcavadora forestal.</i>	43
<i>Fotografía 39. Maquinaria pesada en la ladera.</i>	43
<i>Fotografía 40. Aguja de erosión. Fuente: Sancho et al. (1991)</i>	44

1. Introducción

En el apartado introductorio se pretende ofrecer, en primer lugar, una visión general de la importancia de los estudios de los procesos erosivos post-incendio, recogiendo algunos trabajos bibliográficos referidos a las causas de esta erosión. Por otra parte, se exponen las características del “incendio de Calcena” de agosto de 2012 y se plantean los objetivos del estudio.

1.1. Interés del tema de estudio. Incendios y erosión

Las áreas de montaña presentan espacios de gran calidad desde el punto de vista paisajístico, pero también son refugio de la biodiversidad y en ocasiones zona de explotación de recursos naturales por el ser humano. Son áreas heterogéneas, caracterizadas por una estabilidad frágil, muy sensibles a cambios abruptos como ciertas actuaciones antrópicas o como los incendios forestales, que pueden generar en poco tiempo una modificación irreparable, afectando a todos los componentes del geosistema.

El suelo es parte fundamental de este sistema, en tanto que cumple funciones esenciales dentro del medio natural: producción de biomasa, regulación de los ciclos hidrológicos, mantenimiento de la calidad del agua y del aire o reservorio de biodiversidad entre otras. Es un recurso no renovable a escala temporal humana, dado que la edafogénesis en algunas áreas del planeta puede abarcar cientos e incluso miles de años.

Uno de los procesos que favorecen la degradación de las condiciones edáficas es la erosión. El fuego es un factor principal en la modificación de las características físico-químicas y biológicas del suelo, y con ello su respuesta erosiva (Wagenbrenner *et al.*, 2006; Ben-Hur *et al.*, 2011).

El fuego es un componente ecológico natural propio de los ecosistemas terrestres (Le Houerou, 1973, 1977; Naveh, 1975) y especialmente en el medio mediterráneo, donde llega a ser clave en la configuración del paisaje. Esta propensión al fuego deriva de las características del clima mediterráneo semiárido, con inviernos húmedos y suaves (muy variable dependiendo de la latitud, la altitud y la proximidad al mar) y veranos largos, secos y cálidos (Hotzl, 2008). Factores como la topografía o la orientación modifican estas características climáticas, aumentando generalmente las precipitaciones con la altitud a la par que descienden las temperaturas. Por otra parte, la intensa actividad humana en el ámbito mediterráneo no hace sino añadir un factor más a la probabilidad de ignición.

Diversos autores han resaltado que la frecuencia de incendios y la superficie quemada en la región mediterránea han aumentado desde 1960 (Kliot, 1996; Pausas and Vallejo, 1999; Wittenberg and Malkinson, 2009), lo que se puede achacar a la acumulación de combustible en áreas rurales abandonadas (Shakesby, 2011; Pausas and Fernández-Muñoz, 2012), a la silvicultura monoespecífica de especies inflamables (Shakesby, 2011) y al cambio climático (Pausas, 2004; Pausas and Fernández-Muñoz, 2012).

Los efectos hidrogeomorfológicos de los incendios provocan, en la mayor parte de los casos, una reducción de la infiltración de agua en el suelo y un incremento de la escorrentía y de la producción de sedimento (Inbar *et al.*, 1997, 1998; Martin and Moody, 2001; Moody and Martin, 2001; Benavides-Solorio and MacDonald, 2001, 2005; Mayor *et al.*, 2007; Pérez-Cabello *et al.*, 2009; Wittenberg and Inbar, 2009; Shakesby, 2011).

El aumento de la actividad erosiva ha sido atribuida a diversos factores: (I) el fuego puede reducir o destruir completamente la cubierta vegetal, modificando la capacidad de interceptación por parte de la vegetación y haciendo al suelo más susceptible a la erosión por *splash* (Pausas y Vallejo, 1999; Cerdà y Doerr, 2005; Tena

et al., 2010); (II) cambios edáficos tanto de las características físicas (densidad, porosidad, textura y estabilidad estructural), como químicas (pH, materia orgánica, nutrientes, encostramientos...) (Rubio *et al.*, 1997; Badía *et al.*, 2010; Inbar *et al.*, 2014); (III) el incremento de la repelencia al agua (especialmente en medios ácidos) que reduce las tasas de infiltración (DeBano *et al.*, 1998; Neary *et al.*, 1999; DeBano, 2000; Letey, 2001); (IV) el descenso de la evapotranspiración como resultado de la pérdida de cubierta vegetal (Ben-Huretal., 2011); (V) la impermeabilización del suelo por el transporte y la acumulación de cenizas (Cerdà y Doerr, 2008; Etiégni y Campbell, 1991; Larsen *et al.*, 2009; Mallik).

Algunas investigaciones han revelado que las mayores tasas de pérdida de suelo post-incendio se producen en los dos primeros años (Robichaud y Waldrop, 1994; DeBano, 2000), aunque ello depende de la severidad del fuego y de las características y distribución temporal de las precipitaciones posteriores al mismo (Campo *et al.*, 2006; González-Pelayo *et al.* 2006; Cawson *et. al.*, 2013). Las características climáticas de la Península provocan que los espacios quemados durante el verano sean muy susceptibles de ser erosionados por las lluvias, en ocasiones torrenciales, del otoño.

Por otro lado, las labores postincendio, talas, apertura de trochas, repoblaciones mediante diferentes sistemas, ponen en marcha procesos erosivos tales como la incisión, el encostramiento o la decapitación de los subhorizontes orgánicos del suelo arrojando altas tasas de producción de flujo y sedimento (Pérez *et al.*, 2003)

1.2. Objetivos del trabajo

El objetivo general que se plantea con este estudio es la caracterización del comportamiento hidrogeomorfológico en trochas abiertas para la extracción de la madera quemada y en antiguos aterrazamientos repoblados. A partir de este objetivo-marco, se han realizado trabajos de corte instrumental encaminados a adaptar las herramientas de medición de los procesos erosivos, convirtiéndose esta adaptación en uno de los objetivos específicos del proyecto. Este trabajo se enmarca en un proyecto de control de la erosión post-incendio en diferentes escenarios (bosque con vegetación quemada, bosque con vegetación quemada sacada y trochas) y la regeneración vegetal en bosque de pino rodeno o resinero (*Pinus pinaster*) y en encinar (*Quercus ilex*). Estos estudios se desarrollan en el área incendiada en 2012 del Parque Natural del Moncayo y zonas adyacentes.

Los objetivos específicos para lograr esta caracterización son los siguientes:

- Elaboración de una metodología de campo para la cuantificación del comportamiento hidrogeomorfológico de las trochas destinadas a la saca de madera tras el fuego y de antiguas terrazas descalzadas.
- Experimentación y ajuste de la metodología anterior, mediante el uso de diferentes herramientas, para la medición de los procesos de erosión.
- Reconocimiento de diferentes procesos geomorfológicos tanto en las trochas como en los aterrazamientos repoblados.
- Emisión de un diagnóstico ambiental respecto a la apertura de trochas y construcción de terrazas en determinados escenarios post-fuego.

2. Área de estudio

En este apartado se recoge la descripción general del área de estudio, así como una descripción más detallada de las distintas áreas test seleccionadas. También se hace referencia a las características que presentó el “incendio de Calcena” de agosto de 2012.

2.1. Contexto geográfico general del área de estudio

Con los siguientes subepígrafes se pretende dar una visión general del medio físico de la zona de estudio comenzando por su localización y exponiendo también sus principales características climáticas, geomorfológicas y de vegetación.

2.1.1. Localización

El Parque Natural del Moncayo es un espacio natural protegido situado al oeste de la provincia de Zaragoza (Aragón, España) lindando con la provincia de Soria (Castilla-León, España) (Fig.1). Se extiende por las comarcas de Aranda, Campo de Borja y Tarazona y el Moncayo, distribuyéndose por los términos municipales de Añón, Calcena, Litago, Lituénigo, Purujosa, San Martín de la Virgen de Moncayo, Talamantes, Tarazona y Trasmoz. Con una extensión de 11,144 ha posee una variación altitudinal importante, entre los 600 msnm del río Huecha y los 2315 msnm del pico San Miguel o Moncayo.

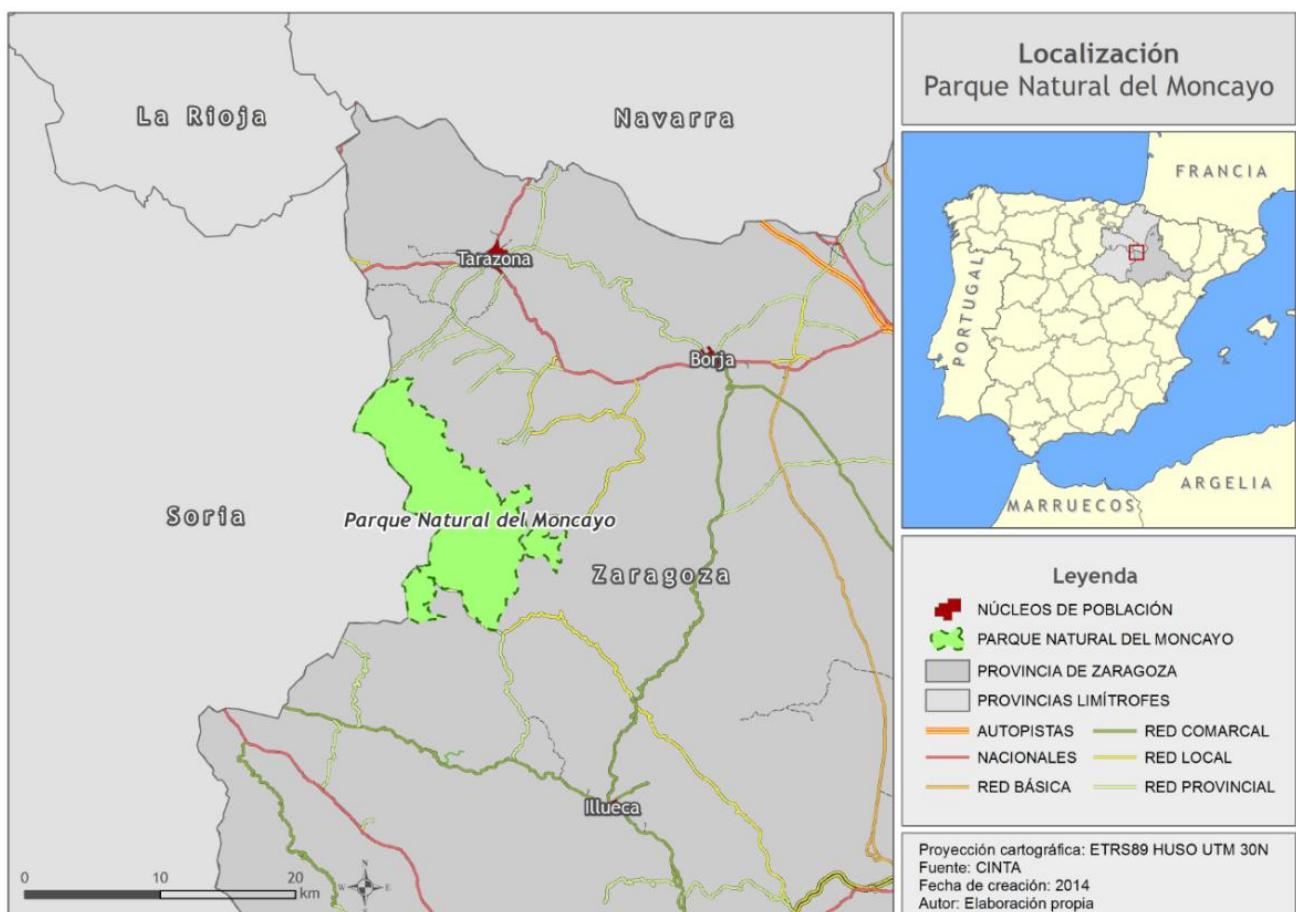


Figura 1. Localización Parque Natural del Moncayo

El área de estudio se localiza en la zona más septentrional del municipio de Calcena, muy próxima (4 km) al núcleo de Talamantes, en la comarca del Aranda, Zaragoza (Fig.2.). Concretamente se sitúa en una cuenca, la del barranco de Valdelinares modelada sobre la ladera oriental de las Peñas de Herrera, relieve estructurales a modo de torreones aislados y escarpados, resultado de la incisión sobre estratos de calizas mesozoicas, que destacan sobre taludes regularizados modelados en las formaciones arcillosas del Rethiense.

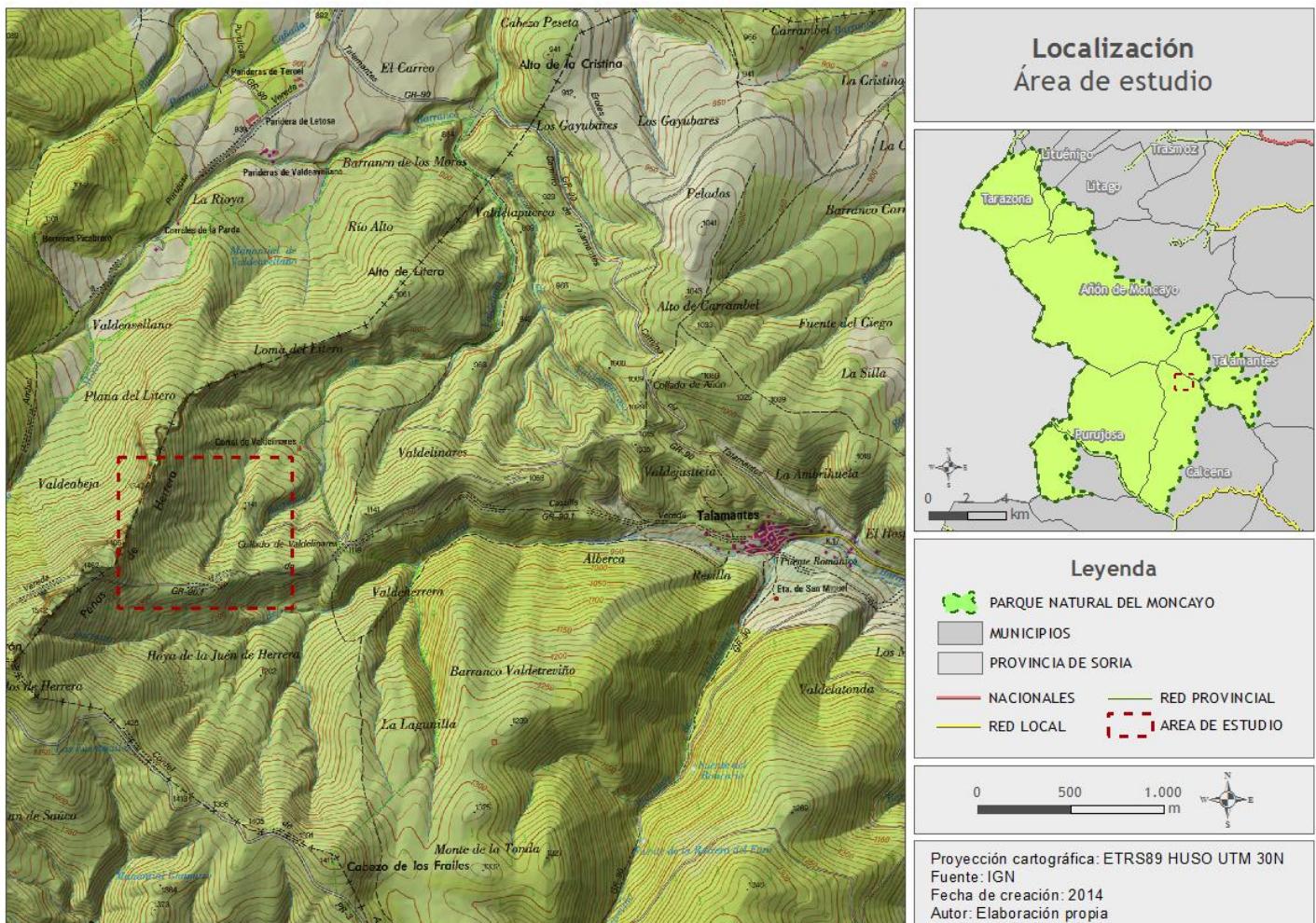


Figura 2. Localización área de estudio

El gradiente altitudinal es intenso entre las cimas de las Peñas más septentrionales, las más bajas, situadas en torno a unos 1400 msnm y el fondo del barranco de Valdelinares, con 1000 msnm, lo que genera fuertes pendientes.



Fotografía 1. Área de estudio.

2.1.2. Características climáticas

El clima de las Peñas de Herrera se caracteriza por una marcada estacionalidad propia del clima mediterráneo, aunque se encuentra matizado por la continentalidad y la altitud. Según la clasificación de Köppen, el clima de la zona se clasificaría como un *Csb-Clima templado de verano suave* (Köppen, 1936)

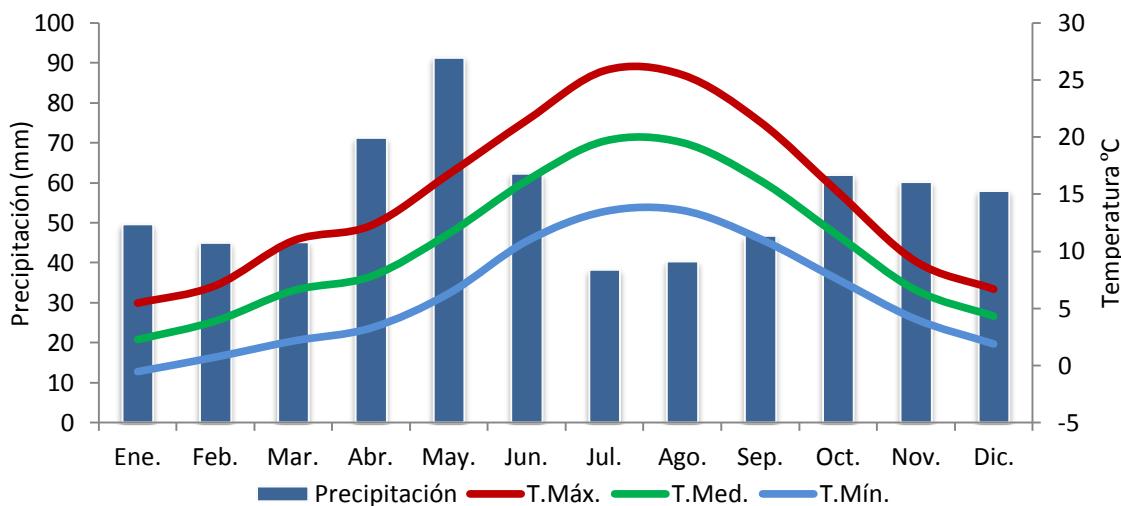


Figura 3. Climograma de Peñas de Herrera. Datos extraídos del Atlas Climático de Aragón, Cuadrat y López, 2007.

Las precipitaciones, con un total anual de 670 mm, se distribuyen de forma más o menos homogénea durante el año, con un pico primaveral acusado, siendo el otoño la segunda estación más lluviosa. Cabe destacar que esta cierta homogeneidad en el reparto mensual tiende a enmascarar la naturaleza de estas precipitaciones, de la que derivará un comportamiento erosivo muy distinto. Durante el semestre frío (noviembre-marzo), las lluvias predominantes son de origen frontal, recogiéndose cantidades moderadas en un periodo prolongado de tiempo y en eventos más numerosos que en el semestre cálido (abril-octubre). Es frecuente, durante el semestre frío, la aparición de la nieve (fotografía 2), lo que también juega un papel importante en los procesos hidrogeomorfológicos como se analizará más adelante.



Fotografía 2. Nieve en las Peñas de Herrera (16 de noviembre de 2013).

Por otra parte, durante el semestre cálido (abril-octubre), el origen de las precipitaciones tiende a ser convectivo, lo que concentra las cantidades recogidas en períodos de tiempo menores y en eventos menos numerosos. Estos eventos extremos del semestre cálido son responsables de los procesos morfodinámicos más significativos (Thornes, 1976; Gallart, 1995, González-Hidalgo, J.C. *et al.*, 2007). En el periodo que ha durado el estudio se ha podido comprobar la intensidad de las precipitaciones convectivas en esta zona, como reflejan las figuras siguientes:

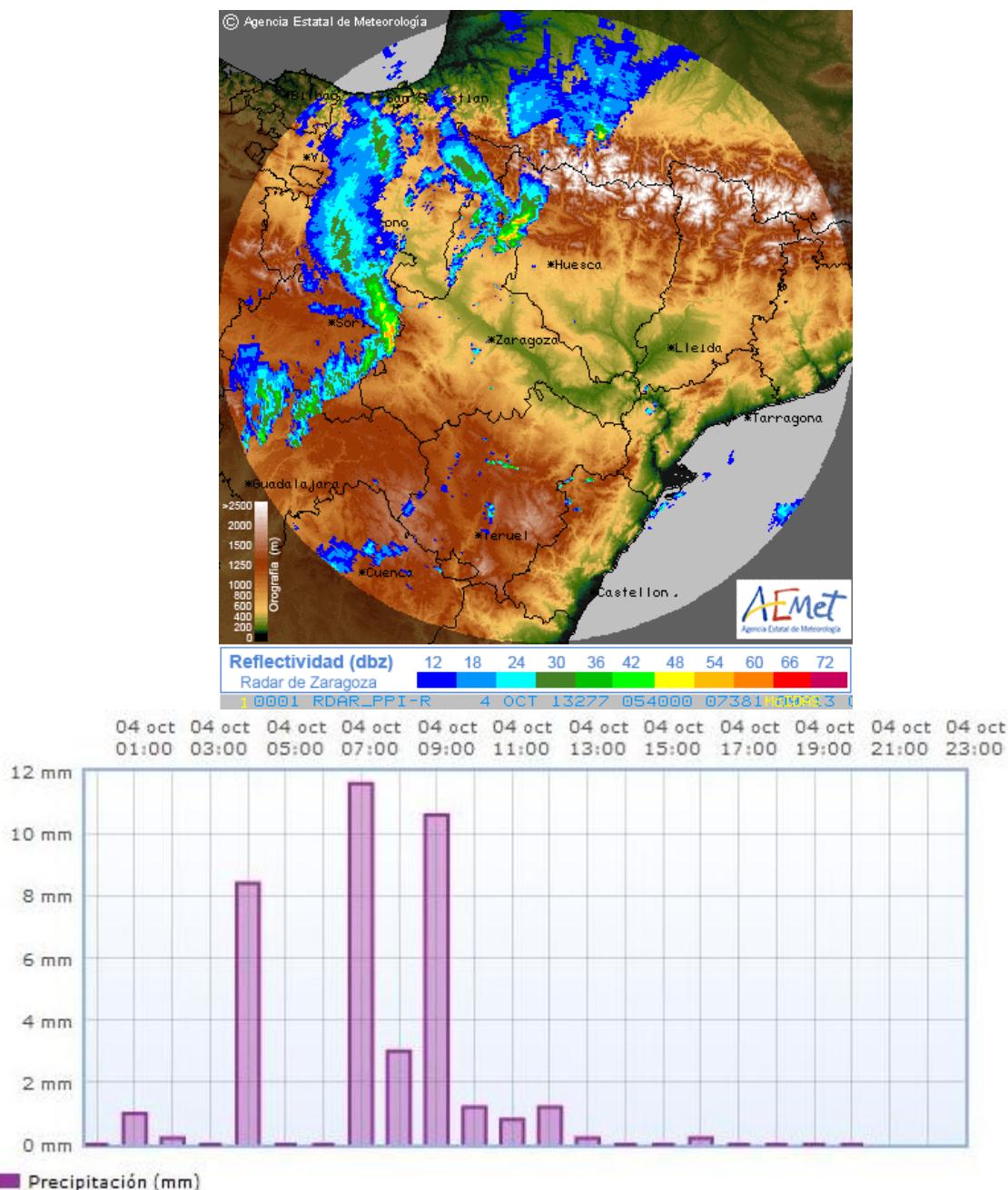


Figura 4. Captura del radar de la AEMET y de la estación de Tarazona (Zaragoza) el 4 de octubre de 2013. Fuente: AEMET.

Como contrapunto a este relativo homogéneo reparto de las precipitaciones, la variabilidad interanual es acusada, siendo frecuentes años húmedos que superan ampliamente la media de precipitación anual, sucedidos por períodos secos. Tampoco es desdeñable la variabilidad intranual, característica del clima mediterráneo peninsular, en la que las sequías son algo característico y que tienen incidencia, entre otras cosas, en la probabilidad de ignición y el consiguiente aumento de la posterior actividad erosiva.

Las temperaturas varían notablemente de forma estacional. La zona de estudio presenta inviernos fríos con medias inferiores a los 5°C durante los meses de invierno. Este comportamiento térmico del invierno condiciona la puesta en marcha de procesos como la crioturbación o la frecuencia de precipitación en forma de nieve.

2.1.3. El relieve, formas y procesos.

El área de estudio se encuentra en la ladera suroriental de las Peñas de Herrera, grandes “castillos” de caliza jurásica formando parte de un anticlinal que asciende desde Talamantes que, alcanzando su techo en las cimas de las Peñas, desciende hasta Calcena. Lo abrupto de los escarpes de estas grandes moles calizas queda patente atendiendo al mapa geomorfológico presentado a continuación.

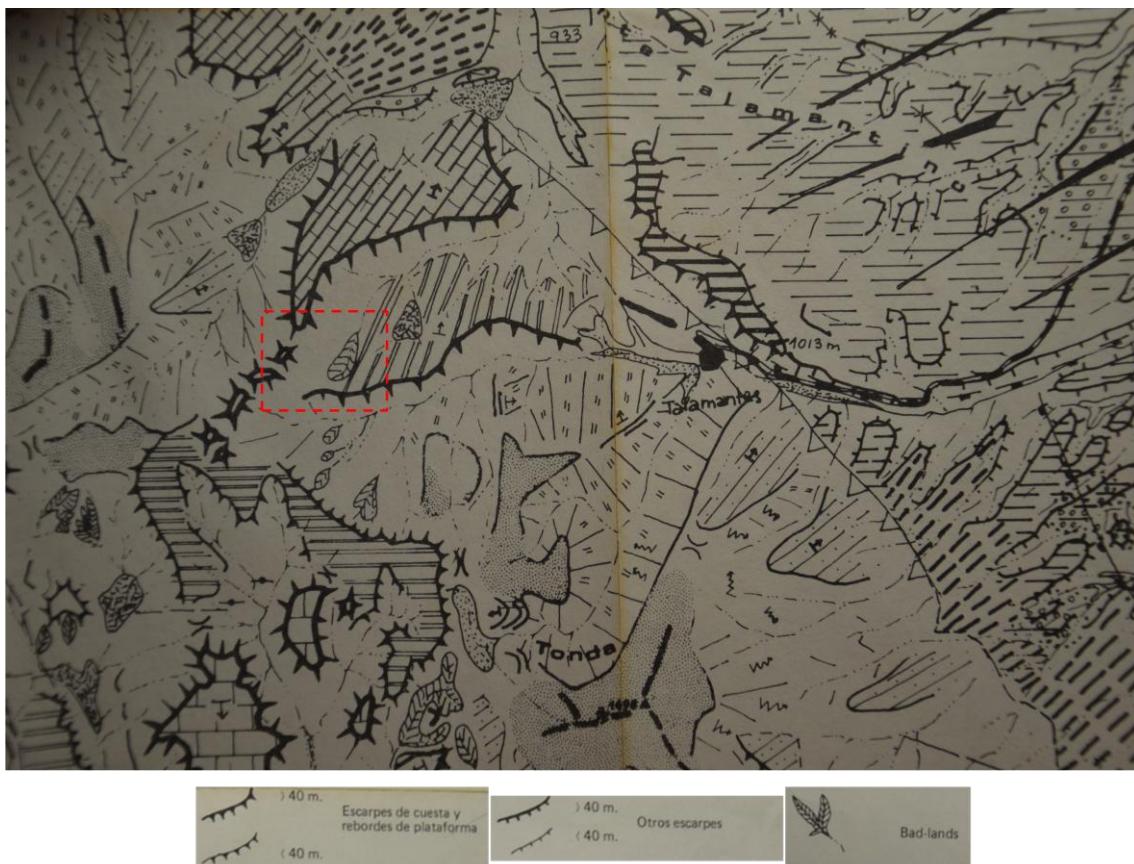


Figura 5. Recorte del mapa geomorfológico (Pellicer, 1984). El recuadro rojo marca el área de estudio.

Las Peñas de Herrera se alzan entre el horst del Moncayo y el domo de la Tonda, formando un anticlinal disimétrico caracterizado por un conjunto de fallas en el flanco norte y buzamiento tendido en el flanco sur.

Las laderas se modelan sobre las arcillas del Rethiense, encontrándose en su mayor parte regularizadas desde etapas periglaciares más frías, si bien en la actualidad dichas regularizaciones presentan procesos de acarcavamiento, en relación con un clima más seco y cálido, como se muestra en la siguiente fotografía (fotografía 3).

Estas cárcavas presentan una actividad importante, dada la deleznabilidad del sustrato y la escasa cubierta vegetal, así como el escaso desarrollo edáfico. Por otro lado, las tormentas del semestre cálido alcanzan una torrencialidad responsable, en último caso, de la incisión de la escorrentía bajo un modelo de *gullies*.

Tanto en el caso de las Peñas como en los retazos de aplanamientos erosivos sobre las calizas jurásicas, se observan algunos indicios de karstificación, en forma de lapiaces evolucionados y cuevas.



Fotografía 3. Cárcava en las proximidades de las Peñas de Herrera.

Por otra parte, en condiciones de alteración ambiental, cuando la cubierta vegetal desciende y el hombre introduce un nuevo escenario topográfico algunos procesos de ladera ligados a pendientes elevadas, generación de concavidades antrópicas etc., pueden dar lugar a la puesta en marcha de mecanismos relacionados con la humectación del sustrato, tales como *mudflow*, *debrisflow*...

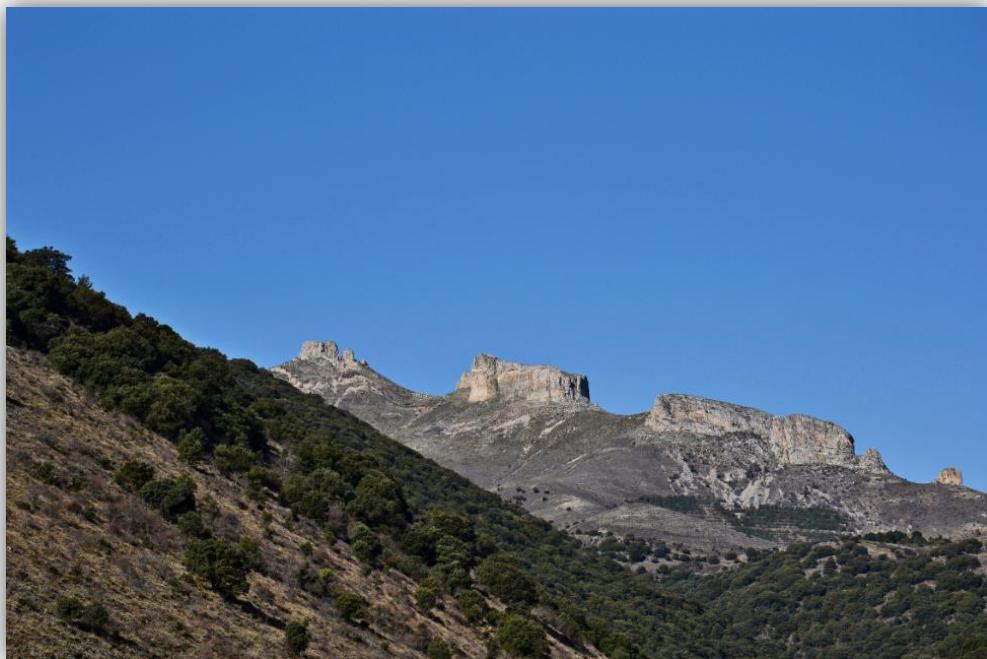
Así mismo, la antropización de una ladera regularizada, dibujando escalones artificiales (trochas, bancales para repoblación), puede dar lugar a procesos tales como pequeños desprendimientos, movimientos en masa, descalzamientos... activados por rupturas morfológicas en la búsqueda de un nuevo equilibrio morfotopográfico.

2.1.4. Vegetación y usos de suelo.

La vegetación potencial de esta zona se encuentra a caballo entre el piso mesomediterráneo y el supramediterráneo, matizados especialmente por la altitud y la orientación (1100-1200 msnm en ladera SE de las Peñas de Herrera). El carrascal (*Quercus ilex* ssp. *rotundifolia*), como formación climática del piso mesomediterráneo, aparecería en las zonas más bajas y más expuestas al sol, encontrando melojares y pino silvestre en las zonas más altas y más resguardadas de la radiación.

La encina o carrasca, que da carácter a la formación mesomediterránea, es la especie dominante en nuestra área de estudio, con un porte en origen arbóreo pero

reducido a arbustivo por los numerosos cortes, con objeto de emplear la madera como combustible y facilitar el pastoreo de las zonas no cultivadas. Sin embargo, el sobrepastoreo y la acción recurrente del fuego redujeron la cobertura vegetal de las laderas de las Peñas de Herrera a un porte herbáceo y de matorral, muy susceptible a la erosión hídrica. Con objeto de frenar los procesos erosivos y recuperar el paisaje forestal se realizó una repoblación de pino rodeno, de la que ya sólo quedan las terrazas tras el paso del fuego en agosto de 2012.



Fotografía 4. Estado anterior al fuego de las Peñas de Herrera.



Fotografía 5. Detalle de la repoblación de pinos en Peñas de Herrera.

2.2. El incendio de Calcena en agosto de 2012

El 27 de agosto de 2012 se produjo un incendio forestal en el término municipal de Calcena (provincia de Zaragoza), cuya causa apunta hacia la mano del hombre, aunque todavía no se conoce si por negligencia o intencionalidad. Hasta el 6 de septiembre, momento de su extinción definitiva, calcinó 4.674 has de territorio perteneciente a los municipios de Ambel, Añón de Moncayo, Calcena, Tabuenca, Talamantes y Trasobares, todos ellos en la provincia de Zaragoza.

El fuego afectó a bienes forestales y no forestales, llegando incluso a obligar al desalojo de los vecinos de Talamantes, cortar las comunicaciones por carretera entre algunos núcleos e interrumpir el suministro eléctrico.

La compleja orografía, la inflamabilidad de la vegetación y las adversas condiciones meteorológicas reinantes en los momentos de inicio y propagación del fuego propiciaron la virulencia del mismo. De las 4.674 ha calcinadas 4281 se corresponden con superficie forestal, de las cuales 1583 eran superficie arbolada y 2697 superficie no arbolada. También se quemaron casi 393 ha de superficie agrícola y otros usos del suelo.

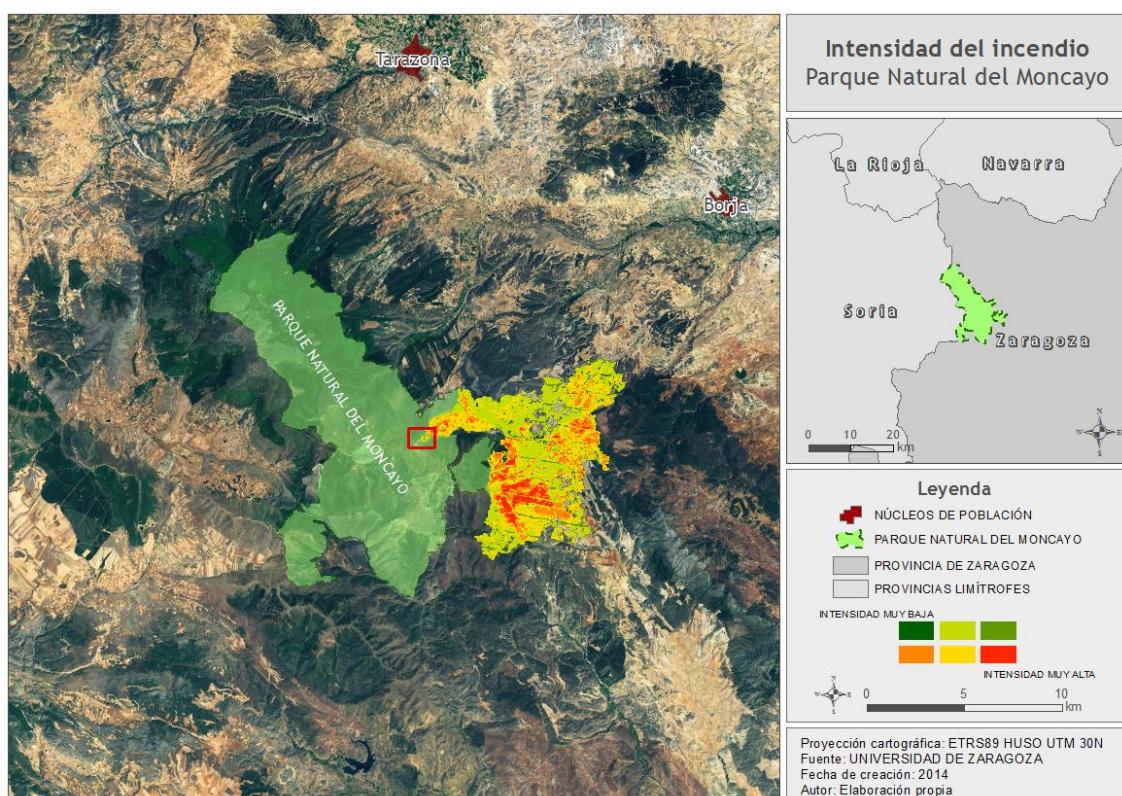


Figura 6. Perímetro afectado e intensidad del fuego.

Según se recoge en el informe técnico del incendio forestal de Calcena, elaborado por el Grupo de Apoyo al Director de Extinción (GADEX) bajo la Dirección General de Gestión Forestal, la vegetación quemada en el incendio responde a varios de los 13 modelos de combustibles identificados por Rothermel (1972) y Albini (1976) y adaptados posteriormente por el ICONA al los ecosistemas forestales peninsulares. Los modelos 5, 6 y 9 de la siguiente tabla se corresponderían al combustible presente en la zona de estudio.

Modelo 1	Pastizal adehesado de menos de 0,50 cm. de altura con presencia de matorral disperso de romero (<i>Rosmarinus officinalis</i>), aliaga (<i>Genista scorpius</i>), y tomillo (<i>Thymus vulgaris</i>) e incluso de porte arbóreo como encinas (<i>Quercus ilex</i> sps <i>rotundifolia</i>). También campos de cultivo abandonados y rastrojos.
Modelo 2	Pastizal de hasta 0,50 cm. de altura con mayor presencia de matorral disperso de romero (<i>Rosmarinus officinalis</i>), aliaga (<i>Genista scorpius</i>), tomillo (<i>Thymus vulgaris</i>), enebro (<i>Juniperus oxycedrus</i>), coscoja (<i>Quercus coccifera</i>), etc. que en el modelo 1 se localiza en aquellas zonas del incendio en las que el modelo 1 ha incrementado carga de combustible con el paso de los años.
Modelo 3	Encinar de <i>Quercus ilex rotundifolia</i> con romero (<i>Rosmarinus officinalis</i>), aliaga (<i>Genista scorpius</i>), tomillo (<i>Thymus vulgaris</i>) y coscoja (<i>Quercus coccifera</i>)
Modelo 4	Fondos de barranco y otros lugares con gran acumulación de carga de combustible: Rosal silvestre (<i>Rosa canina</i>), guillomo (<i>Amelanchier ovalis</i>), romero (<i>Rosmarinus officinalis</i>), aliaga (<i>Genista scorpius</i>), tomillo (<i>Thymus vulgaris</i>), coscoja (<i>Quercus coccifera</i>), etc.
Modelo 5	Matorral de 0,3 a 1 m. de altura compuesto fundamentalmente por (<i>Rosmarinus officinalis</i>), aliaga (<i>Genista scorpius</i>), tomillo (<i>Thymus vulgaris</i>) con presencia puntual de rosáceas espinosas, etc.
Modelo 6	Fundamentalmente compuesto por un mosaico irregular de <i>Quercus coccifera</i> y romeral mixto caracterizado por una continuidad importante del combustible.
Modelo 9	Hojarasca en manto denso bajo pinar natural y de repoblación y regeneración natural de pinar en estado latizal-fustal o fustal (<i>Pinus nigra</i> , y <i>Pinus sylvestris</i>)

Figura 7. Tabla de combustibles en la zona de estudio. Fuente: GADEX (2013).

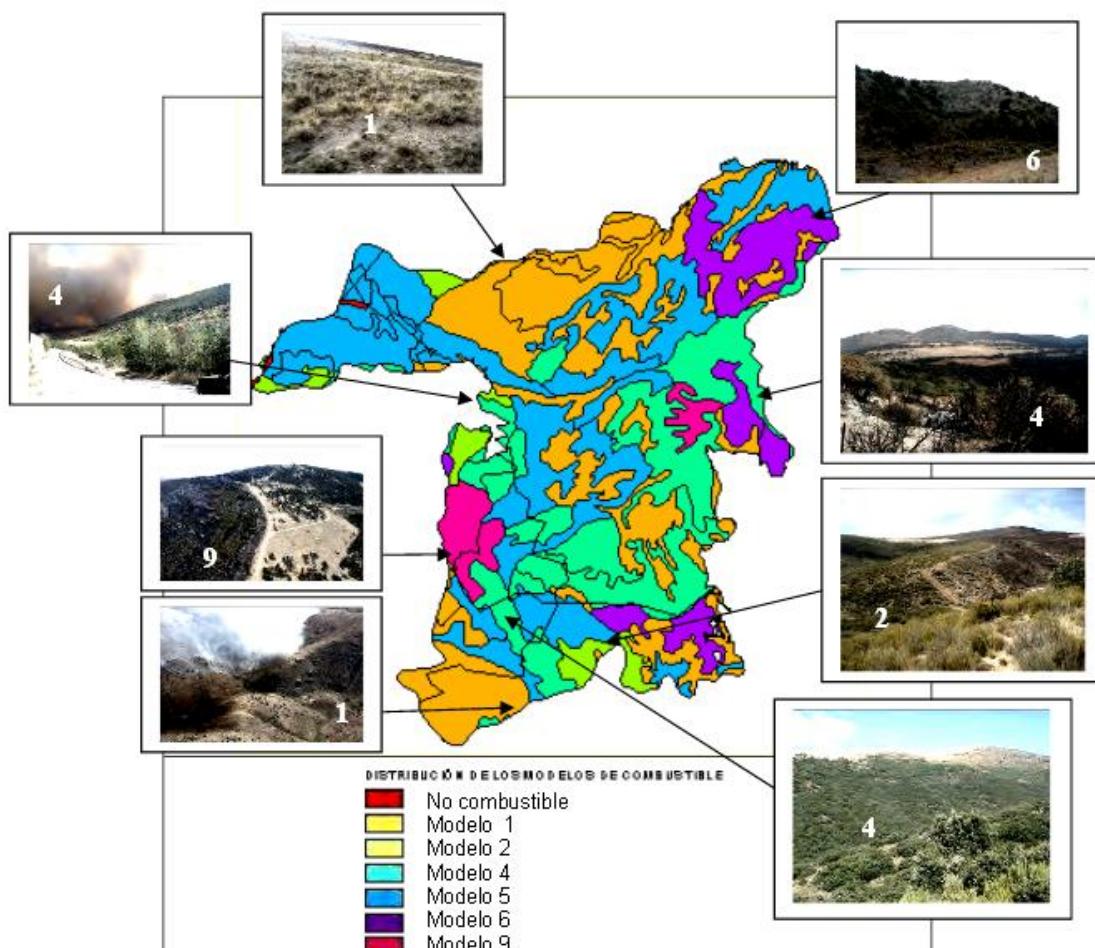


Figura 8. Mapa de combustibles en la zona quemada en el incendio.
Fuente: GADEX (2013).

2.3. Caracterización de las áreas test

En este apartado se pretende caracterizar de forma específica las tres áreas experimentales dentro de la zona de estudio, atendiendo especialmente a su posición dentro del conjunto de la zona y a su pendiente. Estas tres áreas han sido seleccionadas atendiendo a su representatividad de los procesos erosivos postincendio.

2.3.1. Trochas (1 y 2)

Se han planteado dos áreas experimentales en trochas abiertas para el paso de la maquinaria necesaria para la extracción de la madera calcinada en el incendio.

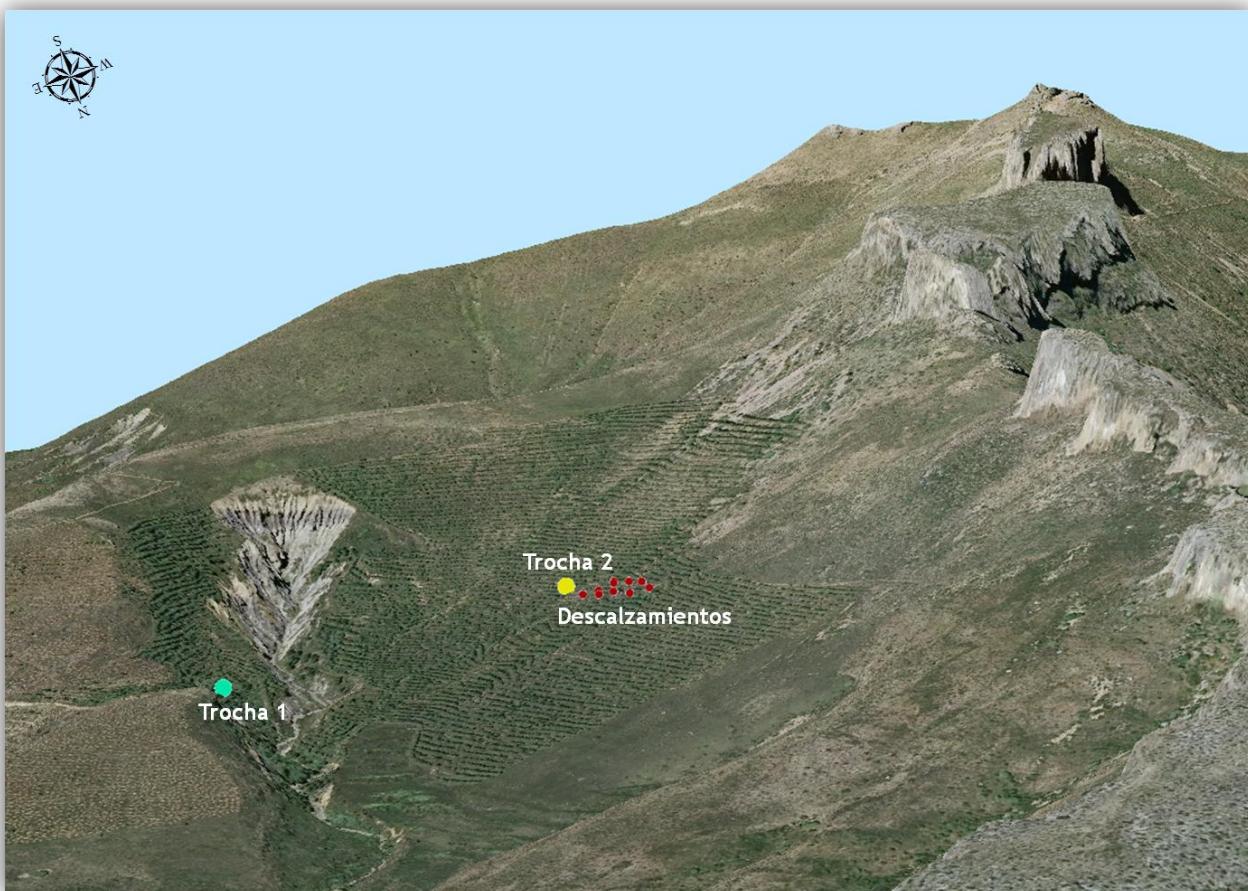
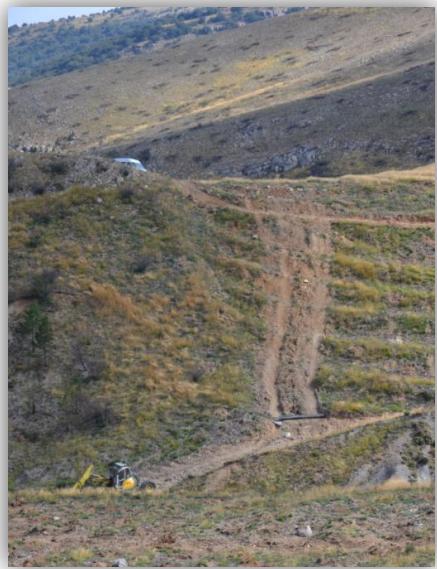


Figura 9. Localización de las áreas experimentales

La trocha 1, situada en la ladera orientada al noroeste de la cabecera del barranco de Valdelinares y opuesta a las Peñas de Herrera, presenta una pendiente media de aproximadamente 40° , aunque ésta resulta muy variable en los 40 m de longitud que alcanza, ya que la pendiente se encuentra cortada por los escalones marcados por las terrazas, dando lugar a una trocha abancalada.



Fotografía 6. Visión lateral de la trocha 1.



Fotografía 7. Visión frontal de la trocha 1.

Esta trocha está afectada por dos canales erosivos activos, quedando entre ambos material removido sin aparente flujo hídrico rápido. Como se muestra en la siguiente fotografía, las dos incisiones se corresponden con las ruedas de la maquinaria empleada.



Fotografía 8. Detalle trocha 1.

La trocha 2, por su parte, se sitúa en la ladera occidental del barranco, la que desciende desde las Peñas de Herrera, a una altitud de 1180 msnm. Tiene una pendiente más moderada que la anterior, en torno a 25°, y está afectada igualmente por los escalones del aterrazado.



Fotografía 9. Visión general de la trocha 2



Fotografía 10. Detalle trocha 2.

2.3.2. Descalzamientos

El área test que incluye los diez descalzamientos seleccionados en la ladera de las Peñas de Herrera está situada a una altitud similar a la trocha 2. Su elección estriba en albergar buenos ejemplos de procesos erosivos que han afectado al aterrazado de la repoblación de pinar con posterioridad al incendio de 2012.

3. Metodología

Este apartado describe los aspectos básicos de la metodología empleada en este estudio, explicando en primer lugar las variables y la instrumentación utilizada y en un segundo subapartado los problemas metodológicos afrontados durante el trabajo de campo.

3.1. Cronograma del proyecto y descripción de trabajo de campo.

Se planteó desde un inicio la visita a la zona de estudio de forma bimensual para tomar los datos de campo correspondientes a los procesos de erosión. A continuación se recoge las fechas de trabajo de campo con la actividad realizada.

FECHA		TAREAS REALIZADAS	OBSERVACIONES
2012	12 de diciembre	Visita a la primera zona de estudio (Collado de la Tonda)	Por su situación en vanguardia y fuerte viento
2013	21 de marzo	Visita a la segunda zona de estudio (Laderas de la Tonda)	Se delimitan parcelas de estudio y se deciden los transectos de vegetación
	4 de abril	Visita a la segunda zona de estudio	
	10 de mayo	Visita a la segunda zona de estudio	
	23 de mayo	Primeros experimentos de infiltración	
	7 de junio	Experimentos de infiltración	
2013	13 de septiembre	Visita a la tercera zona (Peñas de Herrera)	Cambio definitivo de zona de estudio
	24 de septiembre	Instalación de trampas de erosión e identificación de descalzamientos	Geotextil en trocha 2 y canaleta en trocha 1
	8 de octubre	Recogida de sedimentos, montaje de nuevo dispositivo experimental y medición de los descalzamientos	Desperfectos por tormentas, montaje cajas Gerlach y canalón trocha 2
	24 de octubre	Primera recogida de datos de las bocas de rana	
	7 de noviembre	Recogida de datos	
	27 de noviembre	Recogida de datos y reparación de desperfectos	Hielo. Desperfectos.
2014	8 de enero	Recogida de datos y reparación de desperfectos	
	19 de febrero	Recogida de datos y reparación de desperfectos	
	12 de marzo	Recogida de datos, reparación de desperfectos y medición y caracterización de descalzamientos	
	9 de abril	Recogida de datos, reparación de desperfectos y medición y caracterización de descalzamientos	

Figura 10. Cronograma del proyecto

3.2. Variables e instrumentación de la metodología empleada

El trabajo desarrollado se compone de tres grupos de medición y de actividades experimentales asociados a los procesos hidrogeomorfológicos en trocha y los procesos erosivos en descalzamientos de aterrazamientos.

3.2.1. Precipitación

La precipitación constituye la principal fuente de entrada de agua a las áreas de trabajo y por ello resulta fundamental su medición. Las características del estudio realizado, en especial sus limitaciones, y la existencia de varias estaciones meteorológicas completas próximas, correspondientes a la red de seguimiento ecológico del Parque Natural del Moncayo y gestionadas por el grupo *Clima, Agua y Cambio Global y Sistemas Naturales* del Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio de la Universidad de Zaragoza, descartó la colocación de un pluviógrafo en la zona de estudio, aunque dada la variabilidad espacial de las precipitaciones, específicamente las convectivas del semestre cálido, habría sido óptima su instalación.

De este modo, se emplea para este estudio la estación meteorológica instalada en el alto de Majada Baja que dista 7,7 km de la zona de trabajo.

3.2.2. Análisis de la erosión hídrica

A continuación se explican los distintos métodos de medición de la erosión en las trochas, que se han empleado durante el trabajo de campo. El cambio de los mismos obedece a los distintos problemas detectados que se explican en apartados posteriores.

3.2.2.1. Primer dispositivo experimental: trampa de geotextil

La primera opción planteada con objeto de medir la erosión hídrica en la trocha 2 fue la colocación de un tejido geotextil que atrapara los sedimentos arrastrados por el flujo superficial mientras filtraba el agua; de esta forma se pretendía medir el sedimento de calibre suficiente para ser atrapado por el tejido.



Fotografía 11. Geotextil en la trocha 2.

Este dispositivo se retiro poco después de su instalación por motivos que se exponen en el apartado 3.3.

3.2.2.2. Segundo dispositivo experimental: canaletas colectoras

Esta opción trataba de dar solución a los problemas detectados en el dispositivo anterior y adaptarse a la morfología de la trocha 1.

De este modo se instalaron dos canaletas en ambas trochas. En la trocha 1 se contó con la ayuda de la cuadrilla de trabajo del Parque Natural del Moncayo para su instalación.



Fotografía 12. Canaleta instalada en la trocha 1.

El motivo aludido de su colocación de forma vertical por los operarios fue la dificultad de enterrarla por el trabajo añadido que acarreaba. Como se muestra en la imagen, la canaleta instalada no ocupaba la totalidad de la trocha, por lo que se intentó dirigir el flujo de la escorrentía hacia un punto de drenaje que desembocaba en un bidón totalizador.

Este dispositivo experimental fue también descartado rápidamente para la trocha 1, por los problemas que se derivaban de él, siendo el fundamental la escorrentía superficial que se introducía bajo la canaleta.

En la trocha 2, con posterioridad a la colocación del geotextil y su deficiente resultado, se instaló una canaleta de 4 m de largo enterrada en el suelo, de manera que se evitase su movimiento, cubriendo la misma con un tablón de madera para impedir la pérdida de sedimento por la acción del viento y la entrada directa de precipitación libre. Se le proporcionó, además, cierta inclinación y un orificio para facilitar la evacuación del agua acumulada.



Fotografía 13. Detalle de canaleta en la trocha 1.



Fotografía 14. Canaleta instalada en la trocha 2.

3.2.2.3. Tercer dispositivo experimental: bocas de rana.

Después de abandonar la utilización de la canaleta en la trocha 1 por los problemas surgidos se planteó la instalación de dos bocas de rana, con sus respectivos bidones totalizadores en los dos canales erosivos activos de la trocha 1. Se opta por esta opción por la observación de la falta de flujo hídrico superficial en el *intergully* de la trocha y por la mayor facilidad para recoger el agua circulante por los dos canales activos, posibilitando el análisis posterior de su concentración.



Fotografía 15. Bocas de rana instaladas en la trocha 1.

3.2.3. Análisis y caracterización de los procesos erosivos de descalzamiento en las terrazas.

Con objeto de la caracterización y la cuantificación del sedimento movilizado en los 10 descalzamientos seleccionados se propuso en un primer momento la toma de medidas de cada descalzamiento y de una fotografía cenital para evaluar la evolución temporal de los mismos.



Fotografía 16. Toma de fotografía cenital de un descalzamiento.



Fotografía 17. Toma de medidas de un descalzamiento.

Ante la imposibilidad de la toma de fotografías cenitales completas del descalzamiento debido a sus dimensiones se decide realizar únicamente la caracterización microgeomorfológica de cinco de los descalzamientos, además de la toma de sus medidas. Se realiza también una propuesta de cubicación del material movilizado en función de sus áreas de acumulación o de la “cicatriz” en el área fuente de ese sedimento.

3.3. Problemas metodológicos en el trabajo experimental

En el desarrollo del estudio han surgido una serie de contratiempos relacionados con el trabajo experimental, en su mayor parte asociados a las limitaciones que un trabajo fin de grado conlleva unidos a la complejidad del trabajo de campo referido a los procesos erosivos en espacios de montaña. Estos problemas, que ahora se relatan, han imposibilitado la toma de muestras de forma continua y la representatividad de las mismas.

3.3.1. Problemas metodológicos en la trocha 1.

Se explica con detalle y de forma cronológica la serie de problemas metodológicos que afectaron al dispositivo experimental de la trocha 1.

3.3.1.1. Canaleta

Este dispositivo (ver fotografía 10) rápidamente se mostró como inadecuado por su incapacidad para recoger el flujo y el sedimento movilizado en la trocha.

La incapacidad derivó especialmente del contacto entre la canaleta instalada por la cuadrilla de trabajo del Moncayo y el sustrato, creándose con las primeras lluvias una grieta de aproximadamente 1 cm por donde se introducía la escorrentía.



Fotografía 18. Grieta de contacto en la canaleta de la trocha 1.

Por otra parte, la canaleta no abarcaba completamente la anchura de la trocha, por lo que se hizo necesario crear un cierre con láminas metálicas para conducir el flujo hacia un punto de desagüe, donde debía ser recogido por un bidón totalizador a través de una boca de rana y posibilitar el análisis de la concentración del sedimento en solución.

El primer evento demostró que la trocha movilizaba más flujo del que se podía recoger en un solo bidón totalizador, desbordando su capacidad y haciendo imposible la medición de la escorrentía generada. Además, la estabilidad de la boca de rana instalada se vio comprometida con el primer proceso de humectación del suelo, añadiendo otro motivo para desechar este dispositivo experimental.



Fotografía 19. Canaleta trocha 1 y boca de rana.

3.3.1.2. Bocas de rana

El segundo intento experimental en la trocha 1 también encontró graves contratiempos, que impidieron la obtención de datos que caracterizaran y cuantificaran la acción hidrogeomorfológica en la trocha.



Fotografía 20. Respuesta de la boca de rana al primer evento de precipitación.

La primera respuesta de las bocas de rana instaladas en cada canal activo de la trocha 1 ante el primer evento de precipitación fue positiva. El contacto con el sustrato se mantuvo estable, la caja no varió su posición, el sedimento sólido quedó sobre ella y el flujo alcanzó el bidón totalizador.

Después de la primera toma de datos parecía que se había acertado con el dispositivo, si bien es cierto que la cantidad de precipitación recogida no fue elevada y la humedad del sustrato no se acercaba todavía a la plasticidad que posteriormente experimentaría.

Los problemas comenzaron con la segunda toma de datos (7/11/2013). La capacidad de movilización del flujo y sedimento de la trocha sobrepasó las previsiones, llegando a desbordar una de las bocas y haciendo que parte del flujo se perdiera por encima del orificio de desagüe.



Fotografía 21. Obstrucción de la boca de rana izquierda (7/11/2013).

Pese a estos primeros problemas, la estabilidad de las cajas y el buen funcionamiento en el caso de la boca de rana derecha hicieron proseguir con este dispositivo. Sin embargo, la siguiente visita a la zona de estudio demostró la dificultad de la medición de la escorrentía durante el incierto (en este caso todavía otoño) en zonas de montaña.



Fotografía 22. Hielo en la boca de rana.

El hielo imposibilitó la toma de muestras en tanto que el flujo generado se congeló sobre las cajas y en el interior de los bidones totalizadores. Además, el hielo ilustra de manera muy visual el desbordamiento de las cajas y la insuficiente capacidad de los bidones totalizadores, llegando incluso a romperlos por el aumento de volumen al congelarse.



Fotografía 23. Efecto del viento en la boca de rana.

Otro de los meteoros invernales muy presentes en la zona de estudio, el viento, también demostró su capacidad para complicar la toma de datos. La fotografía anterior refleja cómo se encontró la trampa de sedimento en la visita del 8 de enero.

Además del viento, ese mismo día se identificó que la trocha tenía un comportamiento geomorfológico estacional. Lo que durante el semestre cálido, mientras el sustrato permanecía no saturado, funcionaba con un modelo hortoniano de escorrentía básicamente superficial, durante el semestre frío, con el suelo húmedo y plástico, funcionó como un *mudflow*. Este movimiento de tierra tuvo un

gran impacto sobre la estabilidad de las bocas de rana, ya que estas se desplazaron a la vez que lo hacía el sustrato.



Fotografía 24. Boca de rana desplazada.



Fotografía 25. Detalle de boca de rana desplazada.



Fotografía 26. Grieta en el contacto boca de rana-sustrato.

En este momento ya era patente que el dispositivo, al menos durante los meses invernales, no era una opción adecuada. Siendo ya enero, la posibilidad de probar otro dispositivo carecía de sentido, pues no se iban a obtener, en caso de funcionar, suficientes resultados. Se optó por tratar de reparar los desperfectos y confiar en la desecación rápida del sustrato. Este secado, teniendo en cuenta que se trata de una zona de montaña y con una orientación norte, no es un proceso rápido.

Como se observa en las siguientes fotografías, el estado de las trampas en febrero no presentaba mejor aspecto, encontrándose, además, los bidones totalizadores rebosados por el rezumado continuo del sustrato saturado.



Fotografía 27. Boca de rana izquierda en febrero de 2014.



Fotografía 28. Sedimento atrapado en la boca de rana (febrero 2014).



Fotografía 29. Boca de rana derecha en febrero de 2014.

3.3.2. Problemas metodológicos en la trocha 2.

Bajo este epígrafe se explican con detalle y siguiendo un criterio cronológico la serie de problemas metodológicos que afectaron al dispositivo experimental de la trocha 2.

Un aspecto común a los dos dispositivos instalados en la trocha 2 es el escaso recorrido longitudinal efectivo de la trocha, pues esta no funciona como un único canal de desagüe (al menos con precipitaciones del semestre frío), sino de forma individual, es decir, cada bancal recibe el flujo y sedimento del bancal inmediatamente superior, pero sin llegar a conectar con el siguiente. Esto deriva en la escasa llegada de material y flujo a las trampas instaladas ya que el área fuente es muy reducida (entre 6-8 m²) y la pendiente moderada en cada uno de los bancales.

En sentido estricto hay una actividad de procesos geomorfológicos ligados a la salpicadura, al *frost creep*, a la humectación del sustrato removido..., pero el transporte hídrico superficial no existe fuera de los surcos.

3.3.2.1. Geotextil

La trampa de geotextil, instalada en primer lugar, demuestra también lo que es una constante en la experimentación con trampas de erosión en el campo, los problemas entre el contacto de la trampa y el sustrato.

En este caso, se trató de dar solidez al geotextil con una barra metálica incrustada en el sustrato. Sin embargo, el contacto no se pudo ajustar con la precisión necesaria y el flujo no conseguía, en algunos tramos, llegar al geotextil.



Fotografía 30. Trampa de geotextil en la trocha 2.



Fotografía 31. Contacto geotextil con sustrato en la trocha 2.

Otro de los problemas detectados para este dispositivo experimental es su baja capacidad de resistencia ante las inclemencias meteorológicas de la zona, como se pudo comprobar en un trabajo paralelo de erosión en espacio forestal, donde el granizo y el fuerte viento del 4 de octubre de 2013 destrozaron literalmente las trampas.

Por otra parte, este dispositivo se mostró ineficaz a la hora de recoger el sedimento atrapado por la imposibilidad de colectar el material de calibre más fino, ya que quedaba incrustado entre el tejido.



Fotografía 32. Geotextil después de la tormenta del 4 de octubre.



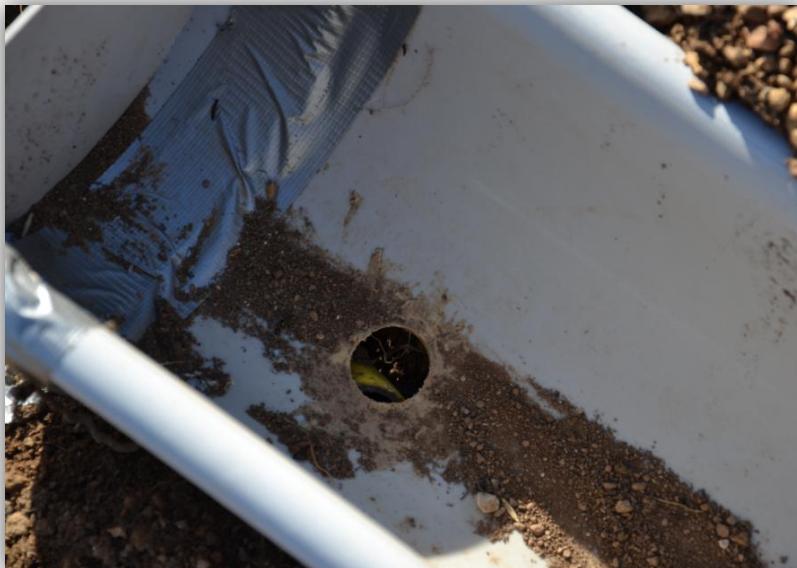
Fotografía 33. Detalle del sedimento atrapado sobre el geotextil.

3.3.2.2. Canaleta

El segundo dispositivo probado en la trocha 2 fue una canaleta de 4m de largo instalada en noviembre. Este mecanismo mejoró notablemente la toma de datos respecto al geotextil, la hizo más sencilla y precisa.

Sin embargo, tampoco estaba exento de problemas. De nuevo el contacto entre la trampa y el sustrato fue un quebradero de cabeza, apareciendo grietas en numerosas ocasiones.

Además, tras comprobar que se acumulaba el agua en el interior de la canaleta, hubo que realizar un orificio para facilitar su salida, dotando a la misma de una cierta inclinación para conducir el flujo hacia el punto de desagüe, desde donde era dirigido hasta un bidón totalizador. La unión de la manguera y el orificio, pese a intentar encajarlo perfectamente y pegarla con adhesivo, ocasionó también problemas, encontrándose desconectada en varias ocasiones.



Fotografía 34. Detalle de la desconexión manguera-orificio.



Fotografía 35. Canaleta instalada en la trocha 2.

3.3.3. Problemas metodológicos en los descalzamientos

La medición y comparación de la evolución de los descalzamientos a lo largo del periodo de estudio tuvo dos problemas principales. El primero de ellos está asociado al momento de iniciar el trabajo, que se demoró por distintas circunstancias, ajenas a este estudio, más de un año tras el incendio. Ese periodo, considerado por muchos autores como el de mayor actividad erosiva (Robichaud y Waldrop, 1994; DeBano, 2000 y Shakesby, 2011), se relaciona con la activación de los descalzamientos. Cuando se inició el trabajo, éstos ya estaban totalmente desarrollados y su dinamismo se había visto frenado, por lo que apreciar diferencias reseñables con una medición tomada en noviembre y otra en abril se hacía imposible.

Pese a ello, se intentó la toma fotografías cenitales para su posterior comparación temporal. Éste método fue imposible de aplicar debido a las dimensiones de los descalzamientos, que impedían abarcar en una sola toma la totalidad del descalzamiento.

4. Resultados y valoración.

En este apartado se presentan los resultados del estudio y la valoración general de los mismos, atendiendo a los problemas metodológicos ya citados que han impedido la consecución de datos para el análisis.

4.1. Pluviometría

Con los problemas expuestos anteriormente carece de sentido presentar un comportamiento pluviométrico específico de la estación instalada en Majada Baja en

tanto que no se han obtenido datos de erosión con los cuales relacionarlos. Por otra parte, en estudios de otras características (no orientados únicamente a la elaboración de un trabajo fin de grado), sería necesaria la instalación de un pluviógrafo en el área de estudio, pues las estaciones meteorológicas con las que cuenta el Parque Natural del Moncayo se encuentran alejadas de la zona de trabajo, siendo además la precipitación una variable meteorológica que puede presentar grandes diferencias en poco espacio, especialmente en precipitaciones convectivas.

Tras la descripción climática del área de trabajo, llevada a cabo en el apartado de 2.1.2., se ha realizado un seguimiento de los datos de precipitación mensual, extraídos de AEMET, con el objetivo de caracterizar el periodo de estudio, bajo el punto de vista pluviométrico.

Si bien hay que tener en cuenta que tras el fuego se han producido alteraciones edáficas por la apertura de trochas, favoreciendo en algunos casos la humectación del sustrato por su remoción superficial, las cantidades y el reparto de las lluvias de octubre de 2013 a marzo de 2014 constituyen cifras representativas de un periodo “normal”, en cuanto a su comportamiento pluviométrico se refiere. Por lo tanto, los procesos hidrogeomorfológicos, además de responder a argumentos edáficos favorables, son consecuencia de condiciones de humedad frecuentes en el área de estudio.

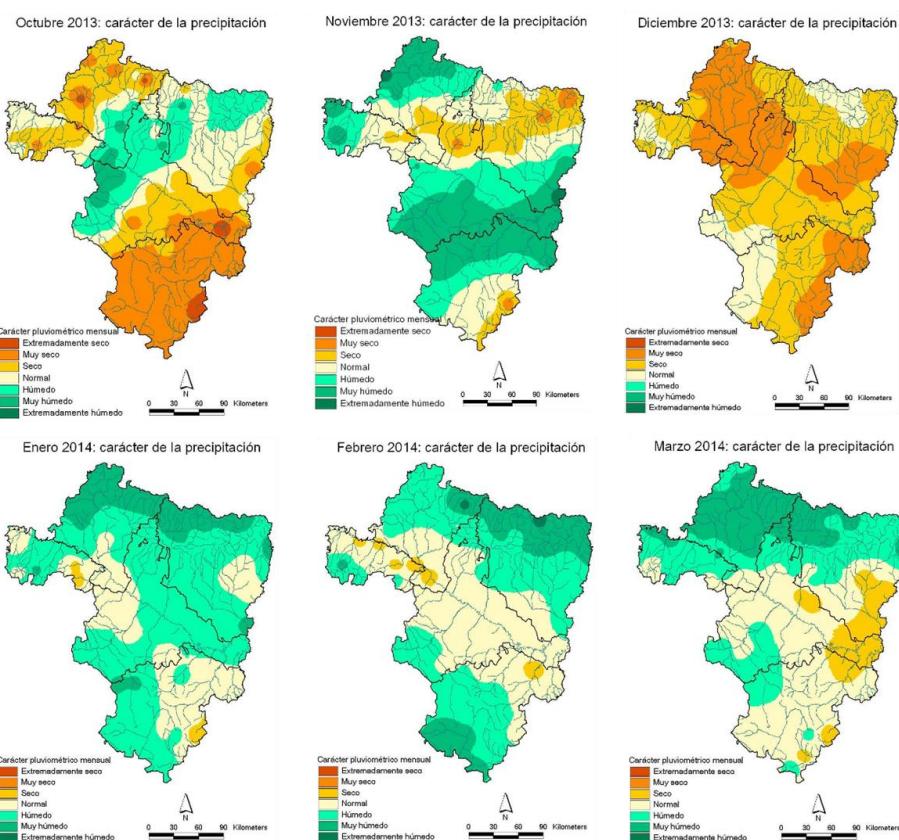


Figura 11. Comportamiento pluviométrico octubre 2013-marzo 2014. Fuente: AEMET

4.2. Comportamiento erosivo

A continuación se exponen los resultados obtenidos para cada área experimental, recapitulando sintéticamente los problemas metodológicos que han impedido la consecución de datos.

4.2.1. Trocha 1

Las condiciones de la trocha 1 han provocado que ésta sea la que mayor problemática ha suscitado a la hora de diseñar un dispositivo experimental adecuado para obtener datos de una forma continua. El hecho de la fuerte pendiente que presenta (40°), junto con un desarrollo longitudinal importante, provoca una intensa escorrentía en momentos de gran precipitación que ha llegado a desbordar el dispositivo de boca de rana instalado. Por otra parte, su orientación norte favorece y potencia un comportamiento hidrogeomorfológico estacional, pues la escorrentía superficial durante el semestre cálido funciona como un flujo hortoniano, mientras que durante el semestre frío, con el suelo cargado de humedad durante la mayor parte del periodo, funciona mediante procesos de flujos y *creep* lento pero constante, que imposibilita la estabilidad de las bocas de rana al tiempo que rezuma constantemente agua que desborda la capacidad de los bidones totalizadores.

Por tanto, el primer dispositivo instalado, la gran canaleta orientada verticalmente hacia la pendiente, no tuvo existo debido a la gran robustez de la canaleta, que impidió a los operarios su enterramiento. De este modo, se creó una grieta en el contacto con el sustrato por donde penetraba el agua y el sedimento sin dificultad. En caso de haber optado por una canaleta de menor capacidad, del tipo de la instalada en la trocha 2, la gran escorrentía que presenta la trocha 1 habría hecho imposible recoger todo el flujo y el sedimento movilizado, por lo que se descartó aquí su colocación.

Las bocas de rana tampoco se han mostrado como un método eficaz para medir la erosión hídrica en la trocha. Durante el periodo dónde las precipitaciones son dominanteamente de tipo frontal, su regularidad, junto con las bajas temperaturas presentes en la zona, provocan un constante estado de saturación del suelo que favorece los procesos de *mudflow*. Por otra parte, durante los meses cálidos, en los que dominan las precipitaciones convectivas, caracterizadas por su corta duración pero gran intensidad, la capacidad del dispositivo de bocas de rana se ve superada por la cantidad de flujo y sedimento generado.

Entre las metodologías alternativas presentadas en el apartado 5, es probable que la técnica de los perfiladores microtopográficos sea la que, *a priori*, mejor pueda adaptarse a la morfología y dinámica de esta trocha, teniendo en principio una buena relación coste-resultados.

4.2.2. Trocha 2

El caso de la trocha 2 difiere del presentado en el punto anterior debido especialmente a las características de la misma. Su moderada pendiente (25°) en comparación con la de la trocha 1, unida a la capacidad del aterrazado para retener el flujo y el sedimento de la terraza inmediatamente superior, provoca la baja llegada de sedimento y flujo hasta los dispositivos instalados. Es importante puntualizar que sí existen indicios de actividad erosiva en forma de *splash*, aunque el material removido únicamente alcanza el plano horizontal del bancal, por efecto de la arroyada superficial laminar, no diferenciando surcos de incisión.



Fotografía 36. Detalle de la actividad del *splash* y la escorrentía laminar.

Además de las características de la trocha, que son representativas de la parte alta de la misma donde la pendiente es menor, los dispositivos experimentales instalados no han dado el resultado esperado.

La trampa de geotextil, además de presentar problemas en cuanto a su estabilidad, especialmente por la intensidad del viento, ocasionaba inconvenientes a la hora de recoger el sedimento.

Respecto a la canaleta instalada, si bien es cierto que ofreció mejores resultados, se hace necesaria una instalación más compleja para asegurar la calidad de los datos recogidos. El poco tiempo del que se dispone en un trabajo de este tipo impidió su óptima colocación, que requería del sellado del contacto con el sustrato con un producto químico destinado a tal fin, además de dotar a la misma de una evacuación efectiva del flujo generado hacia un bidón totalizador. Al no poder realizar estas labores, la desconexión de la manguera y el orificio de desagüe y la aparición de grietas de contacto puntuales mermaron la validez de los escasos datos recogidos.

Este dispositivo experimental, correctamente instalado, puede destacarse en un principio como el más adecuado para la evaluación y cuantificación de los procesos hidrogeomorfológicos en trochas con estas características de pendiente y orientación, pudiéndose obtener resultados representativos de la erosión de los 6-8 m² de área fuente efectiva. Sin embargo, su comportamiento presenta ciertas dudas durante el semestre cálido, un periodo que no se ha llegado a evaluar y donde las intensas precipitaciones podrían llegar a conectar los desniveles del aterrazamiento, lo que probablemente superaría la capacidad de la canaleta instalada y de los bidones totalizadores empleados.

4.2.3. Descalzamientos

El objetivo inicial de caracterizar la evolución post-fuego de las terrazas para la repoblación se vio truncado por el retraso del inicio del trabajo de campo, consecuencia de la demora en la asignación económica al Parque Natural que pudiera financiar los estudios llevados a cabo. Con todo ello, los descalzamientos se observan por primera vez transcurrido más de un año del incendio (octubre de 2013), justo en el periodo en el que se forman en su mayor parte. Tal y como se refleja en los posteriores croquis de la dinámica y dimensiones de los descalzamientos, estos ya superan los dos metros de longitud, encontrándose ya en una fase más estable.

A continuación se muestran cuatro de los 10 descalzamientos seleccionados recogiendo de forma esquemática sus características.

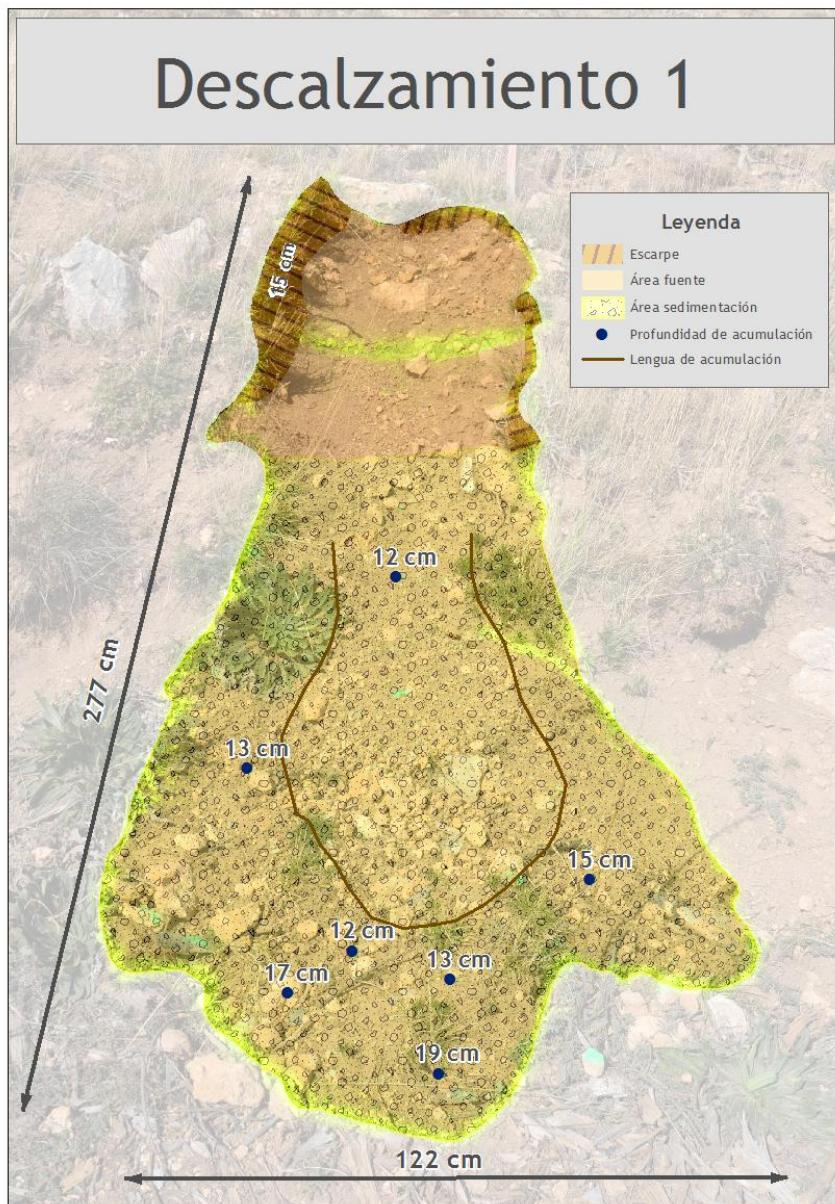


Figura 12. Descalzamiento 1

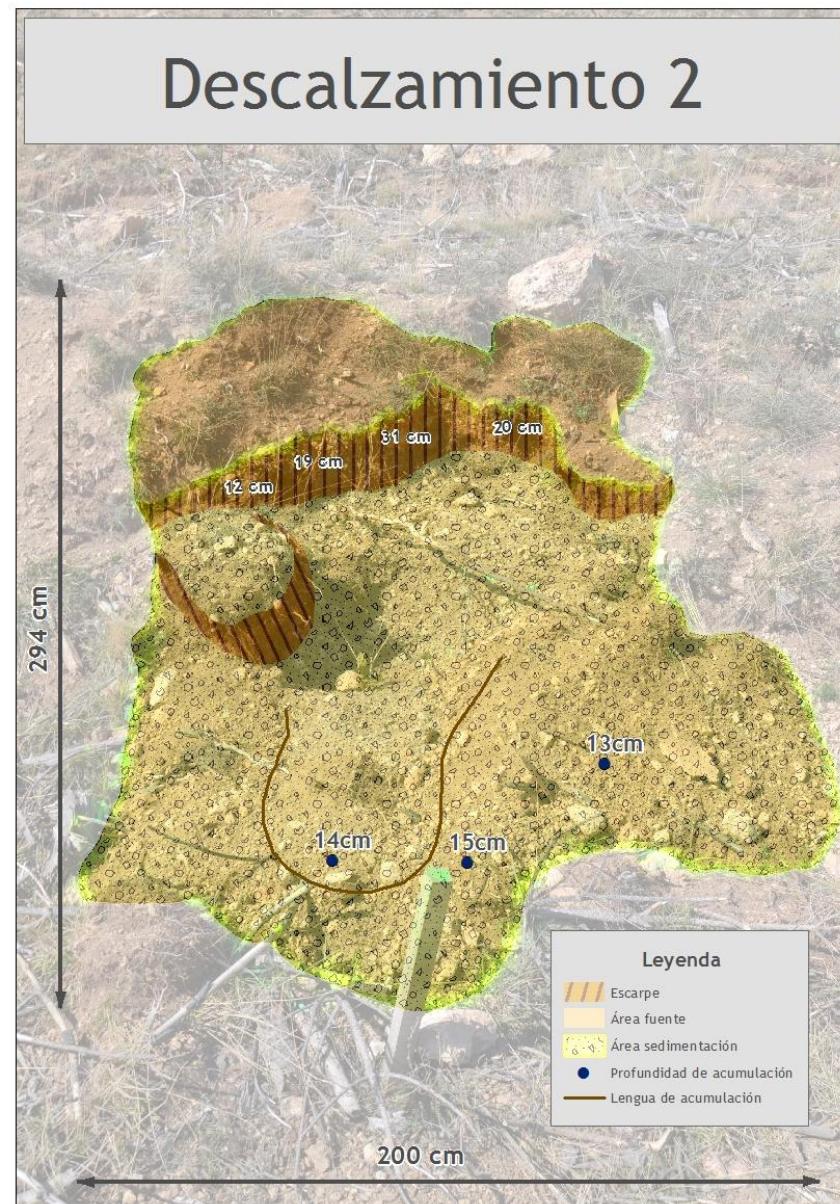


Figura 13. Descalzamiento 2

El primero de los descalzamientos seleccionados presenta un área fuente aproximada de $0,4 \text{ m}^2$ capaz de desarrollar un área de acumulación que se acerca a los dos metros de longitud. El escarpe alcanza su potencia máxima en la parte izquierda, con 15 cm de desnivel. En el área de acumulación destaca una lengua reciente que presenta una colada de piedras con ordenación granulométrica por efecto de la gravedad. Las profundidades del sedimento acumulado medidas en el área de acumulación varían entre los 12 cm en la cabecera de la lengua mostrada en el esquema y los 19 cm del frente del descalzamiento. En una estimación aproximada el material desplazado estaría en torno a los $0,21 \text{ m}^3$.

El segundo descalzamiento presenta un aspecto más complejo. El área fuente aproximada es de $0,6 \text{ m}^2$, con un escarpe que la separa de la zona de acumulación que llega a alcanzar los 31 cm de. En la parte izquierda destaca un resto del antiguo nivel de la terraza, presentando un notable escarpe que alimenta el área de acumulación. Ésta última, presenta profundidades entorno a los 14 cm y se estima que el volumen acumulado es de $0,35 \text{ m}^3$.

Dentro de ambos descalzamientos, además de procesos de desprendimiento fácilmente detectables por la actividad del escarpe y la acumulación ordenada granulométricamente, se producen también procesos de *mudflow* que se muestran de forma más sutil en forma de pequeñas coladas de barro de escala centimétrica.

Por otra parte, la actividad de las máquinas, con posterioridad a la creación del descalzamiento complica la labor de su análisis, pues encontramos material removido y acumulado por las mismas.

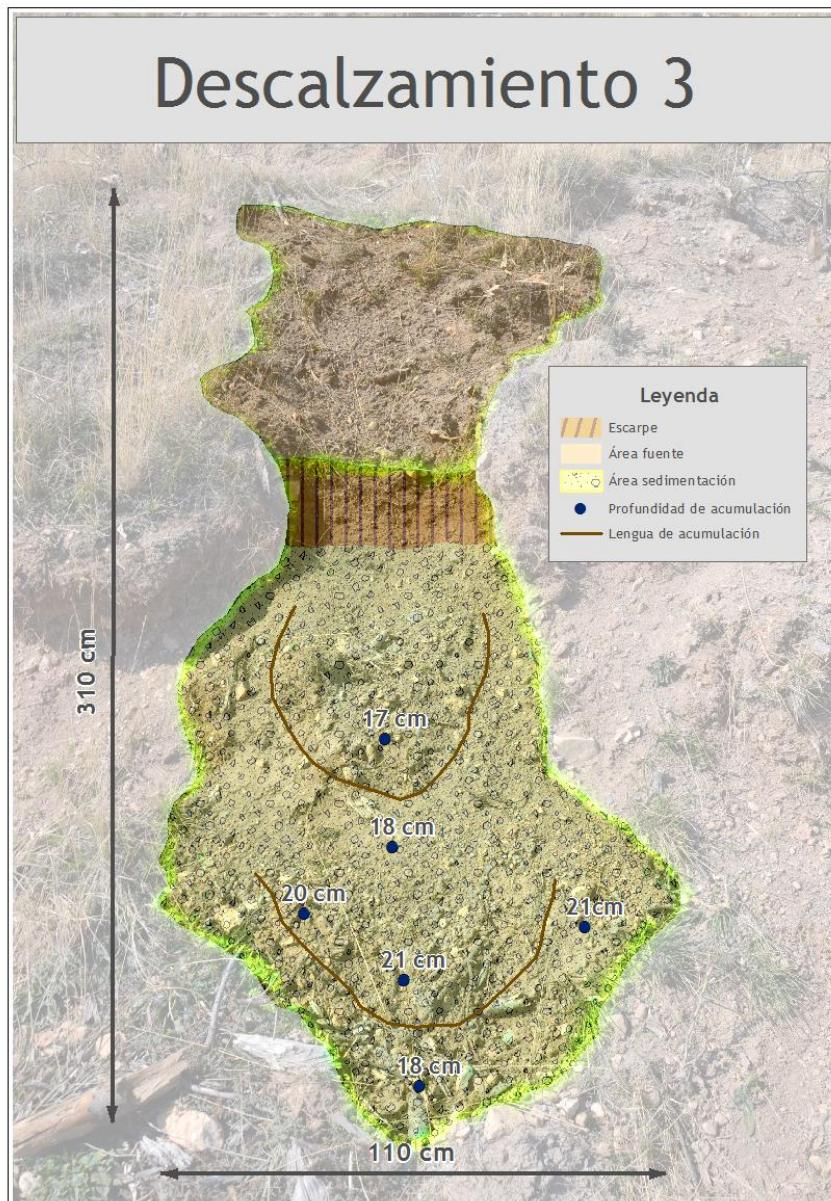


Figura 14. Descalzamiento 3.

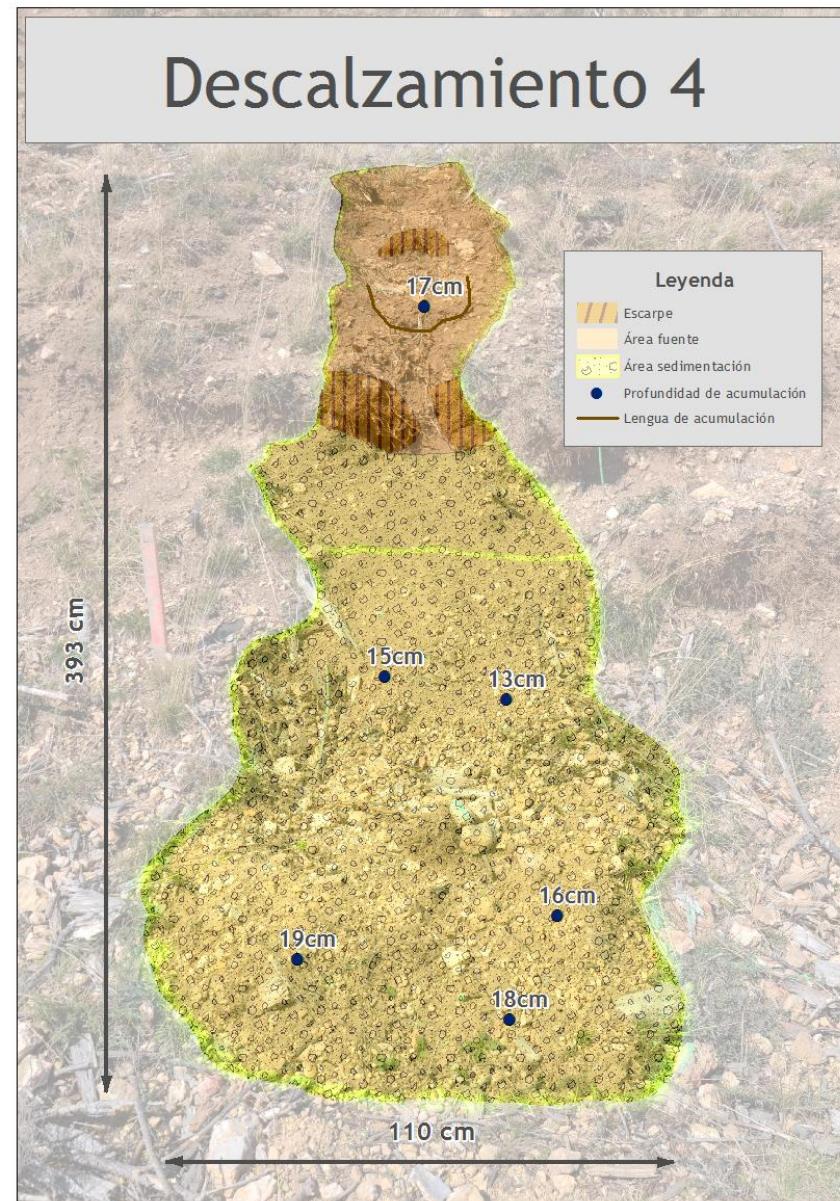


Figura 15. Descalzamiento 4

El descalzamiento 3 presenta un área fuente de aproximadamente $0,4\text{ m}^2$ separada de la zona de acumulación por un escarpe que alcanza los 20 cm de desnivel. Esta zona de acumulación muestra dos lenguas diferenciadas, que pueden haber sido consecuencia de procesos de *mudflow*, ya que no presentan una ordenación granulométrica. Las profundidades medidas en el área de acumulación varían entre los 17 cm de la lengua superior y los 21 cm del frente de la lengua inferior. Cabe destacar además en este descalzamiento la presencia de pequeñas coladas centimétricas (1-2 cm de altura) en su cabecera. En una estimación aproximada el material desplazado estaría en torno a los $0,32\text{ m}^3$.

El descalzamiento 4 podría ser un ejemplo de la evolución de los descalzamientos con el paso del tiempo, si estos llegan a unirse con los de niveles superiores o inferiores. Este descalzamiento, con un gran desarrollo longitudinal cercano a los 4 m, presenta un área fuente aproximada de $0,45\text{m}^2$. Ésta posee la peculiaridad de tener dos escarpes, uno superior de 10 cm de desnivel, con una pequeña lengua de acumulación temporal de 17 cm de profundidad (que probablemente coalescerá en un futuro con el área de acumulación inferior, aunque de momento funciona como una unidad autónoma) y uno inferior que alcanza los 20 cm de desnivel. El área de acumulación muestra material de calibre grueso hacia la mitad del mismo, flanqueado por dos franjas donde el material fino es dominante. Las profundidades varían desde los 13 cm hasta los 18 cm, estimándose la acumulación total aproximada en $0,39\text{ m}^3$.

4.3. Evaluación ambiental

La carencia de datos provenientes de los dispositivos experimentales no debe omitir la formulación de una evaluación ambiental fundamentada en la observación en lo referente a la actuación humana pre y post-incendio en el área de estudio.

En primer lugar, el proceso de reforestación de la ladera oriental de las Peñas de Herrera presenta aspectos criticables. Desde un punto de vista paisajístico, los criterios que llevan a proponer y realizar una repoblación de pinar en un entorno tan emblemático como las Peñas de Herrera son, como poco, cuestionables. Y no sólo radica el problema en lo qué se ha hecho, sino en el cómo. El aterrazamiento necesario para la reforestación, unido al perímetro rígidamente geométrico y al modelo de reparto de los individuos repoblados provocaba un efecto que, a juicio del autor, suponía un impacto de elevada magnitud, desmereciendo el atractivo natural de los Castillos de Herrera. Además, la degradación paisajística después del incendio ha sido muy intensa, ya que hace todavía más visibles los bancales, dañando la calidad visual del paisaje.



Fotografía 37. Aspecto general de las laderas de las Peñas de Herrera.

Por otra parte, la elección del pino rodeno (*Pinus pinaster*) como especie forestal a plantar en las Peñas de Herrera es también discutible. El pino rodeno se adapta bien a las condiciones del área de estudio, aun no constituyendo la vegetación potencial de la zona; sin embargo, tras el fuego presenta una peor regeneración que la encina, especie que debiera ocupar estas laderas (*Quercus ilex sb. rotundifolia*), con una gran capacidad rebrotadora después de un incendio y con ello de recuperación ambiental.

Por otro lado, las actuaciones para extraer la madera calcinada tras el incendio de agosto de 2012 conllevaron la introducción de maquinaria pesada, cuestionable en algunos foros. Ello supuso la apertura de trochas en espacios de elevada pendiente, favoreciendo algunos procesos erosivos, tal y como se ha visto a lo largo del trabajo, con una distribución espacial definida:

- Incisión de surcos en segmentos de laderas de pendientes acusadas.
- Impermeabilización parcial por apisonamiento del terreno, aumentando la escorrentía superficial.
- Remoción del sustrato incrementando la tasa de infiltración, llegando a que se superen límites de plasticidad y liquidez sobre material arcilloso, propiciando la puesta en marcha de flujos.
- Activación del splash en superficies sin cubierta vegetal.
- Procesos acumulativos en rellanos de aterrazamientos.
- Descalzamientos en los bancales, con presencia de lenguas de acumulación de detritos.



Fotografía 38. Retroexcavadora forestal.



Fotografía 39. Maquinaria pesada en la ladera.

Todo este incremento de la actividad erosiva se da en un ambiente sensible a la apertura de cárcavas sobre un sustrato de arcillas del Rethiense -no hay más que ver la gran cárcava presente en la zona de estudio-. Es importante por ello que los gestores ambientales de esta zona tengan en cuenta que las decisiones tomadas antes y después del incendio pueden ocasionar un grave deterioro ambiental, originado por la pérdida de suelo que, en el caso de la apertura de una nueva cárcava, presenta una muy difícil restauración ambiental.

5. Propuestas metodológicas alternativas

En este trabajo se han expuesto dos métodos de medición directa de la escorrentía superficial: parcelas de escorrentía (cada una de las trochas) y bocas de rana. A continuación se introducen algunas técnicas alternativas que podrían ser aplicadas al área de estudio para el estudio de los procesos de erosión post-incendio.

5.1. Métodos directos

Los métodos directos implican la implementación de ensayos de campo con mediciones periódicas. Las técnicas para la estimación de la pérdida de suelo son muy variadas. Aquí se recogen algunas que podrían ser aplicables a nuestra área de estudio.

5.1.1. Agujas de erosión.

La utilización de las agujas de erosión (también denominadas varillas, clavos, piquetas y estacas) es una de las técnicas más simples y efectivas para medir pequeños cambios en la topografía superficial del terreno.

Consiste en introducir parcialmente en el suelo una aguja y medir cada cierto intervalo de tiempo la altura del extremo superior con respecto a la superficie topográfica. Los aumentos y disminuciones del dato que representa la distancia entre el extremo superior de la varilla y el suelo se identifican con procesos de erosión y sedimentación respectivamente.

Este método comenzó a ser utilizado en España en los años 80: Sala (1982) y Clotet y Gallart (1986) en áreas de montaña y *badlands* de Cataluña, Scoging (1982) en áreas semiáridas del sureste de la península, Benito (1989) y Benito *et al.* (1989,

1991) en la depresión del Ebro, continuando su utilización en espacios quemados Pérez-Cabello *et al.* (2002) en el Prepirineo oscense.



Fotografía 40. Aguja de erosión. Fuente: Sancho *et al.* (1991)

VENTAJAS	INCONVENIENTES
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Bajo costo ➤ Rapidez y facilidad de instalación ➤ Permite obtener tasas de erosión ➤ Variaciones temporales y espaciales de microformas ➤ Si se introducen en profundidad pueden resistir el <i>creep</i> superficial 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Solo en terrenos incoherentes ➤ Contaminación de datos (distorsión producida por el investigador en la superficie del terreno durante el montaje y la toma de medidas). ➤ Se aconseja tomar la primera medida entre 3 meses y un año después de su colocación ➤ Micromodificaciones del flujo de agua y sedimento ➤ Ciclos humectación-secado o hielo-deshielo pueden modificar la altura de la superficie topográfica

Figura 16. Tabla de ventajas e inconvenientes de las agujas de erosión.

5.1.2. Perfiladores microtopográficos

Esta técnica se fundamenta en el estudio de las variaciones temporales microtopográficas en dos o tres dimensiones. Se utiliza fundamentalmente para cuantificar la evolución temporal de *rills* y *gullies*. Para ello se precisan situar unos puntos fijos de referencia sobre los que se apoya el perfilador en las sucesivas medidas (Figura 17). Consta de unos indicadores (por lo general varillas) que pueden moverse vertical u horizontalmente en función del objeto propuesto y que reproducen las variaciones topográficas. Existen diferentes instrumentos que toman como base estos principios en función del tipo de material (roca o materiales lábiles), del carácter de la variación morfológica analizada (bi o tridimensional) y las diferentes micromorfologías objeto del estudio (Sancho *et al.*, 1991).

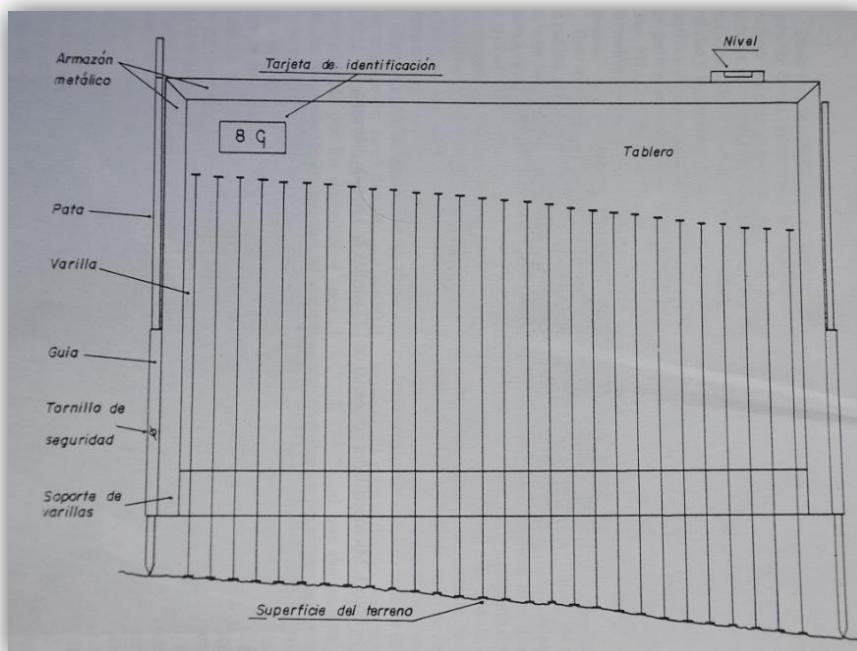


Figura 17. Perfilador bidimensional de medida vertical (Mosley, 1975).

VENTAJAS	INCONVENIENTES
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Bajo coste ➤ No existe contaminación de datos ➤ No hay modificación en el flujo superficial ➤ Permite obtener tasas de erosión ➤ Variaciones temporales y espaciales de microformas 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Solo áreas desprovistas de vegetación. ➤ Suelos expansivos, ciclos hielo/deshielo y humectación/secado y <i>creep</i> superficial pueden desplazar el dispositivo. ➤ Difícil colocación del perfilador en fuertes pendientes (superiores a 20°) (este problema no existe con perfilador tridimensional) ➤ Micromodificaciones del flujo de agua y sedimento

Figura 18. Tabla de ventajas e inconvenientes de los perfiladores microtopográficos.

5.1.3. Cuencas experimentales.

Este sistema se fundamenta en la medición simultánea de la entrada de agua en una cuenca determinada mediante uno o varios pluviómetros y la salida de la misma, además del sedimento transportado por ella, a partir de una estación de aforo tipo flume con sensor de altura del agua. También se hace necesaria la adquisición e instalación de un turbidímetro y un tomamuestras automático. Este técnica ya ha sido aplicada en cuencas españolas, con éxito, incluidas las áreas de montaña (Martínez *et al.*, 2005; Nadal, 2011).

Aplicado a nuestro estudio modificaría las condiciones del mismo, pues se pasaría a una escala superior en la que no sería fácil identificar la parte erosiva

derivada de la acción humana y su parte natural después del paso del fuego. Sin embargo, podrían obtenerse tasas de turbidez del agua y mediante modelización podría cuantificarse la cantidad total de pérdida de suelo en la cuenca seleccionada.

Como inconvenientes destacan la inversión económica necesaria para conseguir el instrumental, además de la dificultad de su instalación, teniendo a favor los buenos resultados que se derivan de esta metodología.

5.1.4. Otros métodos

Un método que se ha implementado en algunos estudios es el pintado de rocas o el uso de trazadores que ayudan a visualizar el transporte de sedimentos de calibre relativamente grueso De Ploey y Gabriels (1984). Estos autores definían el transporte como el producto de la distancia cubierta por área de corte transversal, sumado para todas las partículas, y expresado en $\text{cm}^3\text{cm}^{-1}\text{año}^{-1}$. Otro método de similares características es el marcado radiactivo, que permite seguir el sedimento enterrado (De Ploey y Gabriels, 1984). Pese al desconocimiento del método, durante el trabajo de campo se trató de aplicar una metodología similar a los descalzamientos seleccionados. Sin embargo, las características y limitaciones temporales del estudio imposibilitaron un seguimiento periódico y la consecución de resultados.

Otro método más novedoso es la aplicación del LIDAR y drones a estudios de erosión. Esta tecnología permitiría la medición a escala centimétrica de la superficie del terreno, pudiendo tomarse un dato cada cierto intervalo temporal comenzando tras el incendio. De este modo pueden obtenerse tasas de denudación, estimar la producción total de un área o analizar procesos geomorfológicos entre otras cosas; sin embargo, el coste económico de estos estudios es todavía bastante elevado. Algunos autores que comienzan a experimentar con esta técnica son Ries (2002), Perroy *et al.* (2010) o Baruch y Filin (2011).

5.2. Métodos indirectos

La modelización es un sistema indirecto fundamentado en modelos determinísticos -basados en ecuaciones matemáticos con objeto de describir los procesos involucrados en el modelo, tomando en consideración las leyes de conservación de la materia y energía- o paramétricos, que se basan en identificación de relaciones estadísticamente significativas entre variables, asumiendo que son importantes. Se pueden reconocer tres tipos e análisis (León, 2001):

- De caja negra: donde sólo son estudiadas las entradas y salidas principales.
- De caja gris: donde se tiene conocimiento en algún detalle de cómo trabaja el sistema
- De caja blanca: donde todos los detalles acerca de cómo opera el sistema son conocidos.

La mayoría son de caja gris. Uno de estos métodos de análisis paramétricos de caja gris es la conocida *Ecuación Universal de Pérdida de Suelo* (EUPS), que ha sido aplicada en numerosas ocasiones en todo el mundo. Esta ecuación, desarrollada por Wischmeier y Smith (1978), combina la energía de la lluvia, la erodabilidad del suelo, el grado y longitud e la pendientes y las prácticas de cultivo y conservación con objeto de extraer una aproximación de la pérdida de suelo total.

Resulta evidente que los resultados obtenidos de este tipo de métodos son más genéricos, pero su fácil y rápida aplicación los hace muy útiles en casos determinados.

6. Conclusiones

En este último apartado se recogen, de forma sintética, las conclusiones generales del estudio realizado.

- El fuego introduce nuevos escenarios que alteran la cubierta vegetal y las condiciones físico-químicas del suelo haciéndolo más susceptible a la erosión hídrica.
- Las actuaciones pre y post fuego llevadas a cabo por el ser humano influyen en la magnitud del incremento de la actividad erosiva posterior a un incendio.
- La elección de pino rodeno para la repoblación, en el caso del área de estudio, provoca una recuperación ambiental post-fuego muy lenta. Ello implica la necesidad de la retirada de la madera quemada para regenerar la vegetación de la zona.
- La utilización de maquinaria pesada para las labores de extracción de la madera calcinada conlleva la apertura de trochas en laderas muy pendientes.
- Las trochas presentan comportamientos diferentes en función de las características topográficas (pendiente y orientación) de las mismas.
- En las trochas, los surcos apelmazados -ruedas de la maquinaria-, de pendientes elevadas y con orientación norte (caso de la trocha 1), funcionan mediante un comportamiento estacional marcado por la tipología de la precipitación dominante y el régimen térmico. Durante el semestre cálido, la trocha funciona con un modelo hortoniano en el que la intensidad de la precipitación supera la capacidad de infiltración, dando como resultado la escorrentía, que arrastra a su paso el material denudado fruto del *splash*. Durante el periodo frío del año, las prolongadas precipitaciones (aunque generalmente de menor cantidad) unidas a las bajas temperaturas, favorecen un estado de saturación del sustrato, condición desencadenante de procesos de tipo *mudflow*.
- En las trochas con pendientes menos importantes (<25°), durante el semestre frío, la escorrentía generada no llega a conectar los distintos desniveles del aterrazado, quedando el sedimento movilizado en los diferentes rellanos.
- Los bancales presentes en las laderas, una vez desprovistos de la vegetación que los cubría, experimentan procesos de descalcamiento en los que se moviliza entre 0,2 y 0,4 m³ de material en cada uno de ellos, siendo su presencia muy abundante en toda la ladera.
- El periodo erosivo más activo, tal y como citan varios autores, se corresponde con el primer año después del incendio. Esta velocidad en la acción de los agentes erosivos dificulta la labor de caracterización y cuantificación de los procesos de erosión, más aun en trabajos como el presente, donde la disposición de tiempo y recursos es limitada. En el caso de este proyecto, el trabajo en la zona de estudio definitiva se inició con un año de retraso respecto a la extinción del fuego, lo que ha tenido un gran impacto en el periodo disponible para testar los diferentes dispositivos empleados y poder comprender el comportamiento erosivo de las áreas test, imposibilitando por tanto la toma de datos.

7. Bibliografía

- Albini, F. A. 1976. Estimating wildfire behavior and effects. Gen. Tech. Rep. INT-30. Ogden, Utah: Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 92 p.
- Badía, D., Martí, C., Sariñena, J.L., Aguirre, J., Ibarra, P., Echeverría, P. y León, J. 2010. Depth and temporal changes of chemical properties in wildfire-affected semiarid forest soils. Volumen Libro En: Díaz, M, Benito, E, Carballas, T, Fontúrbel, M.T. y Vega, J.A. (Eds.) Jornadas Internacionales Investigación y Gestión para la protección del suelo y restauración de los ecosistemas forestales afectados por incendios forestales. Fuegored 2010.95-98.
- Baruch, A. y Filin, S. 2011. Detection of gullies in roughly textured terrain using airborne laser scanning data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 66. 564-578.
- Ben-Hur, M., 2008. Seal formation effects on soil infiltration and runoff in arid and semiarid regions under rainfall and sprinkler irrigation conditions. In: Zereini, F., Hötzl, H.(Eds.), Climatic Changes and Water Resources in the Middle East and North Africa. Environmental Science and Engineering. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 429-452.
- Benito, G. 1989. *Geomorfología de la cuenca baja del río Gállego*. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias, 764 p. Zaragoza (Inédita).
- Benito, G.; Gutiérrez, M. y Sancho, C. 1989. Erosion rates in badlands areas of the central Ebro Basin (NE Spain). *Catena* (en prensa).
- Benito, G.; Gutiérrez, M. y Sancho, C. 1991. Erosion patterns in rill and interrill areas in badlands zones of the middle Ebro Basin (NE-Spain). En: Sala, M.; Rubio, J.L. y García-Ruiz, J.M. (Eds.). *Soil erosion studies in Spain*. Geoforma Ediciones, 41-54. Logroño
- Benavides-Solorio, J., MacDonald, L.H., 2001. Post-fire runoff and erosion from simulated rainfall on small plots, Colorado Front Range. *Hydrol.Process.* 15, 2931-2952.
- Benavides-Solorio, J.D., MacDonald, L.H., 2005. Measurement and prediction of post-fire erosion at the hillslope scale, Colorado Front Range. *Int. J.Wildl and Fire* 14, 457-474.
- Campo, J., Andreu, V., Gimeno-García, E., González, O., y Rubio, J. L. (2006). Occurrence of soil erosion after repeated experimental fires in a mediterranean environment. *Geomorphology*, 82(3-4), 376-387.
- Cawson, J. G., Sheridan, G. J., Smith, H. G., y Lane, P. N. J. (2013). Effects of fire severity and burn patchiness on hillslope-scale surface runoff, erosion and hydrologic connectivity in a prescribed burn. *Forest Ecology and Management*, 310(0), 219-233.
- Cuadrat, J.M. y López, F. (Coords.) 2007. Atlas Climático de Aragón. Departamento de Medio Ambiente (Gobierno de Aragón).
- DeBano, L., 2000. The role of fire and soil heating on water repellency in wildland environments: a review. *J. Hydrol.* 231-232, 195-206.
- De Ploey, J., y Gabriels, D. 1984. Medición de la pérdida de suelo y estudios experimentales. En: Kirk by, M. J. y Morgan, R. P. C. (Eds.). *Erosión de suelos*. Limusa, pp. 89-140.
- Frandsen, W. H., y Rothermel, R. C. (1972). Measuring the energy-release rate of a spreading fire. *Combustion and Flame*, 19(1), 17-24.
- Hötzl, H., 2008. WaterresourcesmanagementintheMiddleEastunder aspects of climaticchanges. In: Zereini, F., Hötzl, H. (Eds.), Climatic Changes and Water

- Resources in the Middle East and North Africa. Environmental Science and Engineering. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 77-92.
- Gallart F. 1995. The relative geomorphic work affected by four processes in rainstorms: a conceptual approach to magnitude and frequency. *Catena*, 25: 353-364.
- García-Ruiz, J.M, Lasanta, T (Eds). 1994. Efectos geomorfológicos del abandono de tierras. *Institución Fernando el Católico*. Zaragoza. 171 pp.
- González-Hidalgo, J. C., Peña-Monné, J. L., y de Luis, M. (2007). A review of daily soil erosion in western mediterranean areas. *Catena*, 71(2), 193-199.
- González-Pelayo, O., Andreu, V., Campo, J., Gimeno-García, E., y Rubio, J. L. (2006). Hydrological properties of a mediterranean soil burned with different fire intensities. *Catena*, 68(2-3), 186-193.
- Grupo de Apoyo al Director de Extinción de Incendios Forestales (GADEX). 2013. Informe técnico del incendio forestal de Calcena de 27 de agosto de 2012 (4.674,11 has). Disponible en: http://www.aragon.es/estaticos/GobiernoAragon/Departamentos/AgriculturaGanaderiaMedioAmbiente/MedioAmbiente/Areas/07_Medio_forestal/03_Incendios/Calcena_27_08_2012_v12.pdf
- Inbar, M., Wittenberg, L., Tamir, M., 1997. Soil erosion and forestry management after wildfire in a Mediterranean woodland, Mt. Carmel, Israel. *Int. J. Wildland Fire* 7, 285-294.
- Inbar, M., Tamir, M., Wittenberg, L., 1998. Runoff and erosion processes after a forest fire in Mount Carmel, a Mediterranean area. *Geomorphology* 24, 17-33.
- Inbar, A., et al., 2014. Forestfire effects on soil chemical and physicochemical properties, infiltration, runoff, and erosion in a semiarid Mediterranean..., *Geoderma* 221-222, 131-138
- Kliot, N., 1996. Forests and Forest Fires in Israel. Haifa University, Department of Geography, Haifa, Israel 2-6 (IFFN No. 15, September 1996)
- Köppen, W. 1936 Das geographische System der Klimate. Handbuch der Klimatologie (ed. by W. Köppen and R. Geiger), Vol 1 Part C pp. 1-44. Verlag von Gebrüder Borntraeger, Berlin.
- Le Houerou, N.H. 1973. Fire and vegetation in Mediterranean Basin. *Proc. Ann. Tall. Timb. Fire Ecol.* Pp 1120-1127.
- Le Houerou, N.H. 1977. Fire and vegetation in North Africa. En: *Proc. Symp. Envir. Cons. Fire and fuel Manag. Medit. Ecosys. Forest Ser. Dep. Agric. U.S.*
- León, J.D. 2001. *Estudio y control de la erosión hídrica*. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín, Medellín. ISBN 9589352278
- Martin, D.A., Moody, J.A., 2001. Comparison of soil infiltration rates in burned and unburned mountainous watersheds. *Hydrol. Process.* 15, 2893-2903.
- Martínez, J., Ceballos, A., Hernández, V., Casado, S. y Morán, C. 2005. Procesos hidrológicos en una cuenca forestal del sistema central: cuenca experimental de Rinconada. *Cuadernos de Investigación Geográfica*. Nº 31. 7-25.
- Mayor, A.G., Bautista, S., Llovet, J., Bellot, J., 2007. Post-fire hydrological and erosional responses of a Mediterranean landscape: seven years of catchment-scale dynamics. *Catena* 71, 68-75.
- Moody, J.A., Martin, D.A., 2001. Initial hydrologic and geomorphic response following a wildfire in the Colorado Front Range. *Earth Surf. Proc. Land.* 26, 1049-1070.
- Mosley, M.P. 1975. A device for the accurate survey of small scale slopes. *Bristish Geomorphological Research Group. Technical Bulletin*, 17, 3-6.
- Nadal, E. 2011. Las áreas de cárcavas (*badlands*) como fuente de sedimento en cuencas de montaña: procesos de meteorización, erosión y transporte en margas del Pirineo central. Tesis Doctoral. *Publicaciones del Consejo de Protección de la Naturaleza de Aragón*. 377pp.

- Pausas, J.G., 2004. Changes infire and climate in the Eastern Iberian Peninsula (Mediterranean Basin). *Clim. Chang.* 63, 337-350.
- Pausas, J.G., Fernández-Muñoz, S., 2012. Fire regime changes in the Western Mediterranean Basin: from fuel-limited to drought-driven fire regime. *Clim. Chang.* 110, 215-226.
- Pausas, J.G., Vallejo, V.R., 1999. The role of fire in European Mediterranean ecosystems. In: Chuvieco, P.D.E. (Ed.), *Remote Sensing of Large Wildfires*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 3 -16.
- Pérez-Cabello, F., Echeverría, M. T., Ibarra, P. y de la Riva, J. 2002. Estudio experimental de la dinámica ambiental postincendio en el Prepirineo oscense: El incendio de Agüero. *Actas de la VI Reunión de Geomorfología*. 307: 314
- Pérez-Cabello, F., Echeverría, M.T., Ibarra, P. y de la Riva, J. 2009. Effects of Fire on Vegetation, Soil and Hydrogeomorphological Behavior in Mediterranean Ecosystems. En: Chuvieco, E. (Ed.), *Earth Observation of Wildland Fires in Mediterranean Ecosystems*. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg. 111- 128.
- Pérez, F., Sánchez de Mena, M. J., Echeverría, M.T. e Ibarra, P. 2003. Comportamiento hidrogeomorfológico de un bosque quemado y sometido a labores de repoblación. *El incendio de San Juan de la Peña* (Huesca, España). En, Marzolff, I., Ries, J., de la Riva, J. y Seeger, M. (Eds.) *Landnutzungswandel und Landdegradation in Spanien* Editoria. Universitat Frankfurt am Main y Universidad de Zaragoza. Zaragoza. 85-97.
- Perroy, R.L., Bookhagen, B., Asner, G.P., Chadwick, O.A. 2010. Comparison of gully erosion estimates using airborne and ground-based LiDAR on Santa Cruz Island, California. *Geomorphology*. 118. 288-300.
- Ries, J.B., 2002. Geomorphodynamics on fallow land and abandoned fields in the Ebro Basin and the Pyrenees-Monitoring of processes and development. In Schmidt, K.H. and Vetter, T. (Eds): *Late Quaternary Morphodynamics*. *Zeitschrift für Geomorphologie*, N.F. Supp. Band, 127:21-45.
- Robichaud, P.R., Waldrop, T.A. 1994. A comparison of surface runoff and sediment yields from low-and-high severity site preparation burns. *Water Research Bulletin*, 30: 27-34.
- Rothermel, R.C. 1972. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. *USDA For. Serv. Res. Pap. INT-115*. 40 p.
- Rubio, J. L., Forteza, J., Andreu, V., y Cerni, R. (1997). Soil profile characteristics influencing runoff and soil erosion after forest fire: A case study (Valencia, spain). *Soil Technology*, 11(1), 67-78.
- Sala, M. 1982. Metodología para el estudio y medición de los procesos de erosión actuales. *Notes de Geografía Física*, 8, 39-56.
- Sancho, C., Benito, G., Gutiérrez, M. 1991. Agujas de erosión y perfiladores microtopográficos. *Cuadernos técnicos de la S.E.G.* N°2. Geoforma Ediciones. 28pp.
- Scoging, H. 1982. Spatial variations in infiltration runoff and erosion on hillslopes in semiarid Spain. En: Bryan, R.B. y Yair, A. (Eds.) *Badland geomorphology and piping*. Geo Books, 89-112.
- Shakesby, R.A., 2011. Post-wildfire soil erosion in the Mediterranean: review and future research directions. *Earth Sci. Rev.*, 105, 71-100.
- Tena, A., Ibarra, B., Pérez-Cabello, F., Echeverría M.T., de la Riva, J., 2010. Análisis de los flujos de interceptación un pinar quemado: el papel de la severidad del fuego. En, X. Úbeda, D. Vericat, R.J. Batalla (Eds.) *Avances de la Geomorfología en España. 2008-2010. XI Reunión Nacional de Geomorfología*.
- Thornes J. 1976. Semi-arid erosional systems. En *Geographical Paper nº7*. London School of Economics Ocassional, 79 pp.

- Wagenbrenner, J.W., MacDonald, L.H., Rough, D., 2006. Effectiveness of three post-fire rehabilitation treatments in Colorado Front Range. *Hydrol. Process.* 20, 2989-3006
- Wischmeier, W.H. y Smith, D.D. 1978. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. *USDA Agricultural Handbook*, nº537. 58p
- Wittenberg, L., Inbar,M., 2009. The role of fire disturbance on runoff and erosion processes—a long-term approach, Mt. Carmel case study. *Israel. Geogr. Res.* 47, 46-56.
- Wittenberg, L., Malkinson, D., 2009. Spatio-temporal perspectives of forestfires regimesin a maturing Mediterranean mixed pine landscape. *Eur. J. For. Res.* 128, 297-304.

8. Glosario de términos

Aquí se recogen las definiciones breves de los términos técnicos empleados en este trabajo y que pueden facilitar la comprensión del texto al lector.

Cárcavas o badlands: formas de modelado hídrico denso, que se extiende en redes de tipo arborescente. Se forma debido a la rápida erosión hídrica en terrenos arcillosos o que presentan en la composición de su regolito una parte importante de arcilla.

Creep o reptación: tipo de movimiento lento del suelo/formación superficial/sustrato, provocado por la humectación de la ladera y la gravedad.

Edafogénesis: proceso de formación y evolución de un suelo.

Erosion: conjunto de procesos de meteorización y transporte del suelo o roca por la acción del agua, viento, gravedad, hielo u otros agentes morfogenéticos.

Escorrentía: agua que circula sobre la superficie terrestre, ya sea de forma laminar o concentrada.

Debrisflow: flujo de material no consolidado (detritos) y agua, bajo la influencia de la gravedad.

Desertificación: proceso de degradación ecológica en el que el suelo fértil y productivo pierde total o parcialmente el potencial de producción por acción de diversos factores como las variaciones climáticas y las actividades humanas.

Frostcreep: lento movimiento de partículas del suelo a favor de la pendiente por la acción de ciclos hielo-deshielo.

Infiltración: Proceso por el que el agua penetra en el suelo.

Lapiaz: Surcos o cavidades modelados por disolución sobre rocas solubles, principalmente calizas y yesos.

Flujo hortoniano: flujo hídrico superficial producido cuando la intensidad de la precipitación excede la capacidad de infiltración del suelo.

Mudflow: flujo de agua y suelo (barro) producido por la saturación del sustrato en terrenos con pendiente.

Rills: incisiones estrechas, superficiales y temporales sobre el sustrato resultantes de la erosión producida por la escorrentía hídrica, superficial y concentrada.

Splash o salpicadura: arranque y desplazamiento de partículas del suelo por impacto de las gotas de lluvia.

Trocha: camino abierto tras un fuego forestal para la extracción de madera.

