



# 4

**Métodos y técnicas de estudio del impacto de los incendios forestales en los ecosistemas**





# 4.1

## **Seguimiento de la evolución hidrogeomorfológica postincendio. El sistema FDARE de captura y análisis automatizado de fotografías verticales**

Fernando Pérez-Cabello<sup>1</sup>, Raquel Montorio<sup>1</sup>, Vicente Palacios<sup>1</sup>, Alberto García-Martín<sup>1</sup>, Juan R. de la Riva<sup>1</sup>,  
María T. Echeverría<sup>1</sup>, Paloma Ibarra<sup>1</sup> y Teodoro Lasanta<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza, Pedro Cerbuna, 12, 50009, Zaragoza. [fcabello@unizar.es](mailto:fcabello@unizar.es)

<sup>2</sup>Instituto Pirenaico de Ecología (CSIC), Avda. Montañana, s/n, Apdo. 13034, 50080, Zaragoza.



## Seguimiento de la evolución hidrogeomorfológica postincendio. El sistema FDARE de captura y análisis automatizado de fotografías verticales

Fernando Pérez-Cabello<sup>1</sup>, Raquel Montorio<sup>1</sup>, Vicente Palacios<sup>1</sup>, Alberto García-Martín<sup>1</sup>, Juan R. de la Riva<sup>1</sup>, María T. Echeverría<sup>1</sup>, Paloma Ibarra<sup>1</sup> y Teodoro Lasanta<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza, Pedro Cerbuna, 12, 50009, Zaragoza. [fcabello@unizar.es](mailto:fcabello@unizar.es)

<sup>2</sup> Instituto Pirenaico de Ecología (CSIC), Avda. Montañana, s/n, Apartado 13034, 50080, Zaragoza.

### RESUMEN

El análisis de las consecuencias del fuego sobre el binomio erosión-vegetación se ha valido de diversos métodos y técnicas, entre las que destacan por su profusa utilización las parcelas de erosión. En este marco instrumental, para complementar la información hidrogeomorfológica suelen realizarse, aunque no siempre, estimaciones cualitativas de los tipos de cubierta y su evolución temporal. Sin embargo, la variabilidad de procesos e interacciones a micro-escala que se producen tras un fuego demandan metodologías que recojan la información de manera mucho más sistemática y precisa. En este sentido, el método que se propone, denominado FDARE (*Fotografía Digital de Alta Resolución Espacial*) en condiciones de iluminación homogéneas, como apoyo a la monitorización de procesos hidrogeomorfológicos en parcelas experimentales posibilita la obtención multitemporal de una imagen vertical, en el espectro visible, de la superficie. Esta metodología, en el marco de las parcelas de erosión, permite evaluar y cartografiar la distribución espacio-temporal de los procesos superficiales, contribuyendo a la explicación de la producción de flujo y sedimento. En este capítulo se describen los componentes del sistema y se presentan los resultados de un ensayo metodológico aplicado a una parcela de erosión ubicada en la Estación Experimental de Peñaflo (Zaragoza).

### INTRODUCCIÓN

Las parcelas experimentales para la medición de flujo y sedimento en sus diferentes versiones (abiertas y cerradas) y aplicaciones (funcionamiento hidrogeomorfológico de campos abandonados, diferentes usos del suelo, incendios forestales, entre otros) constituyen uno de los instrumentos más utilizados para obtener información cuantitativa sobre procesos hidrogeomorfológicos a escala de detalle. En el número 6 de los Cuadernos Técnicos de la Sociedad Española de Geomorfología, López-Bermúdez et al. (1993) describen de manera detallada todo lo referente a la utilización de dicha técnica, y en el capítulo 2.5, Cerdá y Jordán (2010) presentan una revisión del método.

Este tipo de instrumentación posibilita la obtención de un dato global sobre la producción de flujo y sedimento, pero no permite conocer los procesos de interacción que se producen dentro de las parcelas. De hecho, una de las limitaciones más importantes de esta técnica es el tener que servirse de infraestructuras complementarias para analizar las características internas de la superficie de la parcela, imprescindibles por otra parte para la comprensión global de los resultados hidrogeomorfológicos. Este último extremo es especialmente nece-

sario cuando son procesos dinámicos los que determinan la variabilidad temporal de la respuesta hidrogeomorfológica.

El análisis de la respuesta hidrogeomorfológica tras el fuego responde claramente a esta última circunstancia. En función del grado de intensidad con el que se manifiesta el fuego suelen producirse alteraciones estructurales a nivel superficial (combustión de la cubierta vegetal, aparición de cenizas...), que modifican los factores controladores del binomio escorrentía-infiltración. Con posterioridad al fuego, otros procesos derivados del paso de la perturbación –regeneración vegetal, eliminación de cenizas o incremento de la pedregosidad superficial- también afectan al comportamiento hidro-morfológico de las superficies calcinadas. Tanto unos como otros deben ser cuantificados y monitorizados en el tiempo para una mejor interpretación y comprensión del papel del fuego sobre los ecosistemas afectados.

Para conocer las características internas de las parcelas experimentales se suelen realizar estimaciones cualitativas de la ocupación y evolución temporal de tipos de cubierta como cenizas, costras superficiales, actividad biológica y recubrimiento vegetal. En cuanto a la vegetación, los datos sobre la actividad erosiva se complementan, en ocasiones, con la estimación de la evolución de la colonización vegetal mediante la realización de inventarios florísticos dentro de las parcelas, o conteo siguiendo transectos lineales.

Sin embargo, la variabilidad de procesos e interacciones a micro escala que se producen tras un fuego forestal demanda el uso de metodologías más precisas que permitan interpretar mejor los datos de erosión recogidos y conocer los modelos de distribución espacial de las principales cubiertas superficiales explicativas parcialmente de la actividad hidrogeomorfológica. En este contexto la extracción de una imagen de la superficie de la parcela experimental proporciona información precisa y completa de sus características internas (tipos de recubrimiento y patrones de distribución espacial).

En este capítulo se describen los componentes de un sistema para la toma de *Fotografía Digital de Alta Resolución Espacial* (FDARE) en condiciones de iluminación homogéneas, como apoyo a la monitorización de procesos hidrogeomorfológicos en parcelas experimentales, así como los resultados de un ensayo aplicado a una parcela de erosión localizada en la Estación Experimental de Peñafior (EEP, Zaragoza) durante una secuencia temporal próxima al año.

## MATERIAL Y MÉTODOS

En los siguientes párrafos se describen la zona de estudio y los componentes y metodologías aplicadas en el sistema FDARE.

### Área de estudio

La zona de estudio se ubica en la EEP, concretamente en el municipio de Peñafior (provincia de Zaragoza), a unos 15 km de la ciudad de Zaragoza (UTM 30T 685568-4628873, 260 m de altitud). Este sector es representativo de los ambientes esteparios semiáridos del centro del Valle del Ebro, dominados por cultivos herbáceos de secano, matorrales degradados y pastizales xerofi-

ticos. El clima se caracteriza por una precipitación anual inferior a los 350 mm y una temperatura media de 15 °C. La estación se emplaza sobre una ladera de orientación sur y pendiente aproximada de 13°. El suelo es un Regosol calcáreo desarrollado sobre una terraza fluvial cuaternaria y la vegetación está constituida por un matorral ralo dominado por *Rosmarinus officinalis* L. y *Brachypodium ramosum* L. *Roem. & Schult.*

La estación está formada por 4 parcelas experimentales de 24 m<sup>2</sup> (8 m × 3 m), una de las cuales ha sido utilizada para el ensayo de esta metodología. Las parcelas están equipadas con cajas tipo *Gerlach* y un sistema de cangilones conectado a un *data logger*. La información sobre precipitación y escorrentía se registra de forma continua y después de cada evento de lluvia se recoge una muestra de agua que se traslada al laboratorio para conocer el contenido de solutos y sedimento en suspensión. La estación se instaló en octubre de 2003, registrándose la producción de flujo y sedimento desde esa fecha.

El 16 de octubre de 2004, a las 12:00 h, la parcela seleccionada fue sometida a un incendio controlado de intensidad baja. Su duración total fue de 20 minutos (debido a la discontinuidad del combustible), con alturas de llama de 1 m aproximadamente y temperaturas máximas comprendidas entre 400 y 500 °C. La figura 1 muestra la secuencia temporal del ensayo aplicado en la EEP.

Los valores promedio de precipitación, flujo superficial y sedimento en suspensión, recogidos en la parcela experimental antes y después del fuego, se detallan en la tabla 1. Se trata de datos provenientes de 28 eventos (> 5 mm día<sup>-1</sup>), 17 antes del fuego y 11 después. En términos de actividad hidrogeomorfológica, los valores para los dos periodos pueden considerarse como bajos debido, entre otros factores, a los también bajos volúmenes de precipitación e intensidades registrados.

Tras el fuego, la parcela presenta pérdidas de sedimento de 2148,2 mg L<sup>-1</sup>, el doble que antes del fuego, debido al también doble incremento del flujo superficial (de 0,4 a 0,8 L<sup>-1</sup>). Por lo tanto, el fuego duplica la actividad geomorfológica en la parcela, si bien es cierto que los valores son bajos para los dos periodos.

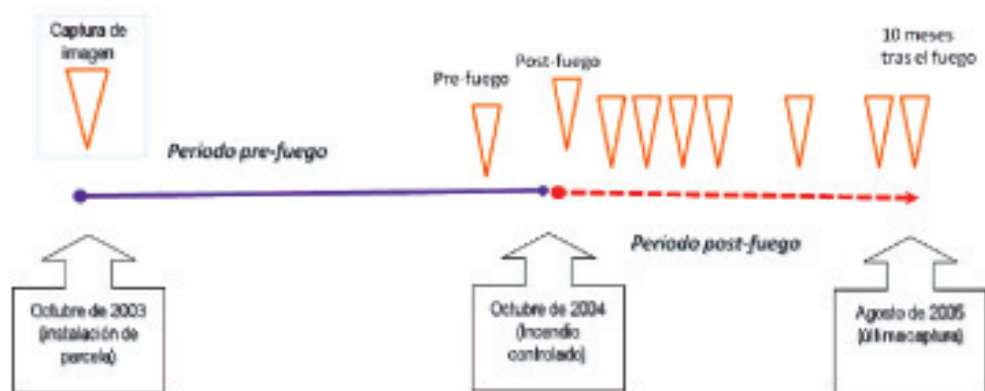


Figura 1. Secuencia temporal del ensayo aplicado en la EEP (Zaragoza).

Tabla 1. Valores promedio y rango en relación con la producción de flujo y sedimento en suspensión correspondiente a los dos periodos de tiempo (prefuego y postfuego).

|       |           | Flujo superficial |          | Sedimentos         | Precipitación |
|-------|-----------|-------------------|----------|--------------------|---------------|
|       |           | mm                | %        | mg L <sup>-1</sup> | mm            |
| Media | Prefuego  | 0,4 ±0,1          | 3,2 ±0,6 | 859,3 ±535,8       | 9,3 ±1,3      |
|       | Postfuego | 0,8 ±0,3          | 6,4 ±1,6 | 2148,2 ±1014,9     | 10,4 ±2,4     |
| Rango | Prefuego  | 0,1-1,7           | 0,9-10,1 | 322,0-1930,8       | 3,9-21,8      |
|       | Postfuego | 0,0-3,2           | 0,8-16,8 | 372,0-3887,0       | 3,7-27,8      |

### Componentes y métodos del sistema FDARE

Los componentes del sistema se detallan a continuación:

- Cámara digital Reflex Nikon D70; 6,1 millones de píxeles. Incorpora un sistema de anclaje que permite la toma vertical de fotografías.
- Lente DX Nikkor (AF DX Fisheye-Nikkor 10,5 mm f/2,8G ED), que permite un ángulo de visión de 180°. La utilización de esta lente reduce el número de fotografías a tomar para recoger toda la superficie de las parcelas.
- Nikon Capture 4 Camera Control, Programa informático para la toma de la fotografía desde un ordenador portátil situado fuera del bastidor.
- Bastidor metálico de 3 m × 3 m y una altura de 2 m. El bastidor se arma a partir de una serie de tramos que se encajan entre sí para facilitar su transporte.
- Travesaño móvil de 3 m de longitud con orificios cada 50 cm, que se encaja a la parte superior de bastidor. La cámara digital se fija a dicha barra móvil, que se desplaza en el sentido de la máxima pendiente permitiendo “sobrevolar” la superficie de la parcela. Los orificios que permiten el anclaje de la cámara posibilitan el desplazamiento transversal de la cámara sobre la superficie a fotografiar.
- Lona opaca (Pol. PVC 650 GR lacado 2 caras). Para poder anular los efectos de la diferente posición de las sombras o de la diferente cantidad luz, dependientes en el exterior de la posición del sol y de las condiciones atmosféricas fue diseñado un toldo negro. Este cubrimiento de la estructura es completamente opaco y cerrado totalmente al exterior. La superficie a capturar es así iluminada únicamente por un flash o linterna durante la toma, pudiendo mantenerse constante, tanto en intensidad como en balance y posición, a lo largo de las diferentes fechas de captura de imágenes (Figura 2).
- linterna recargable de doble luz fluorescente Model 2868. La utilización de la lona opaca y la luz fluorescente genera unas condiciones homogéneas de iluminación, permitiendo la toma de las fotografías en cualquier momento del día y del año al eliminar los problemas derivados de la geometría de observación (sombras, intensidad lumínica...).

Una vez tomadas las imágenes se aplican, ya en gabinete, una serie de procesos de pretratamiento y tratamiento digital –realización de mosaicos, corrección geométrica y clasificación digital supervisada– que permiten cuantificar la magnitud y estructura espacial de los componentes que se producen en dicha unidad espacial.



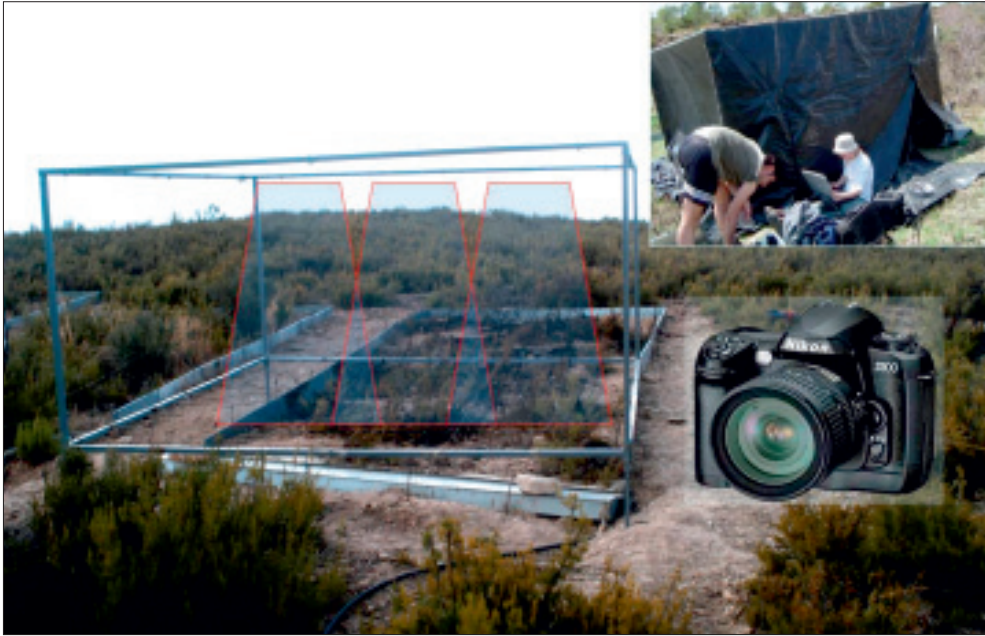


Figura 2. Detalle del bastidor, cámara digital y toldo.

El primer proceso consiste en la realización de un mosaico de las imágenes tomadas. El número de imágenes capturadas permite un importante solapamiento entre los diferentes sectores y entre imágenes consecutivas, posibilitando descartar los bordes externos de la imagen, siempre con mayores deformaciones geométricas. Este solapamiento permite también un proceso semi-automatizado de búsqueda de áreas comunes entre imágenes contiguas. Tras este procedimiento se genera una única imagen de la parcela experimental completa.

El segundo proceso, tras la elaboración del mosaico, es la corrección geométrica del mismo. En este caso se ha tomado un total de 60 puntos de control con una precisión milimétrica mediante el aparato diferencial GPS500 de Leica. Con el apoyo de las coordenadas de estos puntos de control se aplica un procedimiento de corrección mediante un polinomio de segundo grado dentro del programa Erdas Imagine 9.2. Rectificando la imagen al sistema de coordenadas UTM (*Universal Transversal de Mercator*) con una proyección al elipsoide de 1909 dentro del *European Datum* de 1950, Zona 30 Norte. Para minimizar los cambios en los valores radiométricos se aplica un proceso de asignación por “vecino más próximo”. Los píxeles se re proyectan a una resolución espacial de 1 mm, con valores de RMSE inferiores a los 2 cm. Esta imagen será posteriormente utilizada como base para el co-registro del resto de imágenes que componen la colección multitemporal.

En tercer lugar se aplica un procedimiento de clasificación supervisada a cada una de las imágenes con el objeto de cuantificar la superficie que en cada uno de los momentos tiene cada una de las cubiertas. Partiendo de la información de las tres bandas del espectro visi-

ble recogidas por la cámara, se opta por un procedimiento de clasificación supervisada con un clasificador de máxima probabilidad o máxima verosimilitud (*Maximum likelihood*). Este procedimiento consiste en un algoritmo de clasificación que asigna los píxeles de las imágenes a diferentes clases (vegetación, suelo desnudo, fragmentos rocosos, cenizas y carbón) a partir del establecimiento de áreas de entrenamiento, representativas de cada una de las cubiertas, y el establecimiento de patrones espectrales utilizando la información de las bandas de las imágenes. A partir del vector de medias y la matriz de varianza-covarianza se definen unas funciones de probabilidad para cada tipo de cubierta, asignado los píxeles de la imagen a una de ellas.

En el ensayo que se presenta se realizó un toma de fotografías antes del fuego controlado (julio de 2004), otra inmediatamente después (octubre de 2004) y, sucesivamente, con una cadencia mensual hasta agosto de 2005.

## RESULTADOS

### Seguimiento de los cambios de la cubierta del suelo

La tabla 2 muestra la evolución de las distintas cubiertas presentes en la parcela experimental sometida al incendio controlado antes, inmediatamente después, y en 7 de los 10 meses posteriores al fuego. Por su parte, la figura 3 permite analizar la evolución de los patrones espaciales de distribución de los materiales presentes en estos tres mismos momentos de la serie multitemporal.

En la situación prefuego, la cubierta dominante es la vegetación (47,7%), mayoritariamente de *Rosmarinus officinalis*, y dos categorías de suelo diferenciadas entre sí por la presencia o no de fragmentos rocosos, teniendo la segunda una representación algo superior a la primera (21,3% y 28,2% respectivamente). El patrón espacial de distribución de las clases antes del incendio se caracteriza por una estructura superficial en mosaico de parches de vegetación, suelo desnudo y enlosados, característico de los ecosistemas semiáridos como consecuencia de la limitada disponibilidad de agua y de nutrientes en estos ambientes (Imeson y Prinsen, 2004).

Tabla 2. Evolución temporal de las cubiertas de la superficie de la parcela. \* Acumulaciones orgánico/minerales (sedimentos, cenizas, carbones, hojas sof lamadas).

|                    | Pre<br>fuego | Post<br>fuego | Meses después del fuego |      |      |      |      |      |      |
|--------------------|--------------|---------------|-------------------------|------|------|------|------|------|------|
|                    |              |               | 1                       | 2    | 3    | 4    | 7    | 9    | 10   |
| Vegetación         | 47,7         | 32,3          | 12,8                    | 10,2 | 10,1 | 7,6  | 12,4 | 11,5 | 11,9 |
| Suelo desnudo      | 28,2         | 29,4          | 26,6                    | 29,9 | 31,6 | 35,7 | 30,8 | 29,0 | 34,3 |
| Fragmentos rocosos | 21,3         | 19,7          | 23,5                    | 21,8 | 18,6 | 23,4 | 29,8 | 37,3 | 27,7 |
| Ceniza             | 0,0          | 4,9           | 1,9                     | 0,0  | 0,0  | 0,0  | 0,0  | 0,0  | 0,0  |
| Carbones           | 0,0          | 12,0          | 10,0                    | 7,5  | 7,2  | 2,5  | 0,8  | 0,9  | 0,0  |
| AOM*               | 0,0          | 0,0           | 24,6                    | 30,2 | 31,1 | 29,9 | 25,2 | 21,3 | 26,1 |
| Sombras            | 2,8          | 1,7           | 0,6                     | 0,4  | 1,4  | 0,9  | 1,0  | 0,0  | 0,0  |

Un análisis más detallado de la estructura superficial permite observar que los parches de vegetación no se encuentran repartidos de forma homogénea, sino que se organizan en bandas inclinadas y transversales en relación con la línea de máxima pendiente de la parcela. Este patrón proyecta superficialmente la alternancia de “sectores fuente” y “sectores recepción” de sedimentos, de tal modo que los parches de suelo desnudo funcionan como áreas de generación de sedimentos y los de vegetación como zonas de acumulación y de retención de restos orgánicos, conformando un escenario de infiltración discontinuo y no uniforme (Figura 3).

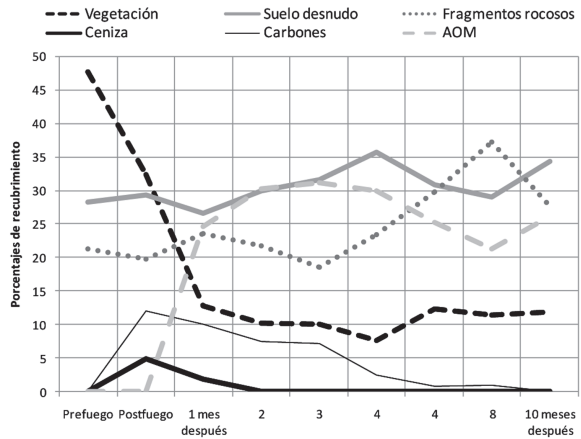


Figura 3. Evolución temporal del porcentaje de recubrimiento de los materiales superficiales en la parcela.

Un mes después del incendio la vegetación deja de ser la categoría más abundante, pasando a ocupar únicamente el 12,8% de la parcela. Este descenso relativo de algo más del 60% es debido a la muerte de la práctica totalidad de los arbustos de *Rosmarinus officinalis* sof lamados, sobreviviendo tan sólo unas pocas ramas de los ejemplares menos afectados. El segundo cambio importante que se observa con respecto a la situación inmediatamente después del fuego es el descenso de la superficie de cenizas (decremento relativo del 61,3%), pasando a ocupar tan apenas un 1,9% del total de la parcela. El otro producto de la combustión, el carbón, permanece relativamente estable, disminuyendo sólo en un 16,6%, con lo que aparece ocupando un 10% de la parcela.

Otro aspecto relevante en este primer mes después del incendio es la aparición de una nueva cubierta, resultado de la mezcla de sedimentos con restos de ceniza, carbones y hojas sof lamadas, debido a los procesos de escorrentía superficial, que se ha denominado “Acumulaciones orgánico/minerales” (AOM), y que aparece a lo largo de toda la parcela y persiste hasta el final de la serie temporal analizada, presentando porcentajes de cubrimiento entre el 20 y el 31% del total de la parcela. La figura 3 muestra cómo esta nueva categoría se emplaza en las zonas correspondientes a los parches previamente dominados por la vegetación. En este sentido la necromasa de las matas espaciadas de *Rosmarinus officinalis* funciona a modo de “trampa”, reteniendo superficialmente sedimentos, cenizas y carbones.

En cuanto a la evolución del resto de categorías, habría que señalar como hechos más significativos (i) la completa desaparición de las cenizas en el segundo mes, fruto de la baja densidad y peso de este material, fácilmente transportable fuera de la parcela por la acción del viento y del agua; (ii) el decremento progresivo de la cubierta vegetal, debido a la paulatina muerte de los restos de *Rosmarinus officinalis*; y (iii) el aumento de las superficies correspondientes a las clases de suelo desnudo y fragmentos rocosos o enlosado de piedras. La suma de estas dos cate-

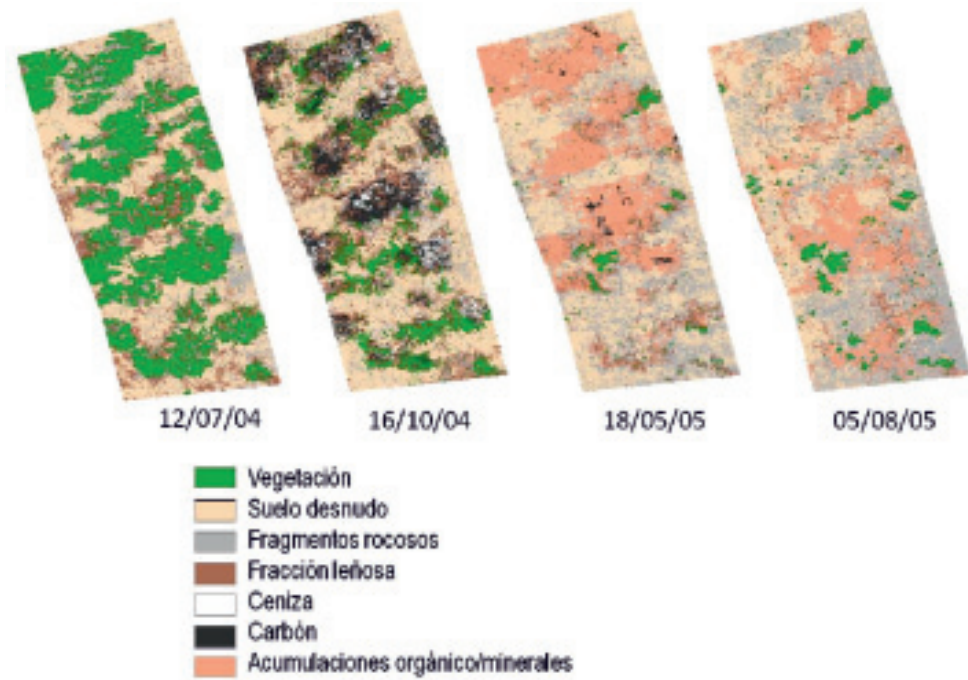


Figura 4. Imágenes clasificadas correspondientes a diferentes momentos de la secuencia temporal del ensayo aplicado en la EEP (Zaragoza).

gorías en el décimo mes después del incendio supone el 62% del total de la superficie de la parcela, mientras que antes del incendio su representación no llegaba al 50%. El incremento relativo de la cubierta de suelo desnudo en este intervalo se situó en el 21,6%, mientras que en el caso de las superficies con alta pedregosidad se produjo un aumento del 30% (Figura 4).

## DISCUSIÓN

El uso de fotografía de alta resolución espacial en combinación con el equipamiento propio de las parcelas de erosión permite el análisis de las relaciones entre los cambios en las cubiertas del suelo con la dinámica hidrogeomorfológica. El sistema FDARE permite una cuantificación precisa de las cubiertas del suelo antes del fuego y durante el proceso de recuperación de la estabilidad hidrogeomorfológica, tras una etapa de especial actividad geomorfológica (lavado y deflación de cenizas), y una cartografía de la estructura superficial con clara influencia en la respuesta hidrológica.

Como se ha señalado con anterioridad, el fuego inducido sobre la parcela experimental produjo un decremento en la cubierta de vegetación del 47,7% al 12,8% un mes después del fuego,

disminuyendo hasta un 11,9% al final de la serie. Desde el punto de vista hidrogeomorfológico, este descenso de la cubierta vegetal tuvo como consecuencia directa que los valores de flujo y sedimento se duplicaran tras el fuego al desaparecer el principal agente de intercepción de la lluvia y del flujo superficial, pasando de un coeficiente de escorrentía del 3,2% al 6,4%.

Sin embargo, aunque el fuego acelerara los procesos de escorrentía y producción de sedimento, la magnitud de estos mecanismos en los dos periodos es muy leve. La preservación del patrón espacial de la parcela, caracterizado, tanto antes como después del fuego, por un mosaico heterogéneo de zonas de generación de sedimentos y de acumulación se revela como un factor clave para explicar la escasa actividad hidrogeomorfológica.

Los efectos de la salpicadura y de la arroyada superficial tras al fuego controlado fueron los responsables del lavado de la ceniza y del carbón de la parcela analizada, dejando visible el suelo desnudo y/o las áreas de concentración de fragmentos de rocas (incrementos relativos del 21,6% y 30% de estas superficies, respectivamente), generando a partir del primer mes después del fuego, una nueva categoría formada, como se ha señalado anteriormente, por la mezcla de distintas fracciones de carbón vegetal, ceniza, hojas soflamadas y sedimentos (AOM). Esta categoría, que ocupa un 26,1% de la superficie total de la parcela al final del periodo estudiado, pero que presenta porcentajes del 30% en algunos meses, provee de una doble protección a la superficie: (i) evitando la evaporación y (ii) absorbiendo la intensidad de las gotas de lluvia, mitigando su energía cinética y, por tanto, reduciendo el efecto de la salpicadura.

El movimiento de las cenizas fue especialmente eficiente debido a su baja densidad y su fácil disolución (Cerdà y Doerr, 2008), lo que explica su desaparición transcurridos dos meses del incendio, mientras que los restos de carbón vegetal, de mayor densidad, siguen todavía presentes, conservando un porcentaje de ocupación similar al alcanzado inmediatamente después del fuego. La ceniza juega una función relevante en los procesos postincendio, dado que puede absorber los primeros eventos de precipitación. Así, la ausencia de las cubiertas de ceniza y de vegetación a partir del primer mes tras el incendio provocó un incremento relativo en la parcela de las acumulaciones orgánico/minerales de carbón, cenizas y sedimentos (AOM), consecuencia de los procesos de salpicadura y del lavado de la superficie. En relación a esto, los resultados obtenidos en investigaciones previas señalan un aumento de la infiltración y la obtención de bajas tasas de erosión inmediatamente después del fuego debido a la presencia de cenizas en el suelo (Cerdà, 1998). En nuestro caso, la escasa entidad superficial de la ceniza, en relación directa con la escasez de combustible y la baja intensidad del fuego, y la ausencia de episodios de precipitación tras el fuego, no permite evidenciar este último extremo.

En términos generales, la utilización de FDARE ha permitido identificar y cuantificar los siguientes procesos y mecanismos hidrogeomorfológicos referidos a la superficie de la parcela: i) estructura espacial en mosaico heterogéneo de parches de vegetación y suelo desnudo/enlosado y cierta organización en bandas inclinadas y transversales a la línea de máxima pendiente; ii) procesos de redistribución de sedimento con el consiguiente incremento de la pedregosidad superficial y la acumulación en sectores o parches “trampa”; iii) procesos de acumulación orgánico/minerales de sedimentos, cenizas, carbones y restos orgánicos (hojas soflamadas) en la base de las estructuras lignificadas de *Rosmarinus officinalis*, presentando valores de infiltración acusados;

iv) incremento de la mortalidad de las matas sofamadas tras el fuego y nula regeneración vegetal en los primeros meses tras el fuego; y, v) evacuación de cenizas en los primeros meses tras el fuego debido a la acción del viento.

Desde el punto de vista hidrogeomorfológico estos procesos se han traducido en una pérdida de eficacia de los mecanismos de infiltración a partir de la nueva estructura espacial de tipos de cubierta. Tras el fuego, se produce una compleja situación derivada de la variedad de comportamientos hidrogeomorfológicos de las diferentes cubiertas. Si bien es cierto que la escasa y corta presencia de acumulaciones de ceniza anima la temporal infiltración de agua en el suelo, el incremento del enlosado de piedras favorece un mayor flujo superficial (Poesen et al. 1998; Sebastián et al., 2008), que tiene como efecto el lavado y transporte de sedimentos finos. Sin embargo, la aparición de una nueva categoría representada por la mezcla de de carbón vegetal, ceniza, hojas sofamadas y sedimentos (AOM) supone, tal y como se ha comentado, además de un freno a la salpicadura, un obstáculo al transporte de flujo y sedimento, ejerciendo una labor de represamiento.

## CONCLUSIONES

El método que se propone proporciona una ventajas y resuelve limitaciones ligadas a las parcelas experimentales: i) solventa los problemas de muestreo, toda vez que la imagen vertical recoge la totalidad de la superficie de las parcelas experimentales; ii) permite cuantificar, en función de la bondad de los sistemas de clasificación digital que se utilicen, la magnitud espacial de diferentes parámetros y características internas de las parcelas, muy necesarios para el entendimiento global de la respuesta hidrogeomorfológica; iii) permite la identificación de patrones de distribución espacial de los parámetros internos a la hora de interpretar temporalmente las mediciones de flujo y sedimento; y iv) permite el reconocimiento de los niveles de severidad, tipos de cenizas, etc., así como su evolución en el tiempo, en el escenario específico del análisis de la respuesta hidrogeomorfológica tras los incendios forestales.

En términos generales, el uso de la fotografía digital de alta resolución espacial responde a la demanda de infraestructuras complementarias para el control de parámetros internos -dinámicos o no- en el marco del análisis espacial de mediciones hidrogeomorfológicas obtenidas mediante parcelas experimentales. En este sentido, la utilización conjunta de parcelas de erosión sometidas a fuegos controlados y de FDARE ha permitido controlar la respuesta hidrogeomorfológica tras el fuego y caracterizar la evolución de los productos de combustión y del proceso de regeneración vegetal.

## AGRADECIMIENTOS

Gran parte del trabajo aquí presentado han sido realizado gracias a la financiación de los siguientes proyectos de investigación, correspondientes a convocatorias oficiales de los planes de I+D+i (Ministerio de Ciencia y Tecnología) y a los Planes de Investigación, Desarrollo y Transferencia de Conocimiento (Diputación General de Aragón): CETSUS (CGL2007-66644-C04-04/HIDCLI), FIREGLOBE (CGL2008-01083/CLI).

## REFERENCIAS

- Cerdà, A. 1998. Changes in overland flow and infiltration after a rangeland fire in a Mediterranean scrubland. *Hydrological Processes*, 12, 1031-1042.
- Cerdà, A. y Doerr, S.H. 2008. The effect of ash and needle cover on surface runoff and erosion in the immediate post-fire period. *Catena*, 74, 256-263.
- Cerdà, A. y Jordán, A. 2010. Métodos para la cuantificación de la pérdida de suelo y aguas tras incendios forestales, con especial referencia a las parcelas experimentales. En: A. Cerdà y A. Jordán (Eds.), *Actualización en métodos y técnicas para el estudio de los suelos afectados por incendios forestales. Càtedra Divulgació de la Ciència - FUEGORED*. Universitat de València. Valencia. Pp.: 185-241.
- Imeson, A.C. y Prinsen, H.A.M. 2004. Vegetation patterns as biological indicators for identifying runoff and sediment source and sink areas for semi-arid landscapes in Spain. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 104, 333-342.
- López-Bermúdez, F., García-Ruiz, J.M., Romero Díaz, M.A., Ruiz Flaño, P., Martínez-Fernández, J. y Lasanta, T. 1983. Medidas de flujos de agua y sedimentos en parcelas experimentales. *Cuadernos técnicos de la S.E.G, Nº 6*. Sociedad Española de Geomorfología, Geoforma-Ediciones, Logroño, 38 pp.
- Poesen, J., Van Wesemael, B., Bunte, K. y Solé Benet, A. 1998. Variation of rock fragment cover and size along semiarid hillslopes: a case-study from southeast Spain. *Geomorphology*, 23, 323-335.
- Sebastián, M., Sesé, P., Echeverría, M.T., Lasanta, T., Pérez-Cabello, F., Ibarra, P. y de la Riva, J. 2008. Factores ambientales que controlan la producción de escorrentía y sedimento en el matorral semiárido del sector central de la Depresión del Ebro (bajo valle del Huerva). El papel de la pedregosidad, la vegetación y el suelo. *Geographicalia*, 54, 85-97.

