



2.5

Métodos para la cuantificación de la pérdida de suelo y aguas tras incendios forestales, con especial referencia a las parcelas experimentales

Artemi Cerdà¹ y Antonio Jordán²

¹Departament de Geografia, Universitat de València, Blasco Ibáñez, 28, 46010, València. artemio.cerda@uv.es

²Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola, Facultad de Química (Universidad de Sevilla), C/ Profesor García González, 1, 41012, Sevilla.

Métodos para la cuantificación de la pérdida de suelo y aguas tras incendios forestales, con especial referencia a las parcelas experimentales

Artemi Cerdà¹ y Antonio Jordán²

¹ Departament de Geografia, Universitat de València, Blasco Ibáñez, 28, 46010-València. artemio.cerda@uv.es

² Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola, Facultad de Química (Universidad de Sevilla), C/ Profesor García González, 1, 41012, Sevilla.

RESUMEN

La cuantificación de la pérdida de agua y suelo tras incendios forestales en España se ha realizado mediante distintos métodos, entre los que destacan las parcelas experimentales. Este método consiste en delimitar una superficie y cuantificar las salidas, tanto de aguas como de sedimentos en suspensión y disolución, y ha aportado información sustancial para conocer los efectos del fuego sobre el suelo. En este capítulo también se revisan otros métodos que han acompañado las mediciones de la pérdida de suelo como son las piquetas de erosión, perfiladores, levantamientos topográficos, y trampas de sedimentos. Se detallan la forma de aplicar el método, se dan algunos ejemplos de su uso, se revisan los antecedentes, y su aplicación a suelos afectados por incendios forestales.

INTRODUCCIÓN

La cuantificación de la pérdida de suelo y aguas como consecuencia de los incendios forestales en España se ha realizado básicamente a partir de mediciones mediante experimentos con lluvia simulada en parcelas de reducido tamaño, < 1 m² (Cerdà et al., 2010), así como mediante parcelas experimentales. Otros métodos, como los estudios por medio de las cuencas de drenaje son escasos (Bautista et al., 2010), mientras que las mediciones con piquetas de erosión y perfiladores están presentes en la literatura científica, si bien estas técnicas han caído en el olvido en los últimos años por el avance tecnológico, la mejora en la precisión de las mediciones, por la mayor capacidad económica de los grupos de investigación, y sobre todo porque estas técnicas son menos precisas y necesitan mediciones a largo plazo que tienen poco sentido tras la acción del fuego, donde interesa la inmediatez en la medición. Por todo ello, la opción más utilizada en estos momentos son las parcelas de erosión, aunque el resto de métodos aportan información complementaria de gran interés.

El estudio de la pérdida de suelo a partir de parcelas experimentales presenta un gran número de problemas. Según Hudson (1993), cuando se iniciaron los primeros experimentos en parcelas experimentales el análisis estadístico estaba comenzando a ser aplicado a la investigación agrícola, y desde entonces sus avances no han sido aplicados al diseño de los nuevos experimentos. Según este autor, es más corriente encontrar manuales sobre la construcción y manejo de las parcelas experimentales que sobre el diseño de experimentos. Otros autores coinciden en señalar la abundancia de errores en este tipo de trabajos debidos al error en el diseño de los experimentos (Hayward, 1968).

El proceso de erosión implica la movilización, transporte y sedimentación del material. Esto permite cuantificar el proceso ya sea midiendo el material arrancado (mediciones topográficas), el material transportado (parcelas experimentales) o el sedimentado (batimetrías de embalses). La erosión del suelo es un proceso altamente controlado por la cubierta vegetal. Por esta razón, entre otras, el fuego contribuye a un incremento de las tasas de escorrentía y pérdida de suelo. Tras el incendio, la recuperación vegetal hará que la evolución de las tasas de erosión sea muy dinámica, por lo que se requerirán técnicas de fácil instalación para poder conocer la evolución en las semanas, meses y años posteriores al incendio.

En el estudio de la erosión del suelo en zonas incendiadas, además de medirse, también se ha estimado la pérdida de material. El método para estimar la pérdida de suelo más empleado ha sido el de la Ecuación Universal de la Pérdida de Suelo, conocida como USLE por sus siglas en inglés (ver Sanroque et al., 1985; Díaz-Fierros et al., 1987). Un ejemplo de ello son los datos apartados por Rubio (1987) en los que compara zonas quemadas y zonas control en el interior de Valencia, con tasas de erosión estimadas por la USLE entre 16 y 80 veces mayores en las zonas incendiadas. Aquellos estudios pioneros aportaron la información suficiente para confirmar que las mediciones eran necesarias para conocer las tasas de erosión y así poder iniciar estrategias de control de la erosión. Sin duda, para solucionar el problema de las altas tasas de erosión y conseguir su control es necesaria su medición (Díaz-Fierros y Soto, 1998).

Además de las parcelas de erosión, uno de los primeros métodos aplicados en zonas incendiadas fueron las piquetas, agujas o clavos de erosión. Este método fue implementado primero para medir las altas tasas de erosión de los *badlands* (Sancho et al. 1991). Otros métodos desarrollados y aplicados para medir la erosión del suelo en España fueron los trazadores (Soler, 1991; Sánchez, 1995). Entre ellos el método más utilizado es el del Cs¹³⁷, el cual ha permitido a Navas y Machín (1991) estimar las tasas de erosión en distintas zonas de la depresión del Ebro. La técnica del Cs¹³⁷ se basa en la deposición de este isótopo del cesio sobre la superficie terrestre después de los ensayos con armas nucleares de los años 1950-1970. El isótopo se distribuyó por toda la estratosfera, siendo depositado después por la lluvia sobre la superficie de los continentes. Por esta razón, la cantidad de Cs¹³⁷ depositada varía a escala regional, pero se puede considerar razonablemente uniforme en áreas pequeñas. Al quedar fuertemente ligado a la materia orgánica del suelo y a las partículas de la arcilla, sufrió los mismos procesos de redistribución que estas, lo que ha permitido su uso como rastreador de los procesos de redistribución de sedimentos. Una de las razones que apoyan su uso es su precisión en el tiempo, ya que permite estudiar cambios durante períodos relativamente cortos, y en el espacio, puesto que pueden determinarse procesos a escala local. También son de destacar estudios basados en la geoarqueología, en la sedimentología o en la geomorfología, como los aplicados por Sancho et al. (1991). Pero estos métodos se ha aplicado poco a zonas recién quemadas ya que se trata de métodos destinados a medir la erosión a largo plazo, por lo que los efectos del fuego quedan enmascarados. No obstante, distintos trabajos han demostrado que durante el Holoceno, la aceleración de los procesos erosivos han estado unidos a la acción humana, y que en estas ha tenido mucho que decir el fuego, bien como herramienta de gestión forestal, bien como herramienta de fertilización del suelo agrícola mediante el artigueo y otros tipos de agricultura itinerante (García Ruiz y Valero Garcés, 1996-1997).

Uno de los mecanismos a los que menos atención se les ha prestado en los estudios de la erosión es la salpicadura, a pesar de que es evidente su importancia en la movilización de materiales. Los únicos datos existentes en zonas quemadas son los aportados por Molina y Llinares (1996), que con tazas de salpicadura de 8,5 cm de diámetro demuestran que la movilización de sedimentos es importante cuando la vegetación es reducida ya que se alcanzan valores de hasta 31 Mg ha⁻¹ año⁻¹ con lluvias de 53 mm h⁻¹ y suelo húmedo en laderas afectadas por incendios. Sin duda, este método debe ser aplicado más en zonas afectadas por incendios forestales, ya que al perderse la vegetación, la movilización de sedimentos por el impacto de la gota se hace muy importante.

Además de los métodos utilizados desde el inicio de los estudios de erosión en suelos afectados por incendios forestales en España, aquí se revisan también métodos aplicados recientemente como las trampas de sedimentos. Las denominadas *silt fences* han sido una aportación reciente de los investigadores americanos que demuestra que los estudios de erosión deben renovarse, y lo pueden hacer con instrumentos muy costosos como el escáner láser o bien mediante ideas sencillas y muy económicas de aplicar como las trampas de sedimentos. Para una información pormenorizada de los estudios de erosión en España se debe revisar la publicación de García Ruiz y López Bermúdez (2009), o bien los estudios regionales de Cerdà (2001) y Romero Díaz (2002).

En este capítulo se revisan algunos de los métodos utilizados para el estudio de la erosión del suelo, se apunta su contribución a la investigación en zonas quemadas y se aportan los resultados más destacados. Se presta atención a las medidas topográficas –piquetas, perfiladores y levantamientos topográficos– y en especial al uso de las parcelas experimentales que son en la actualidad el método más extendido, pero también a las trampas de sedimentos.

MEDIDAS TOPOGRÁFICAS

Mediante las medidas topográficas se busca la cuantificación de los cambios topográficos. Es decir la remoción del material, del suelo. En los primeros trabajos la descripción era acompañada de algunas mediciones (Francis, 1985; Gutiérrez Elorza y Rodríguez Vidal, 1985; Arnáez, 1989), y en ellos se basaron las posteriores mejoras e innovaciones, especialmente en el instrumental utilizado para la medición. El estudio de las formas y su cuantificación ha progresado desde el punto de vista técnico muy rápidamente. Un ejemplo de esa innovación es el que las mediciones con cinta métrica fueron habituales hasta bien entrados los años noventa (Ruíz-Flaño, 1993), y también la medición con piquetas. Ahora se realizan mediciones más precisas, como las llevadas a cabo por Martínez Casanovas et al. (2002), lo que le ha permitido hacer un modelo de elevación digital del terreno (MDT) de gran detalle con el que cuantificar los cambios morfológicos sufridos después de cada evento, o bien se utiliza el Laser Escáner con una resolución impensable hace una década (Staley et al., 2010). También es posible utilizar las mediciones con GPS (Higgit and Warburton, 1999; Renschler et al., 1999).

Piquetas, agujas o clavos de erosión

El uso de piquetas, agujas o clavos de erosión ha sido muy común en el estudio de suelos con altas tasas de erosión, aunque la precisión y resolución del método son reducidas, además de

estar caracterizado por favorecer la sobrevaloración de las tasas de erosión (Sancho et al. 1991). El pionero en el uso de esta técnica fue Schumm (1956a y b; 1962), quien utilizó estacas de madera para medir la evolución de superficies muy activas como son los *badlands*. No obstante, la gran revolución en la aplicación de las piquetas se produce a partir del uso de piquetas de metal y con la publicación por el *British Geomorphological Research Group* del trabajo de Haigh (1981) sobre la aplicación de las piquetas en la cuantificación de las tasas de erosión.

El método

La cuantificación de la erosión del suelo mediante piquetas, agujas o clavos de erosión consiste en insertar en el suelo piquetas de metal. Estas piquetas deben ser lo más finas posible para evitar que interfieran en los flujos de la arroyada y de la salpicadura. Se aconseja piquetas cilíndricas de acero con un diámetro de entre 3 y 4 mm con longitudes variables. En el campo se insertan mediante una maza hasta que queden ancladas a la roca madre y luego se cortan con una cizalla para que su altura sobre la superficie sea homogénea. Se aconsejan que sobresalgan 10 cm de la superficie del suelo.

El muestreo (disposición de las piquetas) dependerá de los objetivos y de la zona de estudio. En el caso de las zonas quemadas es aconsejable construir parcelas de 10 × 10 m² con piquetas colocadas cada metro (1 × 1 m²). Esto permitirá disponer de 100 puntos de medición en forma de retícula por parcela. Se deben disponer de al menos 3 parcelas para caracterizar los tramos alto, medio y bajo de las laderas. Y a ser posible disponer de parcelas control en las zonas no quemadas o en zonas donde se realicen investigaciones para comparar manejos postincendio. Es posible instalar las piquetas en zonas con regueros, pero en ese caso se aconseja que la distribución de zonas con regueros y entre regueros esté bien representada en el muestreo. No se aconseja poner piquetas a distancias menores de 50 cm entre ellas por la dificultad de la toma de las medidas y por la intensa alteración del suelo por el pisoteo durante la instalación y posteriores muestreos. Además si la red de piquetas es muy densa puede afectar a la generación de la escorrentía ya que puede interceptar sedimentos, y si hay hojarasca incluso puede formar pequeñas presas.

La medición de la altura de la piqueta se efectúa desde la base, zona de contacto con el suelo, y se debe realizar inmediatamente después de su instalación y tras cada evento de lluvia con transporte de materiales. No obstante, y debido a la baja resolución del método, debemos realizar mediciones solo tras eventos erosivos importantes. Además, el pisoteo durante la toma de medidas puede alterar el suelo y con ello las tasas de erosión. Muchas mediciones no mejoran la precisión en este método, y pueden alterar la parcela y no hacerla representativa. Una buena estrategia es realizar una medición antes de las lluvias de otoño (septiembre) y otras en primavera (marzo), para repetir las si hay un evento extraordinario en el que el rebajamiento de la superficie sea evidente. Mediciones anuales en verano también son una buena opción para estudios a largo plazo.

Este método presenta baja resolución y fue desarrollado para mediciones a largo plazo y para zonas con altas tasas de erosión. Aunque es un método poco preciso también es poco exigente en trabajo de campo. Y es un método extremadamente económico ya que los materiales son pocos y asequibles (Figura 1).



Figura 1. Materiales básicos para la instalación de una red de medición de la erosión del suelo mediante agujas, piquetas, varillas o clavos de erosión. Una maza, piquetas de acero (50 cm de altura y 3,5 mm de diámetro), como se muestra en la fotografía de la izquierda, y una cinta métrica. Vista de la forma de instalarlas y un ejemplo de cómo quedan tras cortar la piqueta sobrante. Ver marcas con cinta aislante roja en la fotografía de la derecha y comparar con la piqueta original sostenida en las manos de Artemi Cerdà.

En el caso de los incendios, al concentrarse la actividad erosiva en los meses postincendio, las piquetas deben instalarse después del fuego y cuantificarse después de cada evento. La instalación inmediata tras el incendio no ha dado buenos resultados por la presencia de cenizas, ya que sólo se puede medir la altura respecto al suelo pero si se altera la capa de cenizas se influirá en la respuesta hidrológica y erosiva del suelo. Por otra parte, este método no se ha mostrado válido para medir los cambios en la profundidad de las cenizas, lo cual hubiera sido un gran avance, porque éstas se alteran durante la instalación de las piquetas. La profundidad de las cenizas se está realizando mediante métodos destructivos y con muestreos paralelos pero no en el mismo punto de muestreo que queda destruido en la toma de cada medida (ver capítulo 3.4, Pereira et al., 2010). Se aconseja esperar a que las cenizas desaparezcan o se apelmacen para instalar las agujas, y si es posible insertarlas con el suelo húmedo. Si el incendio ocurre en verano, como es habitual, las agujas se pueden instalar entre octubre y diciembre del mismo año. Por lo tanto no serán válidas para la medición de la erosión en el inmediato postincendio. Si se instalan días después del incendio se tomará la ceniza como el nivel del suelo mineral, y una vez pérdidas las cenizas se atribuirá el rebajamiento como pérdida de suelo. Esto supondrá un grave error al sobrevalorar las pérdidas de suelo.

Las mediciones de la altura de las piquetas se realizaron con una resolución de 0,5 mm, lo que apunta a su escasa precisión. Durante la medida, el material acumulado en el contacto entre la piqueta y la superficie del suelo se debe retirar antes de la medición. Este material es fruto de la acumulación de materiales arrastrados por la arroyada, pero sobretodo del depósito de las partículas transportadas por la salpicadura e interceptadas por las agujas. Es por esto que Navarro Hevia y San Martín Fernández (2000) desarrollaron un método para cuantificar la altura de la aguja respecto a una superficie cercana pero no en la misma aguja, para evitar la alteración que esta producía. Un método muy sencillo es colocar una arandela de hierro galvanizado en la base para de esta forma homogenizar la superficie (Figura 2).

La toma de datos se debe realizar siguiendo la numeración de las piquetas. Es suficiente una plantilla en papel para tomar las notas de campo. Se aconseja repetir siempre la misma plantilla ya que la mecanización de la toma de datos ayuda a evitar errores. Tras el trabajo de campo se debe trasladar la información a una hoja de cálculo para realizar los cálculos pertinentes. Si el mues-

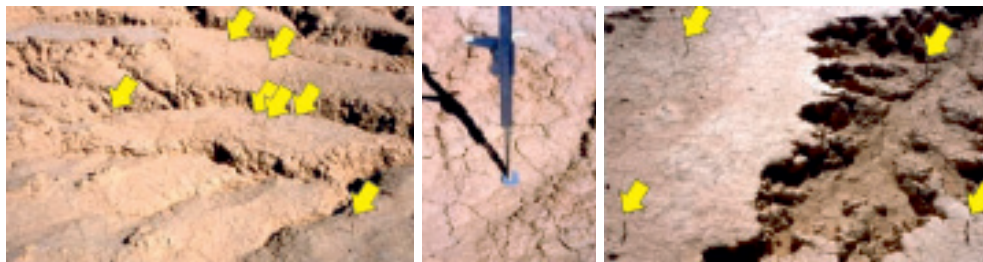


Figura 2. Ejemplo de mediciones con piquetas. A la derecha y a la izquierda se pueden apreciar las piquetas colocadas en una zona de cabecera de regueros y cárcavas de los *badlands* de la estación experimental de Lanaja. En el centro un ejemplo de medición. La arandela de hierro galvanizado sirve para uniformizar la medición. La medición se toma con pie de rey en este caso. Las flechas indican la posición de algunas piquetas. Fotografías: Carlos Sancho, Universidad de Zaragoza.

treo se ha realizado por medio de una retícula de $10 \times 10 \text{ m}^2$ se puede realizar un mapa de los cambios sufridos entre mediciones. Se pueden realizar cálculos sencillos para conocer la evolución de la topografía como se muestra en la tabla 1. En ella se ha cuantificado el rebajamiento medio en cada fila y columna del muestreo, y de toda la parcela. Así en la parcela del tramo bajo de la ladera se ha producido un rebajamiento medio de 0,74 mm, en tramo medio de 0,17 mm y en el tramo alto de 0,64 mm. Los tres primeros centímetros del suelo estudiados presentaba una densidad cercana a 1 gr cm^{-3} , lo que supone una pérdida de suelo de 7,4, 1,7 y 6,4 $\text{Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

Pero más que la pérdida neta de suelo, el método de las piquetas con muestreo en retícula o en transectos entre la cima y el fondo de valle, tiene la bondad de dar a conocer las variaciones espaciales y temporales. Si es un hándicap su escasa resolución, en cambio, el punto fuerte del método de las piquetas es su bajo coste, la posibilidad de repetir muchas medidas, y durante un largo periodo de tiempo. Un ejemplo de los cambios espaciales de la erosión se muestra en la figura 3. Otros métodos como las parcelas experimentales informarían del valor total de la pérdida de suelo en la parcela, sin conocer las variaciones espaciales o internas de las parcelas. Las piquetas de erosión pueden ayudar a transformar el modelo de caja negra que son las parcelas en un modelo de caja gris ya que se dispone de información de lo que ocurre dentro de ellas. En los gráficos de la figura 3 se aprecia una erosión mayor en la parte central de la parcela de la parte baja de la ladera. Eso fue debido a la escorrentía procedente de las partes medias y altas de la ladera, que mediante flujo subsuperficial llegaba a la parte baja. Esa arroyada superficial no llegó a formar regueros pero si a erosionar una media de 3 mm de suelo en un año mediante erosión por arroyada difusa. En la parte alta y media de la ladera, donde el proceso de erosión no está tan organizado debido a que las arroyadas se infiltran en zonas que actúan como sumideros, se mostró un patrón de zonas de sedimentación y zonas de erosión.

Antecedentes

Los primeros trabajos realizados en España con Piquetas de erosión fueron llevados a cabo en Granada por Helen Scoging (1982a; 1982b). A partir de dos muestreos durante el año hidrológico 1975-1976 encontró que las tasas de erosión oscilaban ampliamente debido a las variacio-

MÉTODOS PARA LA CUANTIFICACIÓN DE LA PÉRDIDA DE SUELO Y AGUAS TRAS
INCENDIOS FORESTALES, CON ESPECIAL REFERENCIA A LAS PARCELAS EXPERIMENTALES

Tabla 1. Cambios en la topografía del suelo cuantificada mediante piquetas tras el incendio de Bixquert de 2005 y en 2006. La tabla muestra las medidas individuales medidas en una retícula de 10 x 10 m² tomadas cada 1 m de distancia. Se muestra el cambio (mm), la suma de los cambios en cada fila y columna de la retícula y el promedio de cada fila y columna. Se distingue entre la parte baja, media y alta de la ladera.

Eje horizontal / eje vertical (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Suma	Media
BAJA												
1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	-1	2	0,2
2	0	0	1	0	0	0	0	-1	-3	-3	-6	-0,6
3	1	0	0	0	1	0	0	-3	-2	-1	-4	-0,4
4	0	0	0	0	0	-2	-2	-6	-1	0	-11	-1,1
5	0	-1	0	0	-4	-2	-5	-2	0	0	-14	-1,4
6	0	0	-4	-6	-6	-5	0	0	0	0	-21	-2,1
7	0	0	-5	-3	0	0	0	0	0	0	-8	-0,8
8	-1	-6	-3	0	0	0	1	0	1	0	-8	-0,8
9	-6	-3	0	1	1	0	0	0	1	1	-5	-0,5
10	-5	0	1	0	0	1	0	1	2	1	1	0,1
Suma	-10	-9	-10	-8	-8	-7	-6	-11	-2	-3	-74	-7,4
Media	-1	-0,9	-1	-0,8	-0,8	-0,7	-0,6	-1,1	-0,2	-0,3	-7,4	-0,74
MEDIA												
1	0	0	0	0	0	-3	0	3	0	0	0	0
2	1	2	1	0	0	-2	4	-2	-5	1	0	0
3	0	0	1	-1	1	0	0	-4	-3	-3	-9	-0,9
4	1	-1	0	0	0	1	0	-1	0	1	1	0,1
5	0	-5	-3	0	2	6	0	0	0	1	1	0,1
6	0	-4	1	-1	-5	0	0	-3	0	0	-12	-1,2
7	0	-2	0	0	1	3	1	1	1	-1	4	0,4
8	1	0	4	5	-2	0	0	-3	0	0	5	0,5
9	1	0	0	0	0	1	2	1	-5	-3	-3	-0,3
10	-2	0	1	3	0	0	0	0	-4	-2	-4	-0,4
Suma	2	-10	5	6	-3	6	7	-8	-16	-6	-17	-1,7
Media	0,2	-1	0,5	0,6	-0,3	0,6	0,7	-0,8	-1,6	-0,6	-1,7	-0,17
ALTA												
1	0	0	0	0	0	-3	0	3	0	0	0	0
2	1	2	1	0	0	-2	-1	-2	-5	1	-5	-0,5
3	0	0	1	0	1	0	-5	-4	-3	-3	-13	-1,3
4	1	-1	0	-1	0	1	-4	-1	0	1	-4	-0,4
5	0	-5	-3	-5	2	6	-2	0	0	1	-6	-0,6
6	0	-4	1	-4	-5	0	0	-3	0	0	-15	-1,5
7	0	-2	0	-2	1	-1	1	1	1	-1	-2	-0,2
8	1	0	4	0	-2	-5	0	-3	0	0	-5	-0,5
9	1	0	0	0	0	-4	2	1	-5	-3	-8	-0,8
10	-2	0	1	3	0	-2	0	0	-4	-2	-6	-0,6
Suma	2	-10	5	-9	-3	-10	-9	-8	-16	-6	-64	-6,4
Media	0,2	-1	0,5	-0,9	-0,3	-1	-0,9	-0,8	-1,6	-0,6	-6,4	-0,64

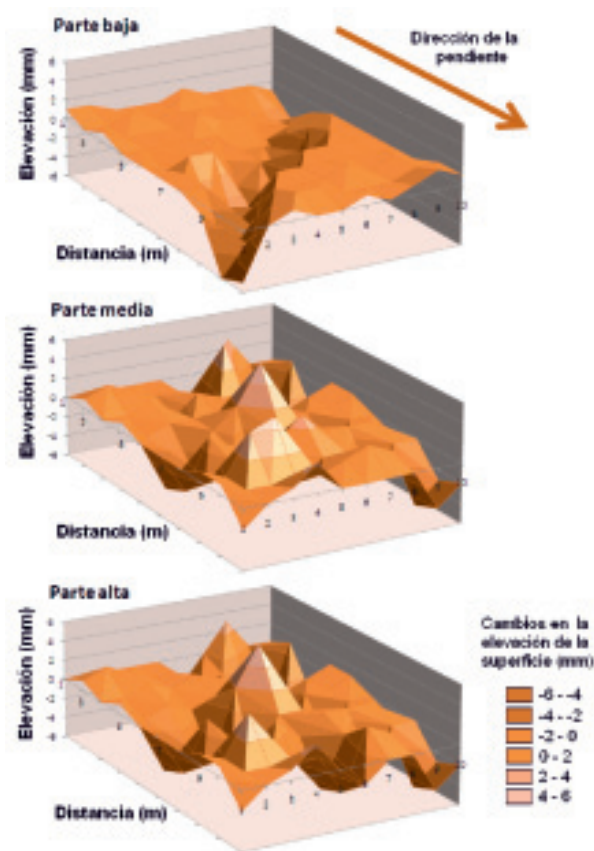


Figura 3. Pérdida de suelo en las laderas de Bixquert entre octubre de 2005 y octubre de 2006 medidas con piquetas instaladas cada 10 metros en una retícula de 10×10 . Las piquetas se instalaron cuando el suelo perdió las cenizas y aumentó en humedad con las lluvias otoñales, lo que favoreció una mejor instalación de las piquetas.

nes estacionales: de 1 a 40 Mg ha^{-1} en la misma parcela. Y también se mostraron variaciones espaciales importantes fruto de las diferencias en cubierta vegetal, roquedo o pendiente. Se estimaron tasas de erosión para el año de estudio entre 36 y $90 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (Tabla 2).

El primer autor español que realizó mediciones con piquetas de erosión fue María Sala en las estaciones de Santa Fe y La Castanya en el Montseny (Sala, 1988). En los suelos de Santa Fe (granitos) midió tasas de erosión de $15 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ entre noviembre de 1982 y febrero de 1984, mientras que en La Castanya (pizarras) las tasas fueron mucho mayores: $195 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. El año 1982 fue muy lluvioso y eso hizo que las tasas de ese año alcanzasen las $510 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. La propia autora destaca en su publicación (Sala, 1988, Catena Supplement, 12, página 21) que posiblemente por la profundidad del suelo las agujas no estaban bien insertadas y que las tasas estarían exageradas. Ese problema, como el hinchamiento-des-hinchamiento de los suelos, ha sido muy tenido en cuenta para explicar

tasas de erosión sobrevaloradas por el método de las piquetas. Es importante, por lo tanto, que las piquetas estén bien insertadas y para ello es mejor partir de una piqueta de 50 cm, se clava tanto como sea posible, y se corta la parte de la piqueta que supere los 10 cm.

Otras medidas tomadas con piquetas, también en Catalunya, confirmaban las altas tasas de erosión. Ese es el caso de los trabajos de Porta et al. (1989) en derrubios de minas, donde durante 4 meses midió tasas entre 119 y 507 Mg ha^{-1} , que extrapoladas a todo un año pueden transformarse en valores que oscilan entre 357 y $1521 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

A principios de la década de los 90 se inician las publicaciones, aunque las mediciones se habían iniciado años antes, del grupo de investigación del Departamento de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Zaragoza, el grupo que más ha utilizado las piquetas de erosión (Benito et al. 1991; 1992; 1993). Sus trabajos en *badlands* han demostrado como estos espacios sumi-

MÉTODOS PARA LA CUANTIFICACIÓN DE LA PÉRDIDA DE SUELO Y AGUAS TRAS
INCENDIOS FORESTALES, CON ESPECIAL REFERENCIA A LAS PARCELAS EXPERIMENTALES

Tabla 2. Mediciones de la tasa de erosión mediante piqueta, agujas o clavos de erosión en España.
¹densidad del suelo 1,6 gr cm⁻³, ²las mediciones con piquetas pueden mostrar periodos acumulación.

Autor	Año	Periodo	TE Mg ha ⁻¹	TE Mg ha ⁻¹ año ⁻¹	Características
Scoging	1982b	10/1975-05/1976	21	35	Ugijar-Badlands
Scoging	1982b	10/1975-05/1976	11	18	Ugijar-Badlands
Scoging	1982b	10/1975-05/1976	1	2	Ugijar-Badlands
Scoging	1982b	10/1975-05/1976	23	40	Ugijar-Badlands
Scoging	1982b	05/1976-10/1976	16	37	Ugijar-Badlands
Scoging	1982b	05/1976-10/1976	19	46	Ugijar-Badlands
Scoging	1982b	05/1976-10/1976	40	96	Ugijar-Badlands
Scoging	1982b	05/1976-10/1976	67	161	Ugijar-Badlands
Scoging	1982b	10/1975-10/1976	36	36	Ugijar-Badlands
Scoging	1982b	10/1975-10/1976	30	30	Ugijar-Badlands
Scoging	1982b	10/1975-10/1976	41	41	Ugijar-Badlands
Scoging	1982b	10/1975-10/1976	90	90	Ugijar-Badlands
Scoging	1982b	10/1975-10/1976	36-90	36-90	Ugijar-Badlands
Sala	1988	11/82-2/84		195	Pizarras (La Castanya)
Sala	1988	1982		510	Pizarras (La Castanya)
Sala	1988	11/82-2/84		15	Granito (Santa Fe)
Porta et al.	1989	3/1987-7/1987	261	783	Derrubios mineros (Rills)
Porta et al.	1989	3/1987-7/1987	507	1521	Derrubios mineros (Rills)
Porta et al.	1989	3/1987-7/1987	138	414	Derrubios mineros (Rills)
Porta et al.	1989	3/1987-7/1987	146	438	Derrubios mineros (Rills)
Porta et al.	1989	3/1987-7/1987	500	1500	Derrubios mineros (Rills)
Porta et al.	1989	3/1987-7/1987	119	357	Derrubios mineros (Rills)
Porta et al.	1989	3/1987-7/1987	156	468	Derrubios mineros (Rills)
Porta et al.	1989	3/1987-7/1987	200	600	Derrubios mineros (Rills)
Benito et al.	1991		39,6	190	Incendio (2 meses después)
Benito et al.	1991		48	26	Incendio (2-6 meses después)
Benito et al.	1991		56	13	Incendio (6-12 meses después)
Benito et al.	1991			2	Incendio (>12 meses después)
Meaza et al.	1994	1992		49	Deforestado
Meaza et al.	1994	1992		56	Deforestado
Meaza et al.	1994	1992		72	Deforestado
Meaza et al.	1994	1992		0	Pinar
Meaza et al.	1994	1992		71	Deforestado
Arnáez y Larrea ¹	1995	1992	83	83	Taludes de pistas forestales
Arnáez y Larrea ¹	1995	1992	+9,28 ²	+9,28 ²	Taludes de pistas forestales
Arnáez y Larrea ¹	1995	1992	146	146	Taludes de pistas forestales
Arnáez y Larrea ¹	1995	1992	134	134	Taludes de pistas forestales

continúa en pág. siguiente >

Autor	Año	Periodo	TE Mg ha ⁻¹	TE Mg ha ⁻¹ año ⁻¹	Características
Arnáez y Larrea ¹	1995	1993	0	0	Taludes de pistas forestales
Arnáez y Larrea ¹	1995	1993	30	30	Taludes de pistas forestales
Arnáez y Larrea ¹	1995	1993	70	70	Taludes de pistas forestales
Arnáez y Larrea ¹	1995	1992-1993	9	5	Taludes de pistas forestales
Arnáez y Larrea ¹	1995	1992-1993	176	88	Taludes de pistas forestales
Arnáez y Larrea ¹	1995	1992-1993	205	102	Taludes de pistas forestales
Arnáez y Larrea ¹	1995	1992-1993		+4 ²	Taludes de pistas forestales
Arnáez y Larrea ¹	1995	1992-1993		88	Taludes de pistas forestales
Arnáez y Larrea ¹	1995	1992-1993		102	Taludes de pistas forestales
Cerdà y Payà	1995	22/05/91-29/02/92	+71 ²	+95 ²	<i>Badlands</i> (arcillas)
Cerdà y Payà	1995	29/02/92-05/10/93	86	52	<i>Badlands</i> (arcillas)
Cerdà y Payà	1995	22/05/91-05/10/93	22	10	<i>Badlands</i> (arcillas)
Sirvent et al.	1996	06/1991-05/1995		86	<i>Badlands</i> (La Naja 1)
Sirvent et al.	1996	06/1991-05/1995		78	<i>Badlands</i> (La Naja 2)
Sirvent et al.	1996	06/1993-05/1995		63	<i>Badlands</i> (Las Bardenas 1)
Sirvent et al.	1996	06/1993-05/1995		21	<i>Badlands</i> (Las Bardenas 2)
Ternan et al.	1996	26/06/1993-17/09/1994	147	117	Matorral degradado
Ternan et al.	1996	26/06/1993-17/09/1994	32	25	Matorral degradado
Ternan et al.	1996	26/06/1993-17/09/1994	191	153	Matorral degradado
Ternan et al.	1996	26/06/1993-17/09/1994	15	12	Matorral degradado
Ternan et al.	1996	26/06/1993-17/09/1994	20	16	Matorral degradado
Ternan et al.	1996	26/06/1993-17/09/1994	55	44	Matorral degradado
Ternan et al.	1996	26/06/1993-17/09/1994	87	70	Cárcava
Ternan et al.	1996	26/06/1993-17/09/1994	61	49	Cárcava
Ternan et al.	1996	26/06/1993-17/09/1994	29	23	Terraza
Ternan et al.	1996	26/06/1993-17/09/1994	27	22	Terraza
Ternan et al.	1996	26/06/1993-17/09/1994	70	56	Terraza
Ternan et al.	1996	26/06/1993-17/09/1994	46	37	Terraza
Sirvent et al.	1997	1991-1993		208	<i>Badlands</i> (regueros)
Sirvent et al.	1997	1991-1993		10	<i>Badlands</i> (entre-regueros)
Sirvent et al.	1997	1991-1993		156	<i>Badlands</i> (regueros)
Sirvent et al.	1997	1991-1993		114	<i>Badlands</i> (entre-regueros)
Edeso et al.	1998	07/1993-09/1994		16	Tala
Edeso et al.	1998	07/1993-09/1994		54	Tala con extracción
Edeso et al.	1998	07/1993-09/1994		70	Tala con extracción y arado
Navarro Hevia et al.	2000	1996-1997		1093	Talud de ferrocarril antiguo
Navarro Hevia et al.	2000	1996-1997		594	Talud de ferrocarril nuevo
Navarro Hevia et al.	2000	1998		68	Talud de ferrocarril umbría

nistran una gran cantidad de sedimentos. Tasas de erosión por encima de los $100 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ son habituales e incluso se alcanzan valores puntualmente de hasta $500 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Este mismo grupo aporta mucha información sobre tasas de erosión en zonas de regueros ($156\text{-}208 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$), y entre regueros ($10\text{-}21 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) (Sirvent et al., 1996; 1997). Las tasas de erosión medidas en La Naja y en las Bardenas han estado por debajo de las $100 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (Figura 2). La mejora en el conocimiento de la técnica y la información generada por el grupo de investigación de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Zaragoza ha permitido que las piquetas hayan sido utilizadas por distintos grupos. Meaza et al. (1994) y Edeso et al. (1998) comprobaron mediante piquetas de erosión como las tasas de erosión aumentan drásticamente después de la tala (de 0 a $49\text{-}72 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$), y que depende claramente de como se haya realizado ésta (de 16 a $70 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$), ya sea sin, con extracción de la madera, o con extracción y subsolado. Esta es una gran lección para los estudios de la erosión postincendio, ya que habitualmente se implementan programas de actuación tras el incendio en el que la extracción de la madera está presente.

Debido a la baja resolución del método de las piquetas, las zonas con altas tasas de erosión son las únicas en las que se pueden o deben utilizarse, por ello han sido muy extendidos su uso en los *badlands* del sudeste peninsular. En *badlands* sobre arcillas del Keuper se han medido tasas de erosión de hasta $95 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en un periodo erosivo, mientras que en un periodo anterior se produce una ganancia de $52 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (Cerdà y Payà, 1995). Esto no es debido a que son zonas de sedimentación o transporte como los *pediments* de los *badlands* sino que se debe al hinchamiento del material que hace que se produzca un balance positivo cuando el suelo está húmedo. Para un periodo de un año el balance erosivo de estas laderas de *badlands* es negativo ($10 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$). Con las piquetas de erosión también es posible medir sedimentación (valores positivos) como se muestra en la tabla 1 y figura 3.

Mediciones en zonas afectadas por incendios forestales

Los trabajos del grupo de investigación de la Universidad de Santiago de Compostela con Francisco Díaz-Fierros a la cabeza empezaron a utilizar piquetas para medir las tasas de erosión en zonas afectadas por incendios a finales de los años 80. Benito *et al.*, (1991) encontró como después del incendio las tasas de erosión son muy altas ($190 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en los primeros 2 meses) para descender progresivamente hasta las $2 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ un año después (Tabla 3). Díaz-Fierros et al. (1994) encontró como las tasas de erosión seguían esa misma tendencia aunque las mayores tasas de erosión se midieron unos meses después y no es hasta el segundo año cuando las tasas se reducen claramente.

Otro autor que encuentra periodos de pérdidas y de ganancias de suelo mediante piquetas es Pérez Cabello (2001) en una zona incendiada en Aragón. Durante los primeros 8 meses después del incendio midió $58,74 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, cálculo realizado a partir de una hipotética densidad del suelo de $1,1 \text{ g cm}^{-3}$. Sin embargo, durante los siguientes 20 meses se produjo la recuperación del suelo con una tasa de acreción calculada de unas $50 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Estos cambios no se deben sólo a la actividad de los procesos erosivos, sino que en ellos tiene mucho que decir el hinchamiento-deshinchamiento del suelo por cambios en humedad y temperatura.

Tabla 3. Mediciones de la tasa de erosión mediante piqueta, agujas o clavos de erosión en suelos afectados por incendios forestales. ¹densidad del suelo en 0,6 gr cm³, ²densidad del suelo en 1,1 gr cm³.

Autor	Año	Periodo	Erosión Mg ha ⁻¹	Erosión Mg ha ⁻¹ año ⁻¹	Tiempo tras el incendio
Benito et al.	1991		39,6	190	2 meses
Benito et al.	1991		48	26	2-6 meses
Benito et al.	1991		56	13	6-12 meses
Benito et al.	1991			2	>12 meses
Díaz-Fierros et al. ¹	1991	9/88-	2	9	100 días
Díaz-Fierros et al. ¹	1991	9/88-	3	6	180 días
Díaz-Fierros et al. ¹	1991	9/88-	14	22	235 días
Díaz-Fierros et al. ¹	1991	9/88-	8	7	400 días
Díaz-Fierros et al. ¹	1991	9/88-	1	1	455 días
Díaz-Fierros et al. ¹	1991	9/88-	3	2	555 días
Díaz-Fierros et al. ¹	1991	9/88-	4	15	100 días
Díaz-Fierros et al. ¹	1991	9/88-	2	4	180 días
Díaz-Fierros et al. ¹	1991	9/88-	12	18	235 días
Díaz-Fierros et al. ¹	1991	9/88-	7	6	400 días
Díaz-Fierros et al. ¹	1991	9/88-	3	2	455 días
Díaz-Fierros et al.	1991	9/88-	0	0	555 días
Pérez-Cabello ²	2001	4 meses	5,5	16,5	4 meses
Pérez-Cabello ²	2001	4 meses	14,08	42,24	8 meses
Pérez-Cabello ²	2001	4 meses	13,64	40,92	12 meses
Pérez-Cabello ²	2001	4 meses	0,055	0,17	16 meses
Pérez-Cabello ²	2001	4 meses	3,3	9,9	20 meses
Pérez-Cabello ²	2001	4 meses	2,31	6,93	24 meses
Pérez-Cabello ²	2001	4 meses	2,42	7,26	28 meses

Validez del método

Si algo se sabía antes de empezar a estudiar el proceso de erosión con piquetas es que se debe aplicar este método allí donde las tasas de erosión son altas, ya que la precisión del método es escasa. Por lo tanto, medir con piquetas en zonas vegetadas, donde las tasas de erosión son reducidas, es un error, ya que cambios por hinchamiento del suelo o los errores de medida serán más importantes que los cambios producidos por la erosión. En medios muy activos como los taludes de carretera las tasas de erosión si pueden ser medidas con piquetas. Arnáez y Larrea (1994; 1995) estudiaron el proceso en los taludes de las pistas forestales y allí encontraron que durante dos años hay zonas donde las pérdidas han sido de 102 y 88 Mg ha⁻¹ año⁻¹, aunque también hay ambientes en los que por redistribución de los sedimentos a lo largo de la ladera puede haber una ganancia de material en algunos puntos. Las mayores tasas de erosión medidas en España a partir de piquetas se encontraron en los derrubios de minas en Barcelona (Porta et al.

1989) y en los *badlands* (Benito et al., 1992). Otra zona con altas tasas de erosión es la afectada por la construcción de taludes de ferrocarril estudiadas por Navarro Hevia et al. (2000) en Palencia donde las altas pendientes favorecen tasas de erosión de hasta $1093 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ comprobándose como el paso de los ferrocarriles a alta velocidad favorece movimientos en masa que elevan extraordinariamente las tasas de erosión. En las zonas situadas en la umbría las tasas de erosión son menores ($23,3 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) debido a la mayor humedad, lo que hace suponer que los movimientos en masa deben ser en seco. Las tasas de erosión fueron de $594 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en 1998. Esos ejemplos demuestran que las piquetas son un buen método allí donde la erosión del suelo es muy activa, pero que es un método poco válido donde las tasas son bajas ya que su precisión es escasa.

Los datos que hasta el momento se tienen sobre erosión hídrica medida a partir de piquetas de erosión se caracterizan por el reducido tiempo de muestreo, a pesar de que es un magnífico método para mediciones a largo plazo. En muchas ocasiones se extrapola datos mensuales a anuales, cuando lo lógico para una técnica tan poco precisa debería ser que los datos se obtuviesen a partir de periodos de medición de al menos una década. Es de destacar que cuando las mediciones se realizan en suelos muy erosionables los datos pueden ser fiables, pero en suelos muy estables este método presenta una gran deficiencia por su baja resolución y precisión. Otros autores se han apoyado en esta técnica para cuantificar los cambios en cárcavas de fondo de valle donde los procesos de incisión-agradación son extremadamente activos (Schnabel et al., 1998). También ha sido habitual el uso de las piquetas en zonas con cárcavas y regueros (Figura 2).

Las piquetas de erosión en particular, y los métodos basados en levantamientos topográficos en general, han aportado información de interés durante eventos extremos, cuando las tasas de erosión son tan altas que otros métodos fallan. Un ejemplo relevante de la dificultad que otros métodos tienen con tasas de erosión altas lo tenemos en los *badlands*, donde aforadores, y especialmente muestreadores de sedimentos funcionan en contadas ocasiones. Así, Cantón et al. (2001) apuntan a las lluvias extraordinarias del 1 de octubre de 1997 (130 mm en Almería) como las causantes de incisiones de hasta 80 mm en los regueros de los *badlands* del Desierto de Tabernas. Durante estas fuertes crecidas los instrumentos de medición tienen algunas dificultades, los colectores Gerlach se desbordan, e incluso alguna estación de aforo es arrancada de su emplazamiento. Las piquetas de erosión muestran en estas condiciones la mejor respuesta.

En el caso de los incendios forestales, sólo se aconseja utilizar piquetas de erosión en los casos de que los incendios generen altas tasas de erosión. Habitualmente, las tasas de erosión postincendio no son lo suficientemente elevadas para utilizar piquetas de erosión, por lo que se aconsejan otros métodos. No obstante, las piquetas se pueden utilizar en aquellas zonas donde se prevean pérdidas de suelo elevadas, precisamente donde otros métodos como las parcelas experimentales tendrán problemas para cuantificar con precisión la elevada carga sedimentaria de la arroyada. Un problema metodológico añadido viene dado por que los estudios en zonas quemadas requieren el estudio paralelo de una zona control y/o además de cuantificar los cambios en el tiempo. Ello supone que las piquetas de erosión no serán válidas para las parcelas control, o en la zona quemada pasados unos años, debido a que las tasas de erosión no se podrán cuantificar con un método de tan baja precisión como el de las piquetas. Utilizar un método para



Figura 4. Ejemplos de perfiladores utilizados en las estaciones experimentales de Lanaja y Castillo de Orús en Aragón. Estos instrumentos se han utilizados en regueros y entreregueros. A la derecha Gerardo Benito ejerce de escala. Fotografías: Carlos Sancho, Universidad de Zaragoza.

la zona quemada (piquetas) y uno para la zona control (por ejemplo parcelas) supondrá un problema añadido por que el proceso de erosión es dependiente de la escala, y esos métodos cuantifican la pérdida de suelo a escalas distintas y sus resultados serán poco comparables.

Perfiladores y levantamientos topográficos

Los perfiladores y los levantamientos topográficos pretenden, como las agujas de erosión, cuantificar los cambios en la topografía. A partir de una medición inicial se estudian los cambios en el relieve mediante mediciones sucesivas. Estos métodos no han sido utilizados salvo puntualmente en zonas incendiadas, pero es de interés para el investigador conocerlos por si es necesario utilizarlos en zonas afectadas por el fuego. Lo efímero de los procesos erosivos en el postincendio hace necesario disponer de distintas herramientas para poder cuantificar la pérdida de suelo.

El método

Los perfiladores (o microperfiladores) permiten medir los cambios microtopográficos en dos o tres dimensiones a partir de la localización de unos puntos fijos de muestreo y la toma repetitiva de mediciones en el tiempo (Figura 4). Los perfiladores constan de varillas móviles que se acoplan a la morfología del suelo con lo que permite identificar el rebajamiento o la acreción dentro del perfil de estudio. Un detallado análisis del uso de los perfiladores lo podemos encontrar en Benito et al. (1988) y Sancho et al. (1991) (Figuras 4 y 5). Al menos son necesarias dos mediciones en el tiempo para medir las tasas de erosión mediante este método. Sin embargo, un sólo muestreo permite conocer la forma y a partir de ella intuir la actividad del proceso erosivo. Un buen ejemplo del uso de perfiladores lo tenemos en el trabajo de Bochet (1996). En él, el perfilador permite comprobar cómo las matas de *Stipa tenacissima* favorecen el desarrollo de montículos de casi 20 cm de altura respecto a zonas colindantes, mientras que *Romarinus officinalis* lo hace con casi 15 cm.

Sin duda, el grupo de investigadores que han conseguido desarrollar esta técnica en España ha sido el grupo de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Zaragoza (Benito et al., 1991; 1992; 1993; Sirvent et al., 1997). Distintos trabajos realizados en *badlands* han mostrado como las tasas de erosión medidas con este método superan las 100 Mg ha⁻¹ año⁻¹ y pueden llegar a estar cerca de las 500 Mg ha⁻¹ año⁻¹. Los estudios de Benito et al. (1991) también demuestran

MÉTODOS PARA LA CUANTIFICACIÓN DE LA PÉRDIDA DE SUELO Y AGUAS TRAS
INCENDIOS FORESTALES, CON ESPECIAL REFERENCIA A LAS PARCELAS EXPERIMENTALES

Tabla 4. Mediciones de la tasa de erosión mediante perfiladores en suelos de *badlands*. ¹densidad del suelo en 1,6 gr cm⁻³.

Autor	Año	ppm	pp	Periodo	Erosión Mg ha ⁻¹ año ⁻¹	Características
Benito et al.	1991	650		11/1987-7/1990	340,00	entre-regueros
Benito et al.	1991	650		11/1987-7/1990	200-240	entre-regueros
Benito et al.	1991				128-272 ¹	ladera
Benito et al.	1991				48-144 ¹	valle
Benito et al.	1992	650	420	12/1987-7/1988	216,00	<i>Badlands</i>
Benito et al.	1992	650	174	7/1988-3/1989	36,00	<i>Badlands</i>
Benito et al.	1992	650	420	12/1987-7/1988	497,14	<i>Badlands</i>
Benito et al.	1992	650	174	7/1988-3/1989	292,50	<i>Badlands</i>
Benito et al.	1993	650		11/1987-7/1990	160-288	<i>Badlands</i>
Benito et al.	1993	650		11/1987-7/1990	160-470	<i>Badlands</i>
Sirvent et al.	1997	320	617	1991-1993	206,20	<i>Badlands</i> (5°)
Sirvent et al.	1997	320	617	1991-1993	304,20	<i>Badlands</i> (23°)

como las tasas de erosión son mayores en la ladera que en el valle, donde lejos de producirse acreción también se mantienen tasas de erosión elevadas (Tabla 4). Sirvent et al. (1997) insisten en la elevada actividad geomorfológica de los *badlands* y confirma que las zonas con mayores pendientes tienen también tasas de erosión más altas.

Un sistema similar al de las piquetas y los perfiladores es el de los levantamientos topográficos (Figura 5). Si los primeros tomaban medidas puntuales, y los segundos medidas a escala de metros, los levantamientos topográficos lo hacen a muy variadas escalas, aunque normalmente se aplican a escala de ladera (regueros) o valle (incisiones en el cauce). Los primeros estudios de los que tenemos noticia a partir de levantamientos topográficos son los de Porta et al. (1989) en derrubios de minas en Catalunya, donde la reconstrucción de las cárcavas después de 8 años



Figura 5. Levantamiento topográfico en parcelas afectadas por incendios forestales en las Montañas Rocosas, Colorado, EEUU. John Moody desarrolló este artilugio completamente transportable para cuantificar los cambios topográficos sin pisar el suelo. Fotografías Deborah Martin y José Reyes Ruiz Gallardo.

demostraban que las tasas de erosión medias oscilaron entre 136 y 389 Mg ha⁻¹ año⁻¹. Estas altas tasas de erosión no se han medido en otros ambientes a pesar de que se han aplicado levantamientos topográficos en distintas zonas de cárcavas.

Una de las zonas más y mejor estudiadas es la cárcava formada en el cauce de la cuenca experimental de Guadalperalón estudiada por Schnabel et al., (1996) en Cáceres. Allí se ha comprobado que las tasas de erosión han estado normalmente por debajo de 1 Mg ha⁻¹ año⁻¹, aunque durante un periodo de sequía con la vegetación agostada las tasas de erosión se dispararon hasta 18 Mg ha⁻¹ año⁻¹. Otra zona de estudio importante es la de la estación experimental de la Higuera en Santa Olalla en Toledo. Allí, los trabajos de De Alba (1998) han permitido comprobar cómo las tasas de erosión por arroyada concentrada son mucho mayores que las tasas de erosión producidas por las escorrentías difusas. En una sola tormenta, el 23 de agosto de 1995, se produjo la pérdida de 39 Mg ha⁻¹ año⁻¹ en los campos de cultivo estudiados al producirse la incisión de cárcavas en el terreno.

Los trabajos aquí presentados apunta a que en estos métodos deben aplicarse sólo durante eventos extremos o en zonas muy erosionables. Este método es un complemento ideal para otras medidas de erosión en zonas afectadas por incendios forestales. Así, es conveniente tomar medidas topográficas antes del incendio o inmediatamente después de éste para volverlas a repetir cuando se produzca un evento erosivo importante.

Antecedentes

Los estudios a partir de perfiladores y levantamientos topográficos se han mostrado muy prácticos para el estudio de los cambios morfológicos de cárcavas y con ello de la estimación de las tasas de erosión de las laderas y cuencas de drenaje a las que pertenecen. En España el número de mediciones es escaso y se deben potenciar en el futuro ya que ofrecen unos magníficos datos sobre las tasas de erosión a largo plazo. Establecer una red de mediciones recurrentes de los cambios morfológicos de las cárcavas -las zonas más activas- puede ser clave para entender la evolución geomorfológica de muchas laderas y cuencas de drenaje. Y esa información será de gran valor en los suelos afectados por incendios forestales ya que las cárcavas y regueros se activan tras el fuego. Además, estos métodos permiten cuantificar también la sedimentación, mecanismo que también se activa al acelerarse el proceso erosivo.

Una forma de realizar levantamientos topográficos para medir la pérdida de suelo es cuantificar el volumen de los sedimentos removidos por la arroyada a partir de las formas que deja la arroyada: regueros y cárcavas. Ferre y Senciales (1990) midieron tasas de erosión muy elevadas, entre 95 y 1118 Mg ha⁻¹ año⁻¹, después de un periodo de lluvias extraordinarias en 1989 en los Montes de Málaga. Destacan que esta aplicación del método de medición no cuantifica la sedimentación a lo largo de la ladera y puede por ello exagerar las tasas, pero cuantifica con precisión el material exportado. Porta et al. (1989) encuentra en los derrubios de minas en Barcelona tasas de erosión que oscilan entre 136 y 234 Mg ha⁻¹ año⁻¹ (215 Mg ha⁻¹ año⁻¹ en valor medio) mientras que las tasas de erosión medidas con colectores son ligeramente inferiores (159 Mg ha⁻¹ año⁻¹). Los estudios de la dinámica de las cárcavas a partir de levantamientos topográficos fueron progresivamente abandonados a lo largo de los años 90, aunque se han retomado para estudios donde otros méto-

MÉTODOS PARA LA CUANTIFICACIÓN DE LA PÉRDIDA DE SUELO Y AGUAS TRAS
INCENDIOS FORESTALES, CON ESPECIAL REFERENCIA A LAS PARCELAS EXPERIMENTALES

Tabla 5. Mediciones de la tasa de erosión de erosión mediante levantamientos topográficos en suelos afectados por incendios forestales.

Autor	Año	Periodo	Erosión Mg ha ⁻¹	Erosión Mg ha ⁻¹ año ⁻¹	Tema
Porta et al.	1989	8 años		171,92	Derrubios mineros
Porta et al.	1989	8 años		193,41	Derrubios mineros
Porta et al.	1989	8 años		164,76	Derrubios mineros
Porta et al.	1989	8 años		389,20	Derrubios mineros
Porta et al.	1989	8 años		136,10	Derrubios mineros
Porta et al.	1989	8 años		234,00	Media
Ferre y Senciales	1990	14-26/11/1989	1077		Filitas, Almendral
Ferre y Senciales	1990	14-26/11/1989	377		Filitas, Almendral
Ferre y Senciales	1990	14-26/11/1989	557		Filitas, Almendral
Ferre y Senciales	1990	14-26/11/1989	95		Filitas, Almendral
Ferre y Senciales	1990	14-26/11/1989	134		Margas, Cereal-Barbecho
Ferre y Senciales	1990	14-26/11/1989	507		Margas, Cereal-Sembrad
Ferre y Senciales	1990	14-26/11/1989	1117		Margas, Cereal-Sembrado
Ferre y Senciales	1990	14-26/11/1989	526		Margas, Cereal-Sembrado
Gómez Amelia y Schnabel	1992	1991-1992		0,35	Dehesa degradada
Schnabel et al.	1996	25 meses		0,12	Dehesa-sin sequia-ladera
Schnabel et al.	1996	14 meses		0,34	Dehesa-sequia-ladera
Schnabel et al.	1996	25 meses		0,02	Dehesa-sin sequia-coluval
Schnabel et al.	1996	14 meses		18,00	Dehesa-sequia-coluval
Schnabel	1997	09/90-11/93		0,20	Dehesa degradada
Casalí et al.	1997	10/95-09/97	26,6	13,30	Cárcavas
De Alba	1998	23/08/1995		39,00	Cultivo
Schnabel et al.	1998	1990-1997		1,50	Dehesa degradada
Schnabel et al.	1998	1990-1997		1,50	Dehesa degradada
Ooswoud Wijdenes et al.	2000	1997-1999		1,20	Carcavas
Mart.-Casasnovas et al.	2002	06/2000	207		Viñedos, 205 mm/135 min

dos no son válidos o son muy costosos. Un ejemplo es el trabajo de Dirk Oostwoud Wijdenes et al. (2000) en el que han estudiado 458 cabeceras de cárcavas en la Rambla Salada, Río Guadalentín. La medición repetida de la evolución de estas cárcavas durante dos años ha permitido estimar a estos autores una producción de 1,2 Mg ha⁻¹ año⁻¹. Los mismos autores atribuyen una tasa de erosión media para la cuenca contribuyente del Embalse de Puentes de 2,02 Mg ha⁻¹ año⁻¹, lo que ilustra la actividad de las cabeceras de las cárcavas.

Valores algo mayores a los del Guadalentín se pueden consultar en los trabajos de Casalí et al. (1999) en cárcavas en margas miocenas en Navarra. Allí, el levantamiento topográfico permi-

tió cuantificar pérdidas durante dos años de $26,6 \text{ Mg ha}^{-1}$. Por lo tanto, las tasas de erosión fueron en Navarra hasta 6 veces más altas que en Almería. Los 500 mm de precipitación media anual de la zona y el roquedo pueden ser determinantes a la hora de explicar las mayores tasas de erosión, pero también la intensidad de las lluvias. Mediciones de varias décadas serían necesarias para conocer las tasas a las que actúan estos sistemas tan dinámicos: las cárcavas.

El desarrollo de nuevas técnicas está permitiendo la recuperación de los estudios de la erosión del suelo a partir de los levantamientos topográficos. Un buen ejemplo lo tenemos en la publicación de Martínez Casanovas et al. (2002) en la que mediante un Modelo de Elevación Digital del terreno de alta resolución y el análisis con un Sistema de Información Geográfica se compara la superficie de una parcela en viñedos en el Alt Penedès-Anoia antes, y después de un chaparrón. Los datos revelan una movilización de $828 \pm 19 \text{ m}^3$ de material de los que el 57 % se redistribuyeron en la parcela y $352 \pm 36 \text{ m}^3$ fueron exportados. Todo ello supuso una pérdida de $201 \pm 21 \text{ Mg ha}^{-1}$ durante un solo chaparrón.

Validez del método

Tanto los perfiladores como los levantamientos topográficos aquí presentados carecen de la precisión deseada para estudiar los suelos forestales afectados por incendios, si bien son herramientas útiles en las cárcavas que se pueden formar con las primeras arroyadas tras el fuego, o si se producen eventos extraordinarios. Son muy válidos para zonas de *badlands*, derrubios de minas o campos de cultivo, y pueden utilizarse en zonas quemadas con muy intensos procesos de erosión. No debe generalizarse el uso de estos métodos en zonas incendiadas a no ser que se produzcan incendios de severidad elevada y lluvias intensas posteriores al incendio, o que desencadenará tasas de erosión elevadas, con formación de regueros y cárcavas. Es aconsejable que, si la zona de estudio ha sufrido un incendio severo, se tomen medidas topográficas en zonas de vaguadas y cauces, para que en el caso de que se produzca una lluvia intensa pueda medirse y compararse con la topografía posterior al evento erosivo. Esto puede ayudar a cuantificar las pérdidas de suelo cuando lluvias torrenciales postincendio no permitan medir las arroyadas mediante otros métodos.

La innovación técnica desarrollada en la última década, y el uso de la capacidad de computación de los nuevos ordenadores, permite en estos momentos realizar mediciones de gran precisión, y por lo tanto determinar los procesos erosivos postincendio a partir de los cambios en las formas. Así se confirma con las mediciones y los resultados obtenidos por el Laser Escáner que permite la toma de múltiples mediciones y la repetición de las medidas tanto como sea necesario (Staley et al., 2010). Estas nuevas aplicaciones abren la esperanza a su aplicación en zonas afectadas por incendios forestales de forma rutinaria y se prevé un reverdecimiento en el uso de estas técnicas.

PARCELAS EXPERIMENTALES

Aunque en los últimos años se han sembrado dudas sobre la validez de las mediciones de las parcelas experimentales (Stroosnijder, 2005; Boix-Fayos et al., 2007), lo cierto es que ningún otro

método se ha utilizado más y en más países. Y debemos recordar que la posibilidad de comparar mediciones es clave para que el método pueda dar soluciones a los científicos, a los técnicos y a los usuarios.

Los estudios realizados con piquetas, perfiladores y levantamientos topográficos pretenden cuantificar los cambios en las formas y deducir a partir de ellos la cantidad de suelo evacuado. Otra estrategia para medir las tasas de erosión es cuantificar el suelo exportado. Esto se realiza colectando los sedimentos en algún punto de la ladera. Los colectores pueden ser canalones, cajas, depósitos o cualquier recipiente que permita almacenar las arroyadas, incluso, como ha ocurrido en la última década se ha utilizado fibras textiles para construir presas o trampas de sedimentos. La superficie contribuyente puede ser delimitada o no. Esto determinará si la parcela es cerrada y se conoce con exactitud el área donde se origina la arroyada, o si es abierta y no se conoce con exactitud la superficie contribuyente. En el primer caso, las parcelas cerradas, los delimitadores alteran el flujo natural de agua y sedimentos al cortar los flujos naturales y al crear zonas alteradas. En la literatura científica española se dispone de abundante información generada con parcelas abiertas, y sobre todo con parcelas cerradas, pero es difícil compararlas por un problema de escala de medición al existir parcelas con tamaños distintos, en ocasiones de varios órdenes de magnitud. Pero ello también aporta información sobre el efecto de la escala en los procesos hidrológicos y erosivos. En el caso de los incendios se dispone de información abundante, aquí se repasan los datos más valiosos de la investigación desarrollada por investigadores españoles y se dan consejos de cómo construir las parcelas y las estaciones experimentales, y como explotar sus resultados.

El método

Tanto para parcelas abiertas como para parcelas cerradas, el método es similar y sencillo, aunque laborioso. Consiste en instalar un colector de la arroyada y un depósito donde poder almacenarla y medir, tanto sedimentos como escorrentía. Las formas y estrategias para ello pueden ser muy variadas. Y los costes muy variables dependiendo de la escala y de la precisión que se quiera alcanzar. En todos los casos es un trabajo laborioso ya que se debe mantener en funcionamiento todos los instrumentos y tomar muestras y mediciones cada vez que hay una lluvia.

Es fundamental que la parcela o estación para el estudio de la erosión del suelo disponga de un pluviómetro para cuantificar la precipitación. Es recomendable que sea un pluviógrafo ya que la intensidad de la lluvia será fundamental para entender los procesos erosivos. Existen modelos homologados con canchales que registran la lluvia con una precisión de 0,2 mm (Figura 6). Si es posible se debe instalar una estación meteorológica completa y sensores de humedad y temperatura, pero lo fundamental es poder caracterizar la precipitación. Se aconseja disponer de varios pluviógrafos para evitar pérdidas de información en caso de que alguno falle, y también mejorar la precisión en la medición, además de poder detectar variaciones espaciales en la precipitación. Es recomendable disponer al menos de dos pluviógrafos, uno en la parte baja y otro en la parte alta de la estación experimental.



Figura 6. Las parcelas y las estaciones experimentales juegan un papel fundamental no sólo en la investigación, también en la docencia y la divulgación. A la izquierda vista de un pluviógrafo en la Estación Experimental de El Teularet-Sierra de Enguera durante la visita de un grupo de estudiantes, en el centro la estación experimental completa y a la derecha un detalle de los balancines del pluviógrafo.

Colectores, delimitadores y depósitos

Los **colectores** son claves para realizar mediciones de calidad en las parcelas experimentales. Como se muestra en la figura 7 se puede utilizar una depresión natural para decantar los sedimentos, un colector artificial que es a su vez un colector y una trampa de sedimentos o “*silt fence*” donde quedarán atrapados los materiales arrastrados para la arroyada. En general, se reproduce un sistema ya estandarizado que consiste en un canalón de PVC o de metal, conectado a uno o varios depósitos (Figuras 7, 8 y 9). En algunas ocasiones se colocan divisores (Figura 9) para evitar almacenar toda la arroyada. Cuando las parcelas son inferiores a 1 m² es posible conectarlas directamente al depósito (Figuras 9 y 10). Si son de mayores dimensiones es aconsejable un colector que pueda almacenar parte del sedimento.

El colector debe de estar cubierto para impedir la entrada de la lluvia, y de materiales como polvo atmosférico que pueden alterar las mediciones. Además de un canalón, algunos investigadores utilizan tubos de PVC a los que se les hace una ranura por donde entraran las arroyadas



Figura 7. Vista de tres tipos de colectores utilizados por Craig Allen en la estación experimental del Bandelier National Park. De izquierda a derecha, una poza natural donde se decantan los sedimentos después de pasar por el aforador, una poza artificial construida con tablonces de madera, y una trampa de sedimentos construida con material plástico. Xavier Úbeda y Fernando Pérez Cabello ejercen amablemente de escala.



Figura 8. Vista de parcelas abiertas y cerradas. A la izquierda parcela abierta y a la derecha parcela cerrada en la estación experimental de Guadalperalón en Extremadura. Antonio Ceballos, Universidad de Salamanca, ejerce de escala en ambas. En el centro caja Gerlach de la estación experimental de Requena (Fotografía Neus La Roca).

(Figura 11). En las figuras de la 12 a la 15 se presentan ejemplos de parcelas de mayor tamaño y en los que los colectores deben estar preparados para recibir caudales elevados con materiales groseros. Esos colectores, y los depósitos, deben estar dimensionados según el tamaño de las parcelas, la erosionabilidad del suelo y la erosividad de la lluvia. Se deben diseñar para que puedan coleccionar las arroyadas producidas por lluvias de periodos de recurrencia elevados, que nunca debe de ser inferior a 50 años. Se aconseja recabar series de precipitaciones que puedan ayudar en el diseño, pero también es necesario conocer la respuesta de los suelos. Para ello se



Figura 9. Arriba, vista de los colectores desarrollados por Gary Sheridan de la University of Melbourne (Australia). El colector es de tan sólo 200 mm de tamaño y la repetición de esta parcela permite conocer la variabilidad espacial de la escorrentía. Abajo, vista de las parcelas de la estación experimental de Kalía, y detalle de los colectores con divisores utilizados por Hanoch Lavee en sus estudios a lo largo de gradientes climáticos en el Desierto de Judea.

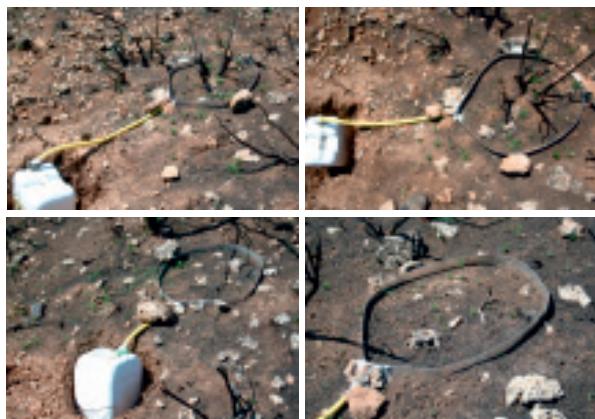


Figura 10. Parcelas circulares adaptables a la topografía del suelo construidas mediante láminas de aluminio de 1 mm de grosor y 7 cm de altura como delimitador. La conexión se hace directamente con una manguera de 25 mm de diámetro a un depósito de 25 L. Estas parcelas sirven para conocer la variabilidad espacial. Incendio de Navalón de abril de 2008. Fotografía de junio de 2008.



Figura 11. Parcelas de 1 × 1 m utilizadas por Craig Allen del Bandelier National Park en New Mexico (EEUU) y abajo las empleadas por John Moody en las Montañas Rocosas, Colorado (USGS Boulder) para estudiar suelos afectados por incendios forestales. Parcelas cerradas con colector de PVC (tubo con tapas laterales y ranura de entrada de agua), cubierta protectora del colector de hierro galvanizado, delimitadores de hierro y depósito de PVC.

deben realizar experimentos con lluvias simuladas con intensidades elevadas (< 10 años de recurrencia), con lo que se puede calcular las dimensiones de los canalones, de los depósitos y de los tubos de conexión entre ambos.

Una parte fundamental del colector es su contacto con el suelo. Debido a que los materiales –suelo y PVC o metal– presentan propiedades distintas se producen grietas. Si la arroyada penetra por esas grietas la medición será errónea. Para impedir esto debemos utilizar silicona, sellante acrílico o cemento para impermeabilizar la superficie de contacto entre el colector y el suelo. Esta zona se debe de revisar asiduamente ya que un error en ella supone una pérdida de escorrentía y sedimentos, y por lo tanto una medición falseada por infravalorar la realidad.

Los delimitadores de las parcelas pueden ser de distintos tipos (Figuras 16 a 19). Caballones construidos con el propio suelo, zanjas que recogen las escorrentías, u obras de albañilería han sido utilizados por distintos autores. Estos sistemas alteran los suelos y no son viables en suelos forestales, y menos en suelos recién afectados por incendios ya que en su construcción se modifican las condicio-

nes naturales y contribuyen con altas tasas de erosión. Si serían viables los caballones o zanjas en suelos agrícolas o incluso en zonas forestales pero si la superficie de la parcela permite amortiguar el efecto de la alteración del suelo. Una buena opción es el uso de láminas de hierro galvanizado de entre 1 y 2 mm de espesor que hace que la delimitación de las parcelas sea nítida, no altere el suelo, sea asequible por el bajo coste de los materiales y con menor costo de mano

MÉTODOS PARA LA CUANTIFICACIÓN DE LA PÉRDIDA DE SUELO Y AGUAS TRAS INCENDIOS FORESTALES, CON ESPECIAL REFERENCIA A LAS PARCELAS EXPERIMENTALES



Figura 12. A la derecha vista de una parcelas circular cerrada (3 m²) utilizada por Purificación Ruiz-Flaño a principios de los años 90 en su Tesis Doctoral. Fotografía Teodoro Lasanta. En el centro parcela cerrada en el campo de dunas de Nizzana, Israel. Y a la derecha detalle del colector de las parcelas cerradas de la estación de la Higuera en Santa Olalla en Toledo. Saturnino de Alba ejerce de escala.



Figura 13. Parcelas de 5 x 10 m de la estación experimental del Instituto Pirenaico de Ecología en Aísa, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, provincia de Huesca. De izquierda a derecha una parcela afectada por un incendio (se aprecian a un los restos de *Rosa canina*), detalle del colector de la parcela dedicada al prado y parcela con laboreo. Fotografías de Deborah Martin (USGS; Boulder, Colorado, EEUU).



Figura 14. Detalle de los colectores y depósitos de las parcelas (4 x 20 m²) de la estación experimental de la Concordia. A la izquierda vista del tramo final de la parcela con el colector. En el centro el depósito y a la derecha detalle del colector al que Vicente Andreu ha retirado amablemente la tapa. Centro de Investigaciones sobre Desertificación, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Valencia. Fotografías: Reyes Ruiz Gallardo, Universidad de Castilla – La Mancha.



Figura 15. De izquierda a derecha, vista general de dos parcelas y depósitos, detalle de los depósitos y colectores en el centro, y a la derecha vista de los tubos que comunican los colectores con los depósitos en la estación de la Higuera en Santa Olalla en Toledo.



Figura 16. Arriba a la izquierda, trabajos de mantenimiento, en este caso el sellado de los delimitadores con silicona, Merche B. Bodí ejerce de escala. Arriba a la derecha, colector con sedimentos. En la parte inferior derecha vista general de las parcelas en la Estación Experimental para el Estudio de la Erosión del Suelo de El Teularet – Sierra de Enguera. Se puede apreciar como los delimitadores actúan sin alterar los suelos. Los delimitadores son de láminas de hierro galvanizado de 2000 mm x 200 mm y de 1,5 mm de espesor. Los colectores son de PVC cubiertos por material cerámico debido a los fuertes vientos de la zona, y los depósitos de 125 L que se conectan para poder almacenar hasta 500 L. En la parte inferior izquierda se muestra una parcela donde las zanjas actúan como delimitadores, en las parcelas de Lee H. MacDonald, Montañas Rocosas, Colorado. Fotografía David Scott.

de obra en transporte e instalación. Además, este tipo de material se puede cortar o troquelar a medida, y las piezas transportadas al campo se pueden unir mediante remaches o materiales sintéticos como la silicona, pegamentos especiales para metal o con sellante acrílico.

En la estación experimental para el estudio de la erosión del suelo de El Teularet-Sierra de Enguera se ha evaluado estos sistemas desde 2003 y han mostrado un magnífico comportamiento (Figuras 16 y 20). Los delimitadores deben ser revisados y mantenidos al menos dos veces al año. El mantenimiento consiste en comprobar su estanqueidad. Si se encuentran fugas se



Figura 17. Vista de dos parcelas, trigo a la izquierda y barbecho a la derecha de la estación experimental desarrollada y mantenida por el profesor Lundekvam de la Norwegian University of Life Sciences. La zona de medición de las arroyadas es subterránea y se accede por las trampillas que se encuentran en la parte baja de la parcela. Se puede apreciar que los delimitadores de las parcelas son el propio laboreo con unas pequeñas zanjas.

deben reparar, habitualmente mediante silicona en el caso de las láminas de hierro galvanizado, cemento en las de obra de albañilería, o bien reconstruyendo el caballón.

Los **depósitos** se suelen adquirir ya prefabricados, aunque es posible construirlos con materiales de albañilería “in situ”. El que los depósitos sean prefabricados permite que se puedan trasladar y reemplazar con facilidad y sean más asequibles que los construidos siguiendo el diseño del investigador, si bien esto es posible, especialmente con materiales sintéticos como la fibra de vidrio. Se aconsejan materiales sintéticos como el PVC, fibra de vidrio o plástico que permite la estanqueidad (Figuras 14, 15 y 20).

Aunque no es lo habitual, es posible instalar caudalímetros en los colectores y muestreadores automáticos para determinar la concentración de sedimentos. También es posible instalar turbidímetros (Figura 21). Sin embargo, por las dimensiones de las parcelas, y por el costo económico, lo más habitual es disponer de totalizadores (depósitos). Ello también obliga a la toma de datos después de cada lluvia para evitar el solapamiento entre eventos. En los últimos años se



Figura 18. Vista de las parcelas ($4 \times 20 \text{ m}^2$) de la estación experimental de la Concordia. Centro de Investigaciones sobre Desertificación, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Valencia. Destacan los delimitadores realizados mediante obra de albañilería y los depósitos de gran capacidad. Fotografías: Reyes Ruiz Gallardo, Universidad de Castilla – La Mancha y Deborah Martin (USGS; Boulder, Colorado, EEUU).



Figura 19. Vista de una parcela de erosión en Galicia. Toma desde la parte superior e inferior de la misma parcela. En la parte inferior se pueden ver los colectores que mediante divisores son capaces de almacenar una muestra adecuada de la arroyada.



Figura 20. Vista de los colectores conectados en la Estación Experimental para el Estudio de la Erosión del suelo de El Teularet-Sierra de Enguera. A la izquierda los depósitos donde llegan los materiales con textura más fina, en el centro los colectores donde queda el material más grueso, y a la derecha vista de la parcela de laboreo tradicional.

han desarrollado caudalímetros asequibles para cuantificar la escorrentía, pero los sedimentos se cuantifican habitualmente al final de cada evento y de la forma tradicional: toma de una o varias alícuotas y desecación en el laboratorio. También es habitual utilizar divisores para recoger sólo parte de la arroyada (1/10) para de esa forma evitar construir grandes depósitos cuando se realiza el estudio a partir de parcelas con áreas contribuyentes grandes.

Construcción, mantenimiento y explotación de una estación experimental

Una investigación de calidad en erosión del suelo se inicia con la planificación de la estación experimental. Es fundamental decidir el número de parcelas a construir para disponer de las repeticiones requeridas. Ver figura 21 para dos estaciones emblemáticas. Son necesarias al menos tres repeticiones para tener información suficiente y contrastada. Así, si se estudia el efecto del fuego en una zona quemada frente a la no quemada deberíamos disponer de tres parcelas en cada uno de los casos, quemada frente a control, en total 6 parcelas. Si además se estudian estrategias de control de la erosión este número se deberá incrementar proporcionalmente. También se debe decidir que tamaño de parcela, tipo de delimitadores, colectores y depósitos, y si

se puede automatizar la toma de muestras. En esas decisiones, además de la capacidad económica del grupo de investigación es determinante el tiempo disponible para dedicar a la estación experimental. La instalación puede ser ejecutada en unas pocas semanas, pero el mantenimiento es muy exigente ya que depende de las lluvias. Una estación experimental debería disponer de un técnico dedicado en exclusiva a su mantenimiento, toma de muestras, tratamiento de datos, y a incorporar mejoras en los sistemas de medición. Esto habitualmente se sustituye en España por el esfuerzo personal de los investigadores.

Existe un mito ampliamente aceptado, y que debe ser clarificado, por el que se entiende que las estaciones experimentales con parcelas de mayor tamaño son de mayor calidad. Habitualmente, las estaciones con parcelas de grandes dimensiones aportan información substancial y disponen de recursos que les permiten mantener el material y los instrumentos en buenas con-



Figura 21. Vista de sistema automáticos de medición de caudal. El de la izquierda pertenece al de la Norwegian University of Life Sciences (ver figura 22), se encuentran en un sótano para evitar la congelación, y utilizan canijones de 5 L. El de la derecha pertenece a la Estación Experimental de El Teularet-Sierra de Enguera y cada canijón tiene una capacidad de 500 mL.



Figura 22. Vista de las estaciones experimentales. A la izquierda la estación experimental desarrollada y mantenida por el profesor Lundekvam de la Norwegian University of Life Sciences en la que los caudalímetros y el muestreador se encuentran en el subsuelo para evitar la congelación de las muestras. Esta estación experimental se encuentra a 60 km de Oslo, Noruega. A la derecha una vista de parte de la estación experimental de la Concordia en Valencia en la que los colectores y depósitos totalizadores se encuentran en superficie.

diciones. Además de técnicos especializados en su mantenimiento. Las estaciones experimentales con parcelas de tamaños pequeños suelen depender del esfuerzo personal de un investigador o un grupo pequeño de investigadores. Pero no por ser las parcelas pequeñas desmerecen la validez de sus datos. Hay una obsesión en la ciencia actual por conocer las tasas de erosión, con el fin de extrapolarlas a áreas más extensas. Y obviamente, parcelas mayores se acercan más a la realidad de la erosión a escala regional. Sin embargo, las parcelas grandes pueden decir poco de mecanismos que actúan a escala de milímetros como la salpicadura, y poco también de factores como la distribución en manchas de la vegetación o la repelencia del agua. Son buenos modelos de caja negra. Con parcelas pequeñas se pueden estudiar mejor procesos claves para entender los procesos de erosión, especialmente el arranque del material. Así, todas aportan información complementaria, las parcelas grandes ($> 100 \text{ m}^2$) y las parcelas pequeñas ($< 100 \text{ m}^2$). En algunos casos es ese tema, el del factor de la escala en erosión, el que define una estación experimental, ya que al disponer de parcelas de distintos tamaños se puede explicar cómo se genera la escorrentía y por lo tanto como se transportan los sedimentos (Ceballos et al., 1998). Así, en la figura 23 se muestra un grupo de parcelas con distintos tamaños para su uso bajo experimentos con lluvia simulada en la Estación Experimental de El Teularet - Sierra de Enguera. Y en la figura 16 se muestra las parcelas en las que se mide la erosión bajo lluvia natural. En los dos



Figura 23. Vista de parcelas experimentales de distintos tamaños en la Estación Experimental para el Estudio de la Erosión del Suelo de El Teularet – Sierra de Enguera. De izquierda a derecha y de arriba abajo, parcelas de $2 \times 6 \text{ m}$, de $1 \times 2 \text{ m}$ y de $0,6 \times 1,20 \text{ m}$ y una vista general de parcelas de distintos tamaños en las que en la parte inferior se puede ver parcelas circulares de $0,24 \text{ m}^2$. En la primera y última imagen Paulo Pereira ejerce de escala.

casos el gran interés reside en conocer cómo afecta la conectividad de los procesos erosivos y cómo influyen los usos y manejos del suelo en esa conectividad.

La figura 22 muestra dos estaciones modélicas por sus dimensiones y por la calidad del trabajo desarrollado en ellas. Así, en la estación de la universidad noruega (*Norwegian University of Life Sciences*) se dispone de parcelas de cultivo con superficies de 300 m² con colectores de gran capacidad y aforadores y muestreadores subterráneos. En las parcelas del Centro de Investigaciones sobre Desertificación, estación experimental de La Concordia, las parcelas son de 80 m² en zona de matorral, con dos incendios controlados en una década, y con colectores conectados a tanques de almacenaje de grandes dimensiones.

El mantenimiento de una estación experimental y de sus parcelas requiere que todos los instrumentos, desde el pluviógrafo hasta los delimitadores, funcionen perfectamente. Pero también el mantenimiento implica la toma de datos, y afortunadamente esto se ha automatizado (precipitación o temperatura), y otras se están automatizando (caudal y concentración de sedimentos). No obstante, incluso en las estaciones experimentales más sofisticadas se requiere la toma de datos (descarga de los data-loggers) cada cierto tiempo. Y también es necesario que esos data-loggers funcionen bien, se cambien baterías, se actualice su software y funcionen todos los instrumentos correctamente. Aunque en algunas estaciones experimentales se transmiten los datos directamente al ordenador del despacho del investigador, las visitas a la estación experimental deben ser recurrentes. Esas visitas deben realizarse para el mantenimiento, y cada vez que se produce una lluvia.

El protocolo de trabajo suele ser: comprobación de los pluviómetros y pluviógrafos, revisión de los depósitos y colectores, descarga de datos de los data-loggers, toma de muestras (alícuotas) en los depósitos, toma de muestras en los colectores, limpieza de los depósitos y limpieza de los colectores. En esas mismas visitas se deben tomar fotografías, realizar la aplicación de manejos en las parcelas si es necesario y comprobar que el contacto entre los colectores y el suelo es bueno y sin grietas o fisuras. Esto último debe de ser una constante ya que es el punto débil de este tipo de mediciones.

Es aconsejable disponer de una rutina de trabajo que permita a cualquier miembro del grupo hacer las tareas. Por ejemplo, la determinación de la escorrentía acumulada debe hacerse mediante la medición de la profundidad del depósito, la toma de muestras tras remover y mezclar el sedimento acumulado en el fondo del depósito y tomar tres alícuotas, o la limpieza de los colectores realizarla siempre siguiendo un orden establecido. La limpieza del colector se debe hacer en su totalidad. Los sedimentos se deben pesar en el laboratorio si son pocos tras ser secados a 105 °C. En cambio, si la carga sedimentaria es elevada se puede cubicar o pesar en el campo, transportar una muestra al laboratorio y determinar su contenido en aguas. Las muestras de sedimentos pueden ser analizadas para conocer los nutrientes, especialmente fósforo, y es de gran interés conocer su textura. Las muestras de agua se deben tomar para determinar también su composición química. Esto es especialmente importante después de incendios forestales ya que la exportación de solutos es abundante por la presencia de cenizas (Pereira et al., 2010).

Los datos colectados deben almacenarse en hojas de cálculo para iniciar los primeros cálculos. Se recomienda que los cálculos se realicen mediante fórmulas preestablecidas y confirmadas con el fin de que no se produzcan errores de cómputo al haber multitud de cálculos posibles. Tam-

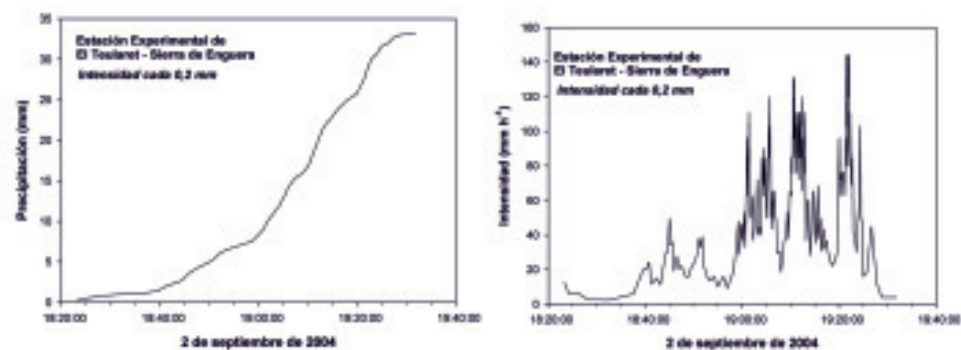


Figura 24. Precipitación acumulada e intensidad instantánea (0,2 mm) entre las 18:23 y las 19:31 del 2 de septiembre de 2004 en la estación experimental de El Teularet – Sierra de Enguera.

Tabla 6. Ejemplo de los cálculos realizados a partir de la precipitación, escorrentía y concentración de sedimentos en la parcela 1 de la Estación Experimental de El Teularet-Sierra de Enguera. Tormenta de verano del 2 de septiembre. Evento 27: 33,2 mm entre las 18:23 y las 19:31 del 2 de septiembre de 2004. Esta lluvia se produjo después de otra tormenta de similares características caída dos días antes. Suelos con 24,5 % de humedad en los primeros 2 cm del suelo, lo que explica una escorrentía tan súbita y abundante.

Subparcela	1A	1B	1C	1D
Superficie (m ²)	1	2	4	16
Precipitación (mm)	33,2	33,2	33,2	33,2
Escorrentía (mL)	30254	55265	48587	84578
Total precipitación (mL)	33200	66400	132800	531200
Coefficiente de escorrentía (%)	91,1	83,2	36,6	15,9
Concentración en depósito (g L ⁻¹)	8,7	8,3	9,7	9,3
Sedimentos en depósito	261,7	455,9	468,9	788,3
Sedimentos en colector (g)	245,4	365,3	452,3	1256,3
Total sedimentos (g)	507,0	821,2	921,2	2044,6
Sedimentos colector (%)	48,4	44,5	49,1	61,4
Sedimentos en escorrentía (%)	51,6	55,5	50,9	38,6
Total sedimentos (%)	100,0	100,0	100,0	100,0
Concentración de sedimentos (g L ⁻¹)	16,8	14,9	19,0	24,2
Pérdida de suelo (g m ⁻²)	245,4	182,6	113,1	78,5
Pérdida de suelo en depósito (g m ⁻²)	261,7	228,0	117,2	49,3
Pérdida de suelo en colector (g m ⁻²)	245,4	182,6	113,1	78,5
Pérdida de suelo en depósito (%)	51,6	27,8	12,7	2,4
Pérdida de suelo en colector (g m ⁻²)	48,4	44,5	49,1	61,4
Pérdida de suelo (g mm ⁻¹)	15,3	24,7	27,7	61,6
Pérdida de suelo (Mg ha ⁻¹)	2,5	1,8	1,1	0,8

bién es de gran ayuda el incluir cálculos destinados a confirmar que las operaciones se están llevando a cabo con exactitud. Por ejemplo, en la tabla 6 se muestra en el epígrafe de total de sedimentos como la suma de los sedimentos en suspensión colectados en el depósito y los sedimentos colectados en el colector, mucho más groseros, suma 100 %. Algunos errores en los cálculos o en el tratamiento de los datos se pueden detectar de esta forma. Una buena organización del tratamiento de los datos ayudará en la investigación, ya que se reduce el tiempo de cálculo y se mejora en claridad. En la tabla 7 se muestra el cómputo anual de las mismas parcelas.

Parcelas abiertas

El sistema más sencillo para la cuantificación de la erosión del suelo es el de la instalación de colectores sin delimitar el área productora de sedimentos con el fin de conocer la magnitud del suelo transportado. Este sistema, ideado por Gerlach (1967), se desarrolló desde una perspectiva puramente geomorfológica con el fin de conocer la transferencia de sedimentos a lo largo de una ladera. No se pretendía con el conocer la tasa de erosión, sino el flujo de sedimentos a lo largo de la ladera. Al medir la tasa de erosión a partir de los colectores Gerlach encontramos el problema de que no se conoce realmente la superficie contribuyente por la complicada topografía de las laderas y por la discontinuidad de los flujos. Además, se debe resaltar que en muchas ocasiones los depósitos son desbordados por las escorrentías porque no están preparados para los eventos de mayor magnitud, precisamente los de mayor actividad erosiva. A pesar de todos estos problemas metodológicos hay que destacar la gran cantidad de mediciones realizadas y la facilidad de obtención de datos que permite conocer con detalle el transporte de materiales. Además, las series pueden ser largas ya que no se altera el balance de sedimentos en la ladera, cosa que si ocurre con las parcelas cerradas al cortar los flujos de entrada.

Tabla 7. Cálculo de la erosión del suelo en la parcela 1 (subparcelas A, B, C y D). La pérdida de suelo anual se obtiene del sumatorio de la erosión por eventos.

Subparcelas. Parcela 1	A	B	C	D
Superficie	1	2	4	16
Evento 6	0,010	0,007	0,004	0,001
Evento 7	0,044	0,023	0,017	0,003
Evento 9	0,050	0,028	0,016	0,005
Evento 13	0,012	0,011	0,003	0,001
Evento 17	5,620	2,990	2,238	2,009
Evento 18	0,233	0,062	0,026	0,012
Evento 27	0,503	0,378	1,131	0,978
Evento 29	2,454	1,826	1,131	0,785
Evento 57	0,083	0,047	0,018	0,009
Erosión anual (Mg ha ⁻¹)	9,008	5,372	4,584	3,804

Antecedentes

Los primeros colectores instalados fueron los de la estación experimental de Requena (La Roca, 1984), los de Lasanta y Sobrón en los viñedos riojanos (1984) y los de López Bermúdez et al. (1985) en la cuenca de Mula. Pocos años después, La Roca (1984) midió tasas de erosión que oscilan entre 0 y 3,1 Mg ha⁻¹ año⁻¹ en la estación experimental de Requena con valores que normalmente estaban por debajo de 1 Mg ha⁻¹ año⁻¹. Y todo ello a pesar de ser un roquedo erosio-nable y de que la zona había sufrido un incendio recientemente. Las tasas de erosión encontradas por Lasanta y Sobrón (1984) en los viñedos riojanos siempre estuvieron por debajo de 1 Mg ha⁻¹ año⁻¹, durante los 10 meses estudiados. Romero Díaz et al. (1988) midieron tasas de ero-sión que oscilan entre los 0,08 Mg ha⁻¹ año⁻¹ de 1984 a los 2,55 Mg ha⁻¹ año⁻¹ de 1985 y los 2,36 Mg ha⁻¹ año⁻¹ de 1986 en una zona también de calizas y matorral pero un poco más al sur, en Murcia. Todas estas mediciones entraban en contradicción con los datos estimados por la USLE, la cual estaba siendo utilizada a mediados de los años 80 de una forma intensiva y daba tasas de erosión dos órdenes de magnitud más altas que las que ofrecían las parcelas. Los estudios de María Sala (1988) en el Montseny demuestran que a pesar de las elevadas precipitaciones de la zona de la Castanya y de Santa Fe las tasas de erosión no superan nunca las 3 Mg ha⁻¹ año⁻¹ y en ocasiones están por debajo de 1 Mg ha⁻¹ año⁻¹. También López Bermúdez (1989) midió a partir de colectores Gerlach valores que difícilmente superan las 3 Mg ha⁻¹ año⁻¹, a pesar de ser zonas abandonadas y con escasa vegetación.

En la línea de esto valores bajos de erosión medidos con colectores, De Antonio et al. (1993) aprovechan una trinchera de la Guerra Civil Española situada al pie de una ladera y cuantifican tasa de erosión de 0,5 Mg ha⁻¹ año⁻¹ en los últimos 50 años. Tasas de erosión bajas con los tradicio-nales colectores Gerlach se vuelven a repetir en los trabajos de González del Tánago (1994) hasta el punto de calificarlas de inapreciables en Guadalajara. Datos que verifican esas bajas tasa de ero-sión medidas con este método en distintos ambientes se comprueba en la tabla 8. Romero Díaz et al. (1995) en zonas de cultivo en Murcia, Ceballos (1996) y Schnabel (1997) en la dehesa degrada-da de Guadalperalón en Cáceres, Sala (1996) en distintas cubiertas de bosques, matorral y her-báceas en Cataluña, o Úbeda et al. (1998) en zonas de incendio de baja intensidad o con distin-tas cubiertas vegetales encuentran, todos ellos y en todos los casos tasas de erosión que no superan 1 Mg ha⁻¹ año⁻¹. Tasas de erosión altas sólo se miden en espacios alterados por la acción antrópica directa como lo demostró Navarro Hevia et al. (2000) en taludes de ferrocarril en Palencia, con 23 Mg ha⁻¹ año⁻¹. Y también en el año posterior a los incendios de alta intensidad.

Mediciones en zonas afectadas por incendios forestales

Los estudios con parcelas abiertas han suministrado información que demuestra que las tasas de erosión se pueden disparar de forma puntual por la mala gestión de la cubierta vegetal, y/o por eventos extraordinarios. Este es el caso de las zonas incendiadas tanto con incendios de media como de alta intensidad (Úbeda et al., 1996) donde se han medido tasas de erosión de 8,5 y 40,7 Mg ha⁻¹ año⁻¹ respectivamente. Llamen la atención tasas de erosión de 8 y 15 Mg ha⁻¹ año⁻¹ que corresponde a parcelas situadas en caminos forestales (Úbeda et al., 1998). Otra inves-tigación recientemente publicada es la de Rodríguez et al. (1999-2000) en la que se comprueba

MÉTODOS PARA LA CUANTIFICACIÓN DE LA PÉRDIDA DE SUELO Y AGUAS TRAS
INCENDIOS FORESTALES, CON ESPECIAL REFERENCIA A LAS PARCELAS EXPERIMENTALES

Tabla 8. Mediciones de la tasa de erosión de erosión mediante parcelas experimentales abiertas en España. Precipitación durante el periodo de estudio (pp) y precipitación media anual (ppm).

Autor	Año	ppm (mm)	pp (mm)	Periodo	Erosión Mg ha ⁻¹ año ⁻¹	Características
La Roca	1984	452	286,3	1/7/82-14/11/82	0,1-3,1	Norte
La Roca	1984	452	716,3	14/11/82-13/6/84	0,03-2	Oeste
La Roca	1984	452	272,8	6/2/83-11/3/84	0-2,6	Oeste
La Roca	1984	452	283,3	15/10/83-13/6/84	0-0,06	Sur
Romero Díaz et al.	1988	300		1984	0,08	Matorral (Margas)
Romero Díaz et al..	1988	300		1985	2,55	Matorral (Margas)
Romero Díaz et al.	1988	300		1986	2,36	Matorral (Margas)
Sala	1988		1176	1982	2,42	Granito
Sala	1988		600	1983	1,29	Granito
Sala	1988		670	1984	2,39	Granito
Sala	1988		1680	1982	2,74	Pizarras
Sala	1988		857	1983	0,40	Pizarras
Sala	1988		1204	1984	1,43	Pizarras
López Bermúdez	1989			1984	0,08	Matorral (Margas)
López Bermúdez	1989			1985	3,00	Matorral (Margas)
López Bermúdez	1989			1986	3,10	Matorral (Margas)
López Bermúdez	1989			1986	1,81	Abandonado 1 año
López Bermúdez	1989			1986	3,18	Abandonado 2 años
López Bermúdez	1989			1986	2,71	Abandonado.3 años
López Bermúdez	1989			1986	1,78	Abandonado 20 años
Gonz. del Tanago	1994					Inapreciable
Ceballos	1996	510		1994-1995	0,23	Dehesa (pastoreo)
Ceballos	1996	510		1995-1996	0,64	Dehesa (pastoreo)
Schnabel	1997	510	1384	09/1990-11/1993	0,53	Dehesa (laderas)
Schnabel	1997	510	1384	09/1990-11/1993	0,19	Dehesa (coluvial)
Schnabel	1997	510	1384	09/1990-11/1993	0,12	Ladera- húmedo
Schnabel	1997	510	1384	09/1990-11/1993	1,25	Ladera-sequía
Schnabel	1997	510	1384	09/1990-11/1993	0,02	Coluvial- húmedo
Schnabel	1997	510	1384	09/1990-11/1993	0,48	Coluvial-sequía
Navarro Hevia et al.	2000			1998	23,30	Taludes

como tasas de erosión de 0,21 y 0,28 Mg ha⁻¹ año⁻¹ en Carrascales y Pinares de Zaragoza se transforman respectivamente en 1,88 y 11,8 Mg ha⁻¹ año⁻¹ cuando éstos han sido incendiados. Por lo tanto, las mediciones mediante parcelas abiertas informan de que las tasas de erosión sólo son altas ante incendios de alta intensidad o por la presencia de caminos forestales. Y que la cubierta forestal influye también en el postincendio, siendo más sostenibles masas forestales como los encinares. Es cierto que los incendios forestales aceleran la pérdida de suelo, pero tam-

bién que las tasas son mucho más bajas que en zonas degradadas por otras acciones antrópicas como el propio cultivo o las obras de infraestructura. Los trabajos pioneros ya aportaron datos llamativos. Así, Soler y Sala (1990; 1992) demostraron que a pesar de los incendios los suelos del encinar producen muy pocos sedimentos, siempre por debajo de $0,3 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Valores similares a estos han sido medidos por Soler et al. (1994) para distintos periodos después del incendio, en bosque, o después de ser talado el bosque (Tabla 9).

En general, las parcelas abiertas informan de que aquellos suelos que no han sido alterados presentan tasas de erosión bajas o nulas. Tasas de erosión por debajo de 3 e incluso $1 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ demuestran que las pérdidas de suelo son reducidas. Sólo puntualmente caminos, taludes, y en algunos casos zonas incendiadas presentan tasas elevadas. Cuando la intensidad del fuego es elevada, la respuesta erosiva también lo es, pero con incendios de baja intensidad, la pérdida de suelo y agua, aunque acelerada, presenta valores por debajo de $1 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, y se recuperan los valores previos tras pocos años.

Parcelas cerradas

Los inconvenientes que supone no conocer la superficie contribuyente en los colectores Gerlach se elimina si a éstos se les une un delimitador de la superficie contribuyente, con lo cual tenemos configurada una parcela: una porción del territorio sobre la que se pueden tomar medidas de gran precisión. Sin embargo, uno de los problemas que encontramos en las parcelas cerradas es que al no producirse la entrada de sedimentos por la parte alta se agota el material disponible y con ello se producirá una reducción artificial de la pérdida de suelo. Además, con las parcelas cerradas se produce un corte de los flujos naturales y una alteración en la organización de la escorrentía junto a problemas como la degradación de la superficie en la instalación de los delimitadores. Sin duda, las parcelas cerradas suponen una mayor artificialización del medio y de los procesos hidrológicos y erosivos, pero a pesar de todos los inconvenientes, ese tipo de parcela suministra datos de gran calidad para conocer el proceso de erosión ya que aportan información de cada evento de lluvia (López Bermúdez et al., 1993).

Antecedentes

Los primeros datos obtenidos con parcelas cerradas proceden de los trabajos de Vega et al. (1981) en zonas incendiadas en Galicia, donde encontraron tasas entre $1,5$ y $22 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para parcelas quemadas con baja y alta intensidad de fuego respectivamente. Los estudios en viñedos de Lasanta y Sobrón (1984) demostraron que las tasas de erosión medidas durante 10 meses fueron inferiores a $0,14 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, y en algunos caso llegó a valores cercanos a cero. Esas parcelas se instalaron a principios de 1982 a partir de unas cajas Gerlach y delimitadores con caballones y los primeros datos presentado en el VIII Coloquio de Geógrafos Españoles (Lasanta y Ortigosa, 1983) (Tabla 10).

Datos pioneros sobre erosión hídrica del suelo, obtenidos a partir de parcelas cerradas, los aporta la Dra. Sala (1988) al cerrar varios colectores Gerlach en las zonas de La Castanya y Santa Fe a una distancia de dos metros en 1982. Estas parcelas de $0,5 \times 2 \text{ m}$ se mantuvieron desde 1982 a 1984 y en todos los casos las tasas de erosión fueron bajas. En la Castanya, sobre gra-

MÉTODOS PARA LA CUANTIFICACIÓN DE LA PÉRDIDA DE SUELO Y AGUAS TRAS
INCENDIOS FORESTALES, CON ESPECIAL REFERENCIA A LAS PARCELAS EXPERIMENTALES

Tabla 9. Mediciones de la tasa de erosión de erosión mediante parcelas experimentales abiertas en España en zonas afectadas por incendios forestales.

Autor	Año	Precipitación mm	Periodo	Erosión Mg ha ⁻¹ año ⁻¹	Características
Soler y Sala	1990		4/11/88-3/11/89	0,27	Encinar (incendio)
Soler y Sala	1990		4/11/88-3/11/89	0,03	Encinar (incendio)
Soler y Sala	1990		4/11/88-3/11/89	0,01	Encinar (incendio)
Soler y Sala	1992		17/2/89-10/08/89	0,16	Incendio
Soler y Sala	1992		17/2/89-10/08/89	0,02	Talado
Soler y Sala	1992		17/2/89-10/08/89	0,02	Bosque
De Antonio et al.	1993		1937-1993	0,50	Yesos
Soler et al.	1994	35	1988-1989	0,04	Incendio (3 meses después)
Soler et al.	1994	191	1988-1989	0,11	Incendio (6 meses después)
Soler et al.	1994	241	1988-1989	0,12	Incendio (9 meses después)
Soler et al.	1994	300	1988-1989	0,26	Incendio (12 meses después)
Soler et al.	1994	507	1988-1989	0,27	Incendio (15 meses después)
Soler et al.	1994	525	1988-1989	0,23	Incendio (18 meses después)
Soler et al.	1994	35	1988-1989	0,01	Talado (3 meses después)
Soler et al.	1994	191	1988-1989	0,01	Talado (6 meses después)
Soler et al.	1994	241	1988-1989	0,01	Talado (9 meses después)
Soler et al.	1994	300	1988-1989	0,04	Talado (12 meses después)
Soler et al.	1994	507	1988-1989	0,03	Talado (15 meses después)
Soler et al.	1994	525	1988-1989	0,03	Talado (18 meses después)
Soler et al.	1994	35	1988-1989	0,06	Bosque (3 meses después)
Soler et al.	1994	191	1988-1989	0,04	Bosque (6 meses después)
Soler et al.	1994	241	1988-1989	0,03	Bosque (9 meses después)
Soler et al.	1994	300	1988-1989	0,02	Bosque (12 meses después)
Soler et al.	1994	507	1988-1989	0,03	Bosque (15 meses después)
Soler et al.	1994	525	1988-1989	0,03	Bosque (18 meses después)
Sala	1996			0,05	Encinar
Sala	1996			0,03	Hayedo
Sala	1996			0,01	Pinar con gramíneas
Sala	1996			0,00	Matorral
Sala	1996			0,00	Encinar
Sala	1996			0,36	Quemado
Sala	1996			0,04	Talada
Sala	1996			0,02	Bosque
Úbeda et al.	1998		1994	14,70	Camino forestal
Úbeda et al.	1998		1995	8,10	Camino forestal
Rodríguez et al.	1999-2000		1996	1,88	Encinar quemado
Rodríguez et al.	1999-2000		1996	0,00	Encinar control
Rodríguez et al.	1999-2000		1996	11,80	Pinar quemado
Rodríguez et al.	1999-2000		1996	0,00	Pinar testigo
Úbeda	2000		07/1994-03/95	0,20	Incendio (baja intensidad)
Úbeda	2000		07/1994-03/95	8,46	Incendio (media intensidad)
Úbeda	2000		07/1994-03/95	40,74	Incendio (alta intensidad)
Úbeda	2000		16/06/93-09/12/94	0,08	Vegetación (densa)
Úbeda	2000		16/06/93-09/12/94	1,00	Vegetación (dispersa)

Tabla 10. Mediciones de la tasa de erosión de erosión mediante parcelas experimentales cerradas en España. Precipitación durante el periodo de estudio (PP), escorrentía (ESC), concentración de sedimentos (CS) y erosión. Ejemplos de algunas de las investigaciones más significativas.

Autor	Año	PP mm	ESC %	CS g l ⁻¹	Erosión Mg ha ⁻¹	Erosión Mg ha ⁻¹ año ⁻¹	Parcela m x m	Características
Francis	1986	47,9				0,38	1 x 3	1 año abandonado
Sala	1988	1176	50,0	2,0	0,98	0,98	0,5 x 2	Granito
Sala	1988	1204	68,0	2,5	1,71	1,71	0,5 x 2	Pizarras
Francis	1990					3,18	1 x 3	2 años abandonado
Rubio et al.	1990	34,2	1,1		0,09		40 x 8	Matorral
López Bermúdez et al.	1991	713	12,8			0,13	10 (8) x 2	matorral (norte)
Marques	1991	586	25,5			24,00	0,8 x 8	Campos de cultivo
González Hidalgo	1992	473			0,15	0,10	2 x 4	vegetación 100 %
González Hidalgo	1992				5,28	5,28	2 x 4	vegetación 0 %
Ruiz Flaño	1993		1,4	1,0		0,09	Circulares	Abandono
Cuadros et al.	1993	831	3,9		24,49	10,88	6 x 24	Almendros
Andreu et al.	1994		>6,25	> 0,8	18,46		40 x 8	Desnudo
Andreu et al.	1994		1,5	> 0,5	3,98		40 x 8	Matorral
De Alba	1994				0,46	0,69	10 x 25	Cultivo-Siembra
De Alba	1994				1,59	2,39	10 x 25	Cultivo-Barbecho
Edeso et al.	1999					0,40	2 x 5	Bosque
Edeso et al.	1999					6,30	2 x 5	Bosque
Edeso et al.	1999					20,20	2 x 5	Tala
Edeso et al.	1999					84,20	2 x 5	Tala con subsolado
González Hidalgo et al.	1994				0,15			100 % vegetación
González Hidalgo et al.	1994				18,17			0 % vegetación
Sánchez et al.	1994	196,4	19,6			0,90	4 x 20	Matorral (Control)
Sánchez et al.	1994	196,4	6,7			0,25	4 x 20	Matorral (Arado)
Sánchez et al.	1994	196,4	8,5			0,48	4 x 20	Matorral (Terraza)
Nicolau	1996		20,5		116,96			Derrubios de minas
Nicolau	1996		10,1		0,92			Derrubios de minas
García-Ruiz	1996		3,9	0,7		10,00		Artica
García-Ruiz	1996		3,1	0,4		5,20		Cereal fertilizado
García-Ruiz	1996		4,5	1,6		15,50		Barbecho
García-Ruiz	1996		1,4	0,2		1,10		Matorral denso
Puigdefábregas et al.	1996	265,4	14,0			0,16	2 x 8	Rambla Honda
Puigdefábregas et al.	1996	265,4	15,1			0,34	2 x 8	<i>Stipa sp.</i>
Rodríguez Martínez-Conde	1996					9,69	5 x 5	Cultivo
Rodríguez Martínez-Conde	1996					13,42	5 x 5	Cultivo
Bienes y Torcal	1997		296,6			4,31	4 x 20	Suelo desnudo
Bienes y Torcal	1997		30,7			0,06	4 x 20	Partizal

continúa en pág. siguiente >

MÉTODOS PARA LA CUANTIFICACIÓN DE LA PÉRDIDA DE SUELO Y AGUAS TRAS
INCENDIOS FORESTALES, CON ESPECIAL REFERENCIA A LAS PARCELAS EXPERIMENTALES

Autor	Año	PP mm	ESC %	CS g l ⁻¹	Erosión Mg ha ⁻¹	Erosión Mg ha ⁻¹ año ⁻¹	Parcela m x m	Características
Andreu et al.	1998		0,5-21,2	0,2-3		0,01-0,4	40 x 8	Matorral
Andreu et al.	1998		3,9-23	0,4-3		0,07-0,89	40 x 8	Desnudo
Bochet et al.	1998		2,9		0,56	0,56	< 1	Suelo desnudo
Bochet et al.	1998		2,3		0,50	0,50	< 1	<i>Anthyllis sp.</i>
De Alba	1998					7,30	10 x 25	cultivo (9°)
Padrón et al.	1998	870	10,6 %			28,50	8 x 25	Cultivo
Padrón et al.	1998	443	0,6 %			0,10	8 x 25	Monte
Ingelmo et al.	1999	553*			0,43	0,21	1,5 x 10	Lodo de depuradora
Ingelmo et al.	1999	553*			3,08	1,50	1,5 x 10	Control
Belmonte et al.	1999	384,5	1,4	0,70		0,04	8 x 2	Testigo-cultivo
Belmonte et al.	1999	423,4	13,6	34,10		19,5	8 x 2	Surcos-abandono
Bienes et al.	2000					1,3-28	4 x 20	Desnudo
Bienes et al.	2000					0,30	4 x 20	cebada
Martínez et al.	2001				1,56			Olivar-cubierta
Martínez et al.	2001				9,08			Olivar-laboreo
Cantón et al.	2001	151	5,0	7,6		0,03	Circular	Matorral
Cantón et al.	2001	151	7,1	10,8		0,09	Circular	Herbáceas
Martínez Raya et al.	2001				20,68	5,17	6 x 24	Legumbre
Martínez Raya et al.	2001				1,52	0,38	6 x 24	Matorral

nitos, el valor medio estuvo por debajo de 1 Mg ha⁻¹ año⁻¹, y en Santa Fe (pizarras) ligeramente por encima. También Francis (1986; 1990) con parcelas cerradas de 1 x 3 metros encuentra tasas de erosión en campos de cultivo abandonados en margas en una zona semiárida del sudeste peninsular que oscilan entre 1,8 y 3,2 Mg ha⁻¹ año⁻¹.

Las parcelas instaladas en Valencia por Rubio et al. (1990) son de dimensiones mayores (8 x 40 m²) pero los datos aportados para eventos intensos nunca superan las 0,2 Mg ha⁻¹ a pesar de lluvias superiores a los 70 mm día⁻¹. Valores similares encuentra Albaladejo et al. (1991) en suelos degradados de Murcia con distintas tasas de adición de Residuos Sólidos Urbanos. Nunca se superan los 0,4 Mg ha⁻¹ año⁻¹.

En Aragón, González Hidalgo (1992; 1994) prestó especial atención a la influencia de la vegetación. Las tasas de erosión en parcelas de 2 x 4 metros oscilaron entre 0,10 y 12 Mg ha⁻¹ año⁻¹ en superficies entre 100 % y 0 % de superficie protegida. Un tipo de parcela poco utilizada pero muy original es la utilizada por Ruiz Flaño (1993) para medir la tasa de erosión en distintos tipos de superficies de campos abandonados en el Pirineo (Figura 12). Estas parcelas circulares de unos 3 m² confirmaron que las tasas de erosión dependen de la cubierta vegetal y de la cubierta de piedras, y oscilan entre 0,09 hasta casi 10 Mg ha⁻¹ año⁻¹. Cuadros et al. (1993) utiliza para campos de almendros en Granada con laboreo tradicional, no laboreo y laboreo por fajas

parcelas de $6 \times 24 \text{ m}^2$ para demostrar que las tasas de erosión en el secano no son sostenibles. Los datos aportados por las parcelas de Porta-Coeli ($8 \times 40 \text{ m}^2$) muestran que las tasas de erosión son extremadamente bajas (Rubio et al. 1990). Una publicación posterior, Rubio et al. (1995), muestra tasas de erosión medias para el periodo 1988-1993 que nunca superan $1 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, y muchos años las tasas de erosión están por debajo de $0,3 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. De Alba et al. (1994) comprobó como la siembra directa ($0,46 \text{ Mg ha}^{-1}$), laboreo tradicional ($0,32 \text{ Mg ha}^{-1}$) e incluso el campo abandonado ($0,11 \text{ Mg ha}^{-1}$) generan menos sedimentos que el Barbecho ($1,59 \text{ Mg ha}^{-1}$).

Otra línea de investigación relevante y en la que las parcelas cerradas han aportado información substancial es la gestión forestal. Edeso et al. (1999) encuentran como las tasas de erosión son bajas en el bosque ($0-6 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$), se disparan con la tala ($19-67 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) y son aún mayores si a la tala le sigue la extracción de la madera ($39-84 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$). En este último tema, los trabajos de Sánchez et al. (1994) con distintos manejos en parcelas demuestran que las tasas de erosión no son muy distintas entre la parcela control, la arada y la aterrazada.

Las parcelas cerradas ayudaron también a estudiar el efecto de la longitud y la pendiente en los procesos erosivos (González-Hidalgo et al., 1995), de los taludes de obras de infraestructura (Estalrich et al., 1995; Albaladejo et al., 1998), del efecto de los usos del suelo (Romero Díaz et al., 1995; García Ruiz et al., 1996; Bienes y Torcal, 1997; López Bermúdez, 1996; Belmonte et al., 1999). También el minucioso estudio mediante las parcelas de erosión cerradas permitió confirmar que las tasas de erosión eran inferiores a lo estimado por la USLE. Y todo ello lo han descubierto y confirmado distintos investigadores. Puigdefábregas et al. (1996) encuentran con parcelas de $2 \times 8 \text{ m}^2$ en la estación experimental de Rambla Honda valores de $0,06 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para la *Retama sp.*, de $0,06-0,20 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para *Anthyllis sp.*, y de $0,48-0,34 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para *Stipa sp.* Esto significa que las tasas de erosión en el "desertizado" y "degradado" sudeste no son tan altas y que en cambio sí lo son en ambientes más húmedos. Un ejemplo de la existencia de mayores tasas de erosión en zonas húmedas lo tenemos en los campos de cultivo en Galicia, donde Rodríguez Martínez-Conde et al. (1996) mide tasas entre 4 y $13 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Bochet (1996) en el interior de Valencia y con suelos naturales muy poco protegidos por la vegetación y con parcelas de menos de 1 m^2 encuentra que las tasas de erosión son también bajas: $0,56 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para los suelos desnudos, $0,50 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para *Anthyllis sp.*, $0,08 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para *Stipa sp.*, y de $0,04 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para *Rosmarinus sp.* También en Valencia, los estudios de Ingelmo et al. (1998) en laderas naturales con parcelas de $1,5 \times 10 \text{ m}$, pero eliminando la vegetación han encontrado tasas de erosión entre $1,5$ y $2,3 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Sin duda la eliminación de la vegetación y la alteración de los suelos con el cultivo tienen mucho que decir en estas altas tasas de erosión. Y esto es una gran lección para entender lo que ocurrirá en el postincendio, ya que las zonas húmedas como Galicia pueden sufrir intensas tasas de erosión al quedar el suelo desnudo tras el fuego. Las enseñanzas de John Thornes (1985) fueron claves para el enfoque de los estudios en los que se relacionaba vegetación y erosión.

El efecto de la vegetación en el control de la erosión es determinante. Padrón et al. (1988) encuentran mediante parcelas de 8×25 metros tasas de erosión nulas para el bosque natural y el bosque reforestado con *Pinus radiata*. En cambio, el cultivo desata tasas de erosión entre $8,5$ y $28,5 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para esos mismos suelos. Los estudios entre 1993 y 1997 de De Alba (1997) asignan $7,3 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para las parcelas en cultivo de Toledo, lo que contrasta con las

tasas de erosión de alrededor de $15 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ que atribuye Rodríguez Martínez-Conde (1998) a campos de cultivo entre 1996 y 1997 en la húmeda Galicia y con parcelas de $5 \times 5 \text{ m}$. Se repite aquí la controversia de la mayor erosión en el norte que en el sur de la península ibérica. En cuanto al cultivo, Bienes et al. (2000) confirman tasas de erosión nulas para el matorral, de $0,3 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para la cebada, pero que oscilan entre $1,3$ y $28 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para el suelo desnudo cultivado. Por lo tanto, las tasas de erosión son muy altas en suelos desnudos, y el incendio provoca esa situación. No obstante, las zonas cultivadas suelen presentar mayores tasas de erosión que las zonas afectadas por incendios, y estas que las cubiertas por vegetación natural.

Cantón et al., (2001) utiliza parcelas circulares de $0,24 \text{ m}^2$ en los badlands de El Cautivo en Almería. Esas parcelas sirvieron durante tres años para medir tasas de erosión que oscilaban entre $0,03$ y $6,28 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Andreu et al. (2001) después de más de tres años de estudio con parcelas de 25 m^2 construidos sin delimitadores artificiales (picocuecas), encuentra tasas de erosión de $0,07 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en una ladera de exposición norte y de $0,14 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en una ladera de exposición sur, ambas afectadas por incendios forestales. A pesar de las innovaciones realizadas en estos últimos años, siguen predominando las parcelas clásicas como las de Albaladejo et al. (2000b) ($5 \times 15 \text{ m}$) en las que en Murcia se estudió el efecto de la incorporación de Residuos Sólidos Urbanos a distintas dosis para conocer sus efectos sobre las tasas de erosión.

Mediciones en zonas afectadas por incendio

Las parcelas cerradas han permitido el desarrollo de una de las líneas de investigación más fructífera en España: el efecto de los incendios forestales. Aunque los incendios forestales favorecen la aceleración de las tasas de erosión, muy pronto se comprobó que la evolución postincendio está llena de matices. Soto et al. (1994) encuentra que cuando el suelo se regenera con *Ulex sp.*, las tasas de erosión se reducen, y que la pérdida de suelo es menor en la zona con baja intensidad de incendio. Tal vez uno de los resultados más importantes de esta investigación se fraguó gracias a un incendio imprevisto que afectó a la parcela de *Ulex sp.*, el segundo año y que provocó que las tasas de erosión se disparasen desde las $0,68$ a las $13,14 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Las parcelas no afectadas por este segundo incendio presentaban una reducción de las tasas de erosión. Esto demuestra que la recurrencia de los incendios puede ser determinante en la degradación y la erosión de los suelos.

Pequeñas cuencas de drenaje monitorizadas a partir de una colector Gerlach demuestran a Rubio et al. (1997) que las tasas de erosión después de incendios están casi siempre por debajo de $1 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, aunque en dos casos se alcanzan las $6,5$ y las $2,6 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Bautista (1999) encuentra valores inferiores en Alicante donde durante tres años y con tres parcelas de $8 \times 2 \text{ m}$ mide tasas de erosión que sólo puntualmente superan $1 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ a pesar del reciente incendio. Valores entre $0,05$ y $2,89 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ los cuantifica el año después del incendio Gimeno et al. (2000) en Valencia. Por lo tanto valores bajos si los comparamos con zonas de cultivo, y si los comparamos con las tasas de erosión de esas misma zonas bajo condiciones de lluvia extraordinarias. En Aragón, Pérez-Cabello (2001) encuentran tasas de erosión insignificantes después de incendios tanto cuando el arbolado se mantiene como cuando es eliminado. Un ejemplo de los eventos extremos tras los incendios lo presenta Bautista (1999) en Benidorm, donde regis-

tró mayores tasas de erosión durante unas horas de lluvia torrencial en el año 1997 que durante los 3 años posteriores al incendio.

Las parcelas instaladas por el grupo del Departamento de Biología de la Universidad de Santiago de Compostela para estudiar el efecto de los incendios forestales aportaron los primeros datos en los que las tasas de erosión eran elevadas. Benito et al. (1991) demuestran como las bajas tasas de erosión de las parcelas control ($2 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) se pueden transformar en la zona incendiada en valores que alcanzan los $5 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, cuando hay alta intensidad de fuego la tasa de erosión se dispara hasta $13 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y finalmente se pueden registrar tasas de erosión de más de $50 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ si se produce tala y quema. Díaz-Fierros et al. (1994) con parcelas menores ($4 \times 20 \text{ m}$) confirma estos valores para distintos periodos de estudio. Las variaciones en los volúmenes e intensidades de precipitación no enmascaran diferencias tan claras como las antes mencionadas, siendo de destacar las mayores tasas de erosión producidas por las quemas incontroladas, y las bajas tasas de erosión de las zonas no incendiadas (Tabla 11). A estos datos hay que sumar las primeras mediciones de Vega et al. (1981) en Galicia donde atribuye a suelos quemados tasas de erosión entre 1,5 y $22 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, dependiendo de la intensidad del incendio.

Llama la atención que las tasas de erosión más altas fuesen medidas en los ambientes que parecían los más estables: la España húmeda. Además, esto ponía en entredicho la información aportada por la USLE, ya que a las zonas húmedas se les asignaban tasas de erosión menores al tener una cubierta forestal más densa. Originalmente, la ecuación fue propuesta para su uso en áreas cultivadas del este de las Montañas Rocosas. La aplicación, por necesidades de planificación, de la USLE a territorios para los que no había sido diseñada, como los suelos forestales, llevó a la comunidad científica a plantear modificaciones en el diseño y en la base de datos utilizada para la modelización. Por ello son de gran valor los datos suministrados por López Bermúdez et al. (1991) con parcelas de $10 (8) \times 2$ metros en Murcia durante los años 1989 y 1990 en distintas condiciones ambientales. En todos esos casos las tasas de erosión son bajas, casi siempre por debajo de $1 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y sólo en matorrales degradados o en zonas de cultivo se puede superar ligeramente este umbral. Eso seguía confirmando tasas de erosión de moderadas a bajas para el sudeste peninsular.

Si los incendios y los cultivos habían sido detectados como los principales responsables de las altas tasas de erosión en estudios previos, Marqués (1991) confirma en Cataluña como las tasas de erosión aún son mayores si coinciden incendios y laderas de exposición sur ($22 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$), y también el cultivo con manejos poco adecuados ($24 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$). Por lo tanto, empieza a constatare la importancia del hombre como gestor de los sedimentos, ya que algunos usos del suelo favorecen altas tasas de erosión.

Los trabajos en zonas incendiadas en Cataluña han sido retomados varias veces. Marqués y Mora (1992) confirma el efecto de la exposición al ser siempre mayores las tasas de erosión en la ladera sur, entre 7 y 10 veces mayores que en la ladera norte. Pero destaca en estos estudios las grandes diferencias que existen entre periodos. En la segunda mitad del año 1987 las tasas de erosión fueron de 21,7 y $3,5 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para la ladera sur y norte respectivamente. En cambio, en la primera mitad del año 1988 las tasas de erosión fueron de tan sólo 0,22 y $0,02 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. La clave está en las lluvias torrenciales de finales del año 1987.

MÉTODOS PARA LA CUANTIFICACIÓN DE LA PÉRDIDA DE SUELO Y AGUAS TRAS
INCENDIOS FORESTALES, CON ESPECIAL REFERENCIA A LAS PARCELAS EXPERIMENTALES

Tabla 11. Mediciones de la tasa de erosión de erosión mediante parcelas experimentales cerradas en España en zonas afectadas por incendios forestales. Precipitación durante el periodo de estudio (pp), escorrentía (Esc), concentración de sedimentos (cs) y erosión.

Autor	Año	PP mm	ESC %	CS g l ⁻¹	Erosión Mg ha ⁻¹	Erosión Mg ha ⁻¹ año ⁻¹	Parcela m x m	Características
Vega et al.	1981					22,00		Intenso
Vega et al.	1981					1,50		Moderado
Benito et al.	1991					2,00		Control
Benito et al.	1991					5,00		Incendiado
Benito et al.	1991					13,00		Alta intensidad
Benito et al.	1991					51,00		Tala y quema
Díaz-Fierros et al.	1991				0,18	1,06	4 x 20	Incendio-Control
Díaz-Fierros et al.	1991				0,03	0,20	4 x 20	Incendio-Control
Díaz-Fierros et al.	1991				0,26	1,05	4 x 20	Incendio-Control
Díaz-Fierros et al.	1991				1,29	2,58	4 x 20	Incendio-Control
Díaz-Fierros et al.	1991				0,32	0,63	4 x 20	Incendio-Control
Díaz-Fierros et al.	1991				0,31	1,84	4 x 20	Incendio-Quema 1
Díaz-Fierros et al.	1991				0,07	0,41	4 x 20	Incendio-Quema 1
Díaz-Fierros et al.	1991				1,76	7,04	4 x 20	Incendio-Quema 1
Díaz-Fierros et al.	1991				2,35	4,70	4 x 20	Incendio-Quema 1
Díaz-Fierros et al.	1991				0,09	0,18	4 x 20	Incendio-Quema 1
Díaz-Fierros et al.	1991				0,19	1,12	4 x 20	Incendio-Quema 2
Díaz-Fierros et al.	1991				0,09	0,52	4 x 20	Incendio-Quema 2
Díaz-Fierros et al.	1991				1,84	7,35	4 x 20	Incendio-Quema 2
Díaz-Fierros et al.	1991				3,80	7,60	4 x 20	Incendio-Quema 2
Díaz-Fierros et al.	1991				0,07	0,14	4 x 20	Incendio-Quema 2
Díaz-Fierros et al.	1991				1,68	2,02	4 x 20	Quema incontrolada
Díaz-Fierros et al.	1991				7,55	30,20	4 x 20	Quema incontrolada
Díaz-Fierros et al.	1991				2,70	10,80	4 x 20	Quema incontrolada
Díaz-Fierros et al.	1991				0,74	4,44	4 x 20	Quema incontrolada
Marques	1991					21,75	20 x 10	Incendios-ladera sur
Marques	1991					3,51	20 x 10	Incendios-ladera norte
Marques y Mora	1992			15,2	21,54	51,70	10 x 20	Incendio-Ladera Sur
Marques y Mora	1992				3,50	8,40	10 x 20	Incendio-Ladera Norte
Marques y Mora	1992				0,22	0,53	10 x 20	Incendio-Ladera Sur
Marques y Mora	1992				0,02	0,05	10 x 20	Incendio-Ladera Norte
Soto et al.	1994					0,50	4 x 20	Incendio <i>U. europaeus</i>
Soto et al.	1994					1,53	4 x 20	Incendio <i>U. europaeus</i>
Soto et al.	1994					0,68	4 x 20	Incendio <i>U. europaeus</i>
Soto et al.	1994					13,14	4 x 20	Segundo incendio
Soto et al.	1994					1,69	4 x 20	Baja intensidad
Soto et al.	1994					2,25	4 x 20	Baja intensidad
Soto et al.	1994					2,48	4 x 20	Baja intensidad
Soto et al.	1994					2,19	4 x 20	Alta intensidad
Soto et al.	1994					4,19	4 x 20	Alta intensidad
Soto et al.	1994					1,09	4 x 20	Alta intensidad

continúa en pág. siguiente >

Autor	Año	PP mm	ESC %	CS g l ⁻¹	Erosión Mg ha ⁻¹	Erosión Mg ha ⁻¹ año ⁻¹	Parcela m x m	Características
Rubio et al. ¹	1997	542	1,4	7,8	0,11	0,17	0,5 x x	Incendio pinar Argilitas
Rubio et al. ¹	1997	382	2,1	7,0	0,15	0,23	0,5 x x	Incendio pinar Calizas
Rubio et al. ¹	1997	498	1,3	5,1	0,07	0,11	0,5 x x	Incendio pinar Calizas
Rubio et al. ¹	1997	422	6,0	72,6	4,34	6,51	0,5 x x	Incendio pinar Arenicas
Rubio et al. ¹	1997	347	7,8	22,3	1,75	2,63	0,5 x x	Incendio pinar Argilitas
Rubio et al. ¹	1997	422	2,9	4,5	0,13	0,20	0,5 x x	Incendio pinar Argilitas
Soto y Díaz-Fierros	1998					13,14	4 x 20	Incendio
Soto y Díaz-Fierros	1998					1,54	4 x 20	Control
Bautista	1999	263				0,07	8 x 2	Incendio pinar (2º año)
Bautista	1999	316				0,21	8 x 2	Incendio pinar (2º año)
Bautista	1999	263				2,36	8 x 2	Incendio pinar (2º año)
Bautista	1999	177				0,13	8 x 2	Incendio pinar (3º año)
Bautista	1999	177				0,13	8 x 2	Incendio pinar (3º año)
Bautista	1999	177				0,74	8 x 2	Incendio pinar (3º año)
Bautista	1999	231				0,14	8 x 2	Incendio pinar (4º año)
Bautista	1999	231				0,11	8 x 2	Incendio pinar (4º año)
Bautista	1999	231				2,56	8 x 2	Incendio pinar (4º año)
Bautista	1999	165				0,78	8 x 2	Incendio pinar (5º año)
Bautista	1999	165				0,94	8 x 2	Incendio pinar (5º año)
Bautista	1999	165				7,19	8 x 2	Incendio pinar (5º año)
Gimeno et al.	2000	133,22	15,4	0,4-15	4,10	2,89	4 x 20	Incendio (439 °C)
Gimeno et al.	2000	133,22	12,1	0,3-13	3,30	2,33	4 x 20	Incendio (232 °C)
Gimeno et al.	2000	133,22	2,1	0,-0,2	0,07	0,05	4 x 20	Matorral
Andreu et al.	2001		0,3	31,0		0,07	Circular	Incendio-Exposición norte
Andreu et al.	2001		0,2	57,7		0,14	Circular	Incendio-Exposición sur
Pérez-Cabello	2001	2244,2			0,00	0,00	2 x 8	Incendio-no arbolada
Pérez-Cabello	2001	2244,2			0,00	0,00	2 x 8	Incendio-arbolada
Cerdà y Lasanta	2002	1235	3,0	0,2		0,08	3 x 10	Control 1992
Cerdà y Lasanta	2002	991	2,0	0,2		0,04	3 x 10	Control 1993
Cerdà y Lasanta	2002	1129	4,0	0,2		0,07	3 x 10	Control 1994
Cerdà y Lasanta	2002	1066	4,0	0,2		0,08	3 x 10	Control 1995
Cerdà y Lasanta	2002	1389	4,0	0,2		0,12	3 x 10	Control 1996
Cerdà y Lasanta	2002	1140	6,0	0,2		0,11	3 x 10	Control 1997
Cerdà y Lasanta	2002	1014	4,0	0,2		0,07	3 x 10	Control 1998
Cerdà y Lasanta	2002	1145	8,0	0,2		0,15	3 x 10	Control 1999
Cerdà y Lasanta	2002	1235	7,0	0,3		0,26	3 x 10	Incendio 1992
Cerdà y Lasanta	2002	991	9,0	0,2		0,19	3 x 10	Incendio 1993
Cerdà y Lasanta	2002	1129	4,0	0,2		0,08	3 x 10	Incendio 1994
Cerdà y Lasanta	2002	1066	6,0	0,2		0,11	3 x 10	Incendio 1995
Cerdà y Lasanta	2002	1389	4,0	0,2		0,11	3 x 10	Incendio 1996
Cerdà y Lasanta	2002	1140	6,0	0,1		0,10	3 x 10	Incendio 1997
Cerdà y Lasanta	2002	1014	7,0	0,1		0,08	3 x 10	Incendio 1998
Cerdà y Lasanta	2002	1145	13,0	0,2		0,22	3 x 10	Incendio 1999

MÉTODOS PARA LA CUANTIFICACIÓN DE LA PÉRDIDA DE SUELO Y AGUAS TRAS
INCENDIOS FORESTALES, CON ESPECIAL REFERENCIA A LAS PARCELAS EXPERIMENTALES

Tabla 12. Mediciones de la tasa de erosión de erosión mediante parcelas experimentales cerradas en España en zonas afectadas por incendios forestales. Precipitación durante el periodo de estudio (pp), escorrentía (Esc), concentración de sedimentos (cs) y erosión. Estudios dedicados al control de la erosión.

Autor	Año	PP mm	ESC %	CS g l ⁻¹	Erosión Mg ha ⁻¹	Erosión Mg ha ⁻¹ año ⁻¹	Parcela m x m	Características
Bautista et al.	1996	405	0,5		0,09	0,06	8 x 2	Incendio (Paja)
Bautista et al.	1996	405	2,0		0,18	0,11	8 x 2	Incendio (Control)
Bautista et al.	1996	405	1,3		0,11	0,07	8 x 2	Incendio (Paja)
Bautista et al.	1996	405	4,1		0,33	0,21	8 x 2	Incendio (Control)
Bautista et al.	1996	405	2,8		0,18	0,11	8 x 2	Incendio (Paja)
Bautista et al.	1996	405	42,0		2,92	1,84	8 x 2	Incendio (Control)
Badía y Martí	2000	446			6,05	6,91	2 x 4	Yeso control
Badía y Martí	2000	446			2,06	2,35	2 x 4	Yeso sembrado
Badía y Martí	2000	446			1,85	2,11	2 x 4	Yeso sembrado y paja
Badía y Martí	2000	446			2,97	3,39	2 x 4	Calcáreo control
Badía y Martí	2000	446			1,36	1,56	2 x 4	Calcáreo sembrado
Badía y Martí	2000	446			1,12	1,28	2 x 4	Calcáreo sembrado y paja

El estudio del control de la erosión postincendio a partir de parcelas experimentales ha sido un tema de investigación desarrollado por centros de investigación nacionales, aunque su evaluación deja mucho que desear en relación con otros países desarrollados. Los incendios forestales han sido identificados como uno de los temas a tratar, por ello algunas actuaciones como las de Bautista (1996) en Benidorm después de un incendio van dirigidas a reducir las tasas de erosión. Las parcelas con cubierta de paja muestran tasas de erosión siempre más bajas que las parcelas control (0,06 frente a 0,11; 0,07 frente a 0,21-y 0,11 frente a 1,84 Mg ha⁻¹ año⁻¹). En general, las tasas de erosión son bajas incluso para las parcelas no tratadas con la cubierta de paja. Esto mismo lo ha confirmado Badía y Martí (2000) con tasas de erosión que oscilan entre 3 y 7 Mg ha⁻¹ año⁻¹ para superficies desnudas sobre suelos en yesos y suelos calcáreos. Estos mismos suelos sembrados y especialmente los sembrados y con paja tiene tasas alrededor de tres veces menores a los de las parcelas control. Tasas de erosión bajas tras incendios también se han encontrado en el Pirineo Central (Cerdà y Lasanta, 2005) debido a la rápida recuperación que hizo que tras unos años los solutos fuesen otra vez más abundantes que los sedimentos en suspensión (Lasanta y Cerdà, 2005).

La investigación en erosión postincendio necesita estudios que mantengan durante un periodo de tiempo largo las mediciones para conocer bien el impacto del fuego en el ecosistema suelo. También necesita de investigaciones en torno a los factores básicos de la erosión del suelo: vegetación, humedad del suelo y cubierta de fragmentos de roca. Esas investigaciones deben de dirigirse al estudio de los recursos hídricos y edáficos, tanto en el suelo como en la ladera y cuenca de drenaje. Por ello es tan importante que se estudien los materiales transportados fuera de las parcelas: ya sea agua, sedimentos, materia orgánica o nutrientes. Todos estos temas vienen

siendo tratados por el grupo de investigación del Centro de Investigaciones sobre Desertificación en el Consejo Superior de Investigaciones Científicas desde finales de los años 70. José Luis Rubio inició la línea de investigación de Incendios y erosión del suelo que ahora estás siendo continuada por Vicente Andreu, Eugenia Gimeno, Julián Campo y Óscar González Pelayo. También Ramón Cerni dedico su tiempo al trabajo de campo y al mantenimiento de las estaciones experimentales. Trabajos como los ya citados aquí además de otros más recientes (Gimeno-García et al., 2004; Campo et al., 2006; González et al., 2006; Gimeno-García et al., 2007; Campo et al., 2008; González-Pelayo et al., 2010) son un buen ejemplo del trabajo realizado.

Otros grupos de investigación han estudiado la erosión tras incendio. Martín de Luís et al. (2003) comprobó como la hidrofobia es un factor clave a tener en cuenta en los procesos erosivos. Así en parcelas de 2 x 2 m demostró que en las parcelas control la erosión fue nula, en las afectadas por el incendio alcanzó valores extraordinarios, en parte debido a la extraordinaria intensidad de la lluvia. Otros estudios del mismo grupo demostraron que la variabilidad de la erosión es elevada en las zonas quemadas (de Luís et al., 2004), lo que depende de la recuperación vegetal (de Luís et al., 2001).

Los estudios en zonas húmedas del norte, como los Pirineos o Galicia, mostraron una recuperación rápida de los suelos tras el incendio, aunque las tasas de erosión siempre fueron más altas en la parcela quemada (Vega et al., 2005).



Figura 25. Trampas de sedimentos. Estación Experimental para el Estudio de la Erosión del Suelo de El Teularet – Sierra de Enguera.



Figura 26. Trampas de sedimentos destinadas al estudio de la erosión del suelo en caminos. Fotografías Lee Harold MacDonald.

Trampas de sedimentos o *silt fences*

Las trampas de sedimento, presas de sedimentos o *silt fences* son sistemas poco costosos de instalar y de reducido coste económico. Se pueden utilizar tanto para el estudio de los procesos de erosión en laderas como en cuencas de drenaje de reducidas dimensiones. Como los colectores Gerlach o parcelas abiertas pretenden capturar el sedimento en movimiento. Para ello utilizan un armazón de barras de madera o metal que ancladas al suelo sirven para sujetar una tela que permite el paso del agua y el material disuelto en ella. Las arcillas transportadas por la arroyada ayudan a taponar los poros de la tela, y el agua finalmente saltará como ocurre en una presa (Wishowskie et al., 1998). Al construir las trampas de sedimentos se debe verificar que la parte baja de la presa (ver figura 26) debe estar más baja que los laterales, de forma que el agua sólo desborde por encima de la presa. Su funcionamiento es sencillo ya que es como una presa de decantación de materiales. Las *silt fences* no permiten medir la escorrentía, pero si cuantifican bien los sedimentos aunque los pueden infravalorar. Es por ello que son muy eficientes en zonas donde la carga sedimentaria es elevada. Y las zonas quemadas son grandes candidatas para ello.

Las trampas de sedimentos no siempre tienen la superficie contribuyente definida por delimitadores. Más bien al contrario, suelen no estar delimitadas y el cálculo de la superficie contribuyente se realiza por medio de un alzamiento topográfico o buscando zonas adecuadas en las que el área de producción de sedimentos y agua esté bien delimitada. En los caminos forestales se han utilizado con mucho éxito porque se puede definir con facilidad la superficie contribuyente, y porque son zonas con cargas sedimentarias importantes.

También con las trampas de sedimentos, como ocurría con los anteriores métodos, es conveniente disponer de un pluviógrafo. Esto permitirá conocer la relación entre la tasa de erosión y la precipitación. Los datos de precipitación también indicarán la magnitud del depósito que tiene que ser pesado o cubicado, lo que permite planificar mejor el trabajo de campo. Esto es de una gran ayuda para organizar la tarea de cuantificar el material y de limpieza de los depósitos tras los eventos de lluvias intensos.

Las aplicaciones pioneras de este método de las trampas de sedimentos pertenecen a investigadores americanos que estudiaron los efectos de los incendios forestales en ladera y vaguadas (Robichaud y Brown, 2002) Posteriormente se han utilizado para el estudio de los procesos

Tabla 13. Pérdida de suelo (Kg ha^{-1}) durante los 8 eventos registrados entre el 1 de octubre de 2005 y el 17 de abril de 2006 en las trampas de sedimentos de la estación experimental para el estudio de la erosión hídrica del suelo de El Teularet - Sierra de Enguera. Precipitación (pp), BI (Incendio), BM (Matorral), HB (Herbicida), LB (Laboreo), NLB (No Laboreo), y CF (Camino Forestal). Las parcelas de incendios y de matorral se encuentran en el incendio de Bixquert, Serra Grossa, Valencia.

	pp	Evento	BI	BI	BM	BM	HB	LB	NLB	CF1	CF2	CF3	CF4
	mm	Superficie	245	248	198	179	230	287	198	152	126	102	89
1	21	10/11/05	23,5	35,1	0	0	6,8	1,9	0	42,7	21,5	15,5	10,3
2	7,2	13/11/05	3,40	2,7	0	0	0	0	0	1,3	1,7	2,4	1,6
3	8,4	22/11/05	2,4	6,1	0	0	0	0	0	2,0	1,0	2,8	1,3
4	9,2	07/01/06	0,2	4,9	0	0	0	0	0	1,1	1,98	0,9	0,8
5	10,6	10/01/06	2,5	4,8	0	0	0	0	0	2,1	2,4	1,7	1,6
6	9	29/01/06	1,2	3,5	0	0	0	0	0	1,3	1,7	2,1	2,0
7	23,4	30/01/06	106	10	0	0	10,6	6,3	0	28,4	35,9	29,5	27,6
8	8,8	26/02/06	0,9	1,2	0	0	0	0	0	1,1	1,7	2,1	2,1
	97,6	Total	17,4	17,4	17,4	17,4	17,4	8,28	0	79,85	67,75	56,89	47,07

erosivos en caminos forestales (Ramos-Scharrón, 2004; Sharron y MacDonald, 2007) Los estudios más completos ha sido desarrollados por investigadores americanos, pero estos sistemas de medición se han extendido a Europa donde en España y Portugal están ya presentes.

En las trampas de sedimentos se deben tomar muestras y calcular el sedimento depositado cada vez que hay un evento con caudal. La toma de muestras es muy sencilla, aunque laboriosa. Los sedimentos se pesan en el campo, y se toman varias muestras para determinar la humedad (secado a $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas) en el laboratorio. Si el espesor de los sedimentos es superior a los 5 cm de espesor se deben tomar muestras cada cinco centímetros para poder calcular la humedad y determinar el peso real de los sedimentos sin agua. Las muestras servirán también para determinar la textura y contenido en materia orgánica de los sedimentos, entre otras propiedades.

Las trampas de sedimentos necesitan un mantenimiento menor al de las parcelas, pero es necesario comprobar que no se producen agujeros y que la tela no se deteriora y soporta el peso del agua. En climas con elevada radiación y con vientos fuertes es posible que la tela se degrade. El viento es el gran enemigo como se ha demostrado en la Estación Experimental de El Teularet donde una de las trampas de sedimentos fue arrancada a los tres meses de su construcción. La intensa radiación hace que en el este peninsular las "silt fences" sólo resistan tres años, después, la degradación puede provocar roturas por el peso del agua y los sedimentos. Otro de los grandes enemigos de las trampas de sedimentos son los animales: conejos, jabalíes, ratas y ratones. Ello hace que sea necesario revisar su estado siempre que se prevean eventos de lluvia de cierta intensidad y volumen.

En la península ibérica se han instalado en los últimos cinco años trampas de sedimentos en Valencia y en Aveiro. Los investigadores Cerdà, Bautista y Keizer han instalados guiados por el profesor MacDonald trampas de sedimentos. Estos tipos de mediciones necesitan varios años de medidas para que sus datos tengan valor, por lo que en el próximo lustros será cuando la infor-

mación generada por las trampas de sedimentos vea la luz. En la Tabla 13 se muestran algunos de esos datos que demuestran como los caminos forestales y las zonas afectadas por incendios son las que contribuyen con más sedimentos. No obstante, las reducidas precipitaciones del periodo presentado en la tabla 13 hacen que estos datos deban tomarse como un ejemplo del uso de las trampas de sedimentos.

La continua innovación en la cuantificación de la erosión ha llevado a que algunos autores hayan modificado las trampas de sedimentos para hacerlas más sencillas y prácticas. A pesar de que el diseño existente es poco costoso, no permite una instalación ágil en pocos días tras el incendio. Y debemos de recordar que el inmediato postincendio es clave para entender la evolución de la zona quemada. Por ello, se idearon "FIS-Fast Installation Silt Fences" que permiten cuantificar la pérdida de suelo en superficies reducidas pero multiplicar el número de mediciones y conocer mejor la variabilidad espacial. Se pueden instalar 20 parcelas por día, y tan sólo requieren una lámina de hierro galvanizado de 2000 × 200 × 1 mm y 4 piquetas de hierro corrugado (400 × 12 mm) para cada parcela. Se debe utilizar una maza para la instalación de las piquetas, y cuantificar (por peso o volumen) la cantidad de sedimentos acumulada. La lámina de hierro galvanizado se coloca perpendicular a la pendiente de la ladera, y se apoya sobre las cuatro piquetas que se clavan en el suelo. La lámina de hierro galvanizado actúa como presa que hace que se decanten los materiales (Figura 27). Aunque aún se dispone de pocos datos, se puede afirmar que este método es muy viable en inmediato postincendio, del cual no disponemos de información suficiente.

CONCLUSIONES

Las mediciones de la pérdida de suelo en laderas tras incendios forestales disponen de un amplio abanico de métodos y técnicas para ser aplicado. Piquetas de erosión, levantamientos topográficos y perfiladores son adecuados para mediciones a largo plazo y en suelos con altas tasas de erosión. Son también viables para los años postincendio cuando si se producen lluvias



Figura 27. Vista de dos FIS-Fast Installation Silt fences instaladas en mayo de 2008 en el incendio de Navalón, Valencia. La imagen de la derecha fue tomada después del evento del 12 de julio de 2008 y la derecha un año después tras haberse evacuado los sedimentos del evento anterior. Estos instrumentos son de gran utilidad en la inmediatez del postincendio.

extraordinarias y por lo tanto regueros y cárcavas. Son por lo tanto unos métodos complementarios con los que más aceptación han tenido en España: las parcelas de erosión. Tanto las abiertas como las cerradas han aportado información sobre tasas y procesos de erosión en España, y siempre han estado presentes en los trabajos de investigación en suelos afectados por incendios forestales. A ellas se ha unido en la última década las trampas de sedimentos.

Estos métodos han aportado información substancial para conocer la aceleración de la erosión por el impacto del fuego, y la reducción posterior con la recuperación de la vegetación. También estos métodos han permitido comprobar cómo existe, además de la recuperación natural, estrategias eficientes en el control de la erosión postincendio.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo aquí presentado ha sido posible a la financiación del Ministerio de Ciencia e Innovación mediante la Red Temática "Efectos de los incendios forestales sobre los suelos" (CGL2007-28764-E/BTE; CGL2008-01632-E/BTE y CGL2009-06861-E/BTE).

REFERENCIAS

- Albaladejo, J., Alvarez, J., Querejeta, J., Díaz, E. y Castillo, V. 2000. Three hydro-seeding revegetation techniques for soil erosion control on anthropic steep slopes. *Land degradation and development*, 11, 315-325.
- Andreu, V., Imeson, A.C. y Rubio, J.L. 2001. Temporal changes in soil aggregates and water erosion after a wildfire in a Mediterranean pine forest. *Catena*, 44, 69-44.
- Andreu, V., Rubio, J.L. y Cerni, R. 1998. Effects of Mediterranean shrub cover on water erosion (Valencia, Spain). *Journal of Soil and Water Conservation*, 53, 112-120.
- Andreu, V., Rubio, J.L., Forteza, J. y Cerni, R. 1994. Long term effects of forest fires on soil erosion and nutrient losses. En: M. Sala y J.L. Rubio (Eds.). *Soil erosion and degradation as a consequence of forest fires*. Geofoma Ediciones. Logroño. Pp.: 79-89.
- Arnáez, J. 1989. Incisiones (cárcavas) en el nivel supraforestal de la Sierra de la Demanda (Sistema Ibérico). *Morfología y significación*. Cuadernos de Investigación Geográfica, 15, 7-16.
- Arnáez, J. y Larrea, V. 1994. Erosion models and hydrogeomorphological functioning on hill-roads (Iberian System, La Rioja, Spain). *Zeitschrift für Geomorphologie NF*, 38, 343-354.
- Arnáez, J. y Larrea, V. 1995. Erosion processes and rate of road-sides of hillroads (Iberian System, La Rioja, Spain). *Phys. Chem. Earth*, 20, 395-401.
- Badía, D. y Martí, Cl. 2000. Seeding and Mulching treatments as conservation measures of two burned soils in the central Ebro Valley, NE Spain. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 13, 219-232.
- Bautista, S. y Mayor, A., 2010. Las cuencas de drenaje como herramienta para el estudio de los efectos de los incendios forestales. 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.: 243-255.
- Bautista, S. 1999. Regeneración post-incendio de un pinar (*Pinus halepensis*, Miller. en ambiente semiárido. Erosión del suelo y medidas de conservación a corto plazo. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias, Universidad de Alicante, 238 Pp.
- Bautista, S., Bellot, J. y Vallejo, R. 1996a. Mulching treatment for postfire soil conservation in a semiarid ecosystem. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 10, 235-242.

- Belmonte Serrato, F., Romero Díaz, A. y López Bermúdez, F. 1999. Efectos sobre la cubierta vegetal, la escorrentía y la erosión del suelo, de la alternancia cultivo-abandono en parcelas experimentales. *Investigaciones Geográficas*, 22, 95-107.
- Benito, E., Soto, B. y Díaz Fierros, F. 1991. Soil erosion studies in NW Spain. En: M. Sala, J.L. Rubio y J.M. García-Ruiz (Eds.), *Soil Erosion Studies in Spain*. Geoforma Ediciones. Logroño. Pp.: 55-74.
- Benito, G., Gutiérrez, M. y Sancho, C. 1988. Perfiladores de microtopografías para el control de secciones transversales de canales. En: M. Sala y F. Gallart (Eds.), *Métodos y técnicas para la medición en el campo de procesos geomorfológicos*. Monografía nº1. Sociedad Española de Geomorfología. Barcelona. Pp.: 54-57.
- Benito, G., Gutiérrez, M. y Sancho, C. 1991. Erosion patterns in rill and interrill areas in badland zones of the Middle Ebro Basin (NE-Spain). En: M. Sala, J.L. Rubio y J.M. García-Ruiz (Eds.), *Soil Erosion Studies in Spain*. Geoforma Ediciones. Logroño. Pp.:41-54.
- Benito, G., Gutiérrez, M. y Sancho, C. 1992. Erosion rates in badland areas of the central Ebro Basin (NE-Spain). *Catena* 19, 269-286.
- Benito, G., Gutiérrez, M. y Sancho, C. 1993. The influence of physico-chemical properties on erosion processes in badland areas, Ebro basin, NE-Spain. *Z. Geomorph. N. F.* 37, 199-214.
- Bienes, R. y Torcal, L. 1997. Influencia del manejo del suelo sobre la erosión en depósitos de terraza (El Encín y Marchamalo). *Cuaternario y Geomorfología*, 11, 113-124.
- Bienes, R., Guerrero Campo, J., Aroca, J.A., Gómez, B., Nicolau, J.M. y Espigares, T. 2000. Runoff coefficient and soil erosion rates in croplands in a Mediterranean continental region in Central Spain. En *Third International ESSC Congress "Man and Soil at the Third Millennium"*, Valencia, 302.
- Bochet, E., Rubio, J.L. y Poesen, J. 1998. Relative efficiency of three representative matorral species in reducing water erosion at the microscale in a semi-arid climate (Valencia, Spain). *Geomorphology*, 23, 139-150.
- Boix-Fayos, C., Martínez-Mena, M., Calvo-Cases, A., Arnau-Rosalén, E., Albaladejo, J. y Castillo, V. 2007. Causes and underlying processes of measurement variability in field erosion plots in Mediterranean conditions. *Earth Surface Processes and Landforms* 32, 85-101.
- Calvo, A., Harvey, A.M., Payà, J. y Alexander, R.W. 1991. Response of badland surfaces in South East Spain to simulated rainfall. *Cuaternario y Geomorfología* 5, 3-14.
- Campo, J., Andreu, V., Gimeno-García, E., González, O., Rubio, J.L., 2006. Occurrence of soil erosion after repeated experimental fires in a Mediterranean environment. *Geomorphology* 82, 376-387.
- Cantón, Y., Domingo, F., Solé-Benet, A. y Puigdefábregas, J. 2001. Hydrological and erosion response of a badlands system in semiarid SE Spain. *Journal of Hydrology*, 252, 65-84.
- Casalí, J.J. López, J. y Giráldez, J.V. 1999. Ephemeral gully erosion in southern Navarra (Spain). *Catena*, 36 (1-2) 65-84.
- Ceballos, A. 1997. Balance de agua de una cuenca hidrográfica bajo explotación de dehesa en Extremadura. Tesis Doctoral. Universidad de Extremadura, 207 pp. En el texto puede estar citado como Ceballos, 1996.
- Ceballos, A., Schnabel, S., Gómez-Amelia, D. y Cerdà, A. 1998. Relación entre la escala espacial y escorrentía superficial en una pequeña cuenca hidrográfica semiárida ante condiciones contrastadas de humedad del suelo (Extremadura, Suroeste de España). *Cuaternario y Geomorfología*, 12, 63-75.
- Cerdà, A. y Lasanta, T. 2002. Exportación de sedimentos después de incendios en campos abandonados. Resultados de la Estación Experimental "Valle de Aisa". Pirineos. En E. Serrano, A. García de Celis, J.C. Guerra, C.G. Morales y M.T. Ortega (Eds.): *Estudio recientes (2000-2002) en Geomorfología. Patrimonio, montaña y dinámica territorial*. Universidad de Valladolid. Pp.: 11-22.
- Cerdà, A. y Payà, J. 1995. Morfología y procesos superficiales en badlands sobre arcillas del Keuper, Requena, Valencia. *Cuaternario y Geomorfología* 9, 59-72.
- Cerdà, A., Lasanta, T., 2005. Long-term erosional responses after fire in the Central. Spanish Pyrenees 1. Water and sediment yield. *Catena* 60, 59-80.
- Cerdà, A., Marcos, E., Llovet, J., Benito, E., Pérez-Cabello, F., Úbeda, X., Jordán, A., Zavala, L.M. y Ruiz-Sinoga, J.D. 2010. La lluvia simulada como herramienta para la investigación del efecto de los incen-

- dios forestales sobre los suelos. 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.: 43-83.
- Cuadros, S., Martínez, A. y Francia, J.R. 1993. Cultivos frutales de secano en fuertes pendientes: aspectos erosivos. Congreso Forestal Español. Tomo III Ponencias y Comunicaciones, 39-44.
- De Alba, S. 1998. Procesos de degradación del suelo por erosión en ecosistemas agrícolas de condiciones ambientales mediterráneas en la región central de España. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de Madrid, 590 pp.
- De Alba, S. 1998. Redistribución y erosión del suelo por las prácticas agrícolas de laboreo en laderas cultivadas. V Reunión Nacional de Geomorfología, Granada, pp. 471-481.
- De Alba, S., López Fando, C. y Pérez González, A. 1994. Erosión hídrica en sistemas agrícolas. Diseño experimental y resultados preliminares. III Reunión Nacional de Geomorfología, Logroño, Tomo II, pp. 55-68.
- De Antonio, R., Almorox, J., Saa, A. y Gallardo, J. 1993. Soil erosion in waste gypsiferous lands. Workshop on Soil Erosion in Semi-Arid Mediterranean Areas, Taormina, pp. 91-97.
- De Luís, M., García Cano, M.F., Cortina, J., Raventós, J., González Hidalgo, J.C. y Sánchez, J.R. 2001. Climatic trends, disturbances, and short-term vegetation dynamics in a Mediterranean shrubland. *Forest Ecology and Management*, 147, 25-37.
- De Luís, M., González Hidalgo, J.C. y Raventós, J. 2003. Efectos erosivos de una lluvia torrencial en suelos afectados por quemas experimentales de diferente severidad. *Cuaternario y Geomorfología*, 17, 57-67.
- De Luís, M., González Hidalgo, J.C. y Raventós, J. 2004. Hidrología superficial y erosión del suelo en un aula-gar (*Ulex parviflorus*) sometido a incendios experimentales y lluvia extrema simulada. En Riesgos naturales y antrópicos en Geomorfología. En G. Benito y A. Diez Herrero (Eds.), Sociedad Española de Geomorfología. Pp: 223-232.
- Díaz Fierros, F., Benito, E. y Soto, B. 1994. Action of forest fires on vegetation cover and soil erodibility. En: M. Sala y J.L. Rubio (Eds.), Soil erosion and degradation as a consequence of forest fires. Geofoma Ediciones. Logroño. Pp.:163-176.
- Díaz-Fierros, F. y Soto, B. 1998. Procesos de erosión: necesidades de información de suelos para su cuantificación y control. *Boletín de la Sociedad Española de la Ciencia del Suelo*, 4, 61-71.
- Díaz-Fierros, F., Benito, E. y Pérez Moreira, R. 1987. Evaluation of the USLE for the prediction of erosion in burnt forest areas in Galicia (N.W. Spain). *Catena*, 14, 189-199.
- Díaz-Fierros, F., Soto, B., Pérez, R., y Benito, E. 1991. Factores de escala en la medida de la erosión hídrica en suelos incendiados del NW de España. *Suelo y Planta*, 1, 565-574.
- Edeso, J.M., Merino, A., González, M.J. y Marauri, P. 1998. Manejo de explotaciones forestales y pérdida de suelo en zonas de elevada pendiente del País Vasco. *Cuaternario y Geomorfología* 12 (1-2), pp. 105-116.
- Edeso, J.M., Merino, A., González, M.J. y Marauri, P. 1999. Soil erosion under different harvesting managements in sep forestlands from northern Spain. *Land degradation and development*, 10, 79-88.
- Estalrich, E., Hernández, A.J., Aranda, L. y Pastor, J. 1997. Estudio de factores edáficos relacionados con la erosión y escorrentía en taludes de fuerte pendiente; ensayos de revegetación. *Edafología*, 2, 161-167.
- Ferré, E. y Senciales, J.M. 1990. Notas sobre la erosión hídrica en las laderas de los Montes de Málaga. I Reunión Nacional de Geomorfología. Teruel. Pp.: 561-571.
- Francis, C. 1985. Hydrological investigation of soils in relation to gully head development in South East Spain. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, X, 55-63.
- Francis, C. 1986. Soil erosion on fallow fields: an example from Murcia. *Papeles de Geografía Física*, 11, 21-28.
- Francis, C. 1990. Soil erosion and organic matter losses on fallow land: a case study from south-east Spain. En: J. Boardman, I.D.L. Foster y J.A. Dearing (Eds.), *Soil Erosion on Agricultural Land*. John Wiley & Sons, Chichester. Pp.: 331-338.
- García Ruiz, J.M. y López Bermúdez, F. 2009. La erosión del suelo en España. Sociedad Española de Geomorfología, 441 pp.

- García Ruiz, J.M. 1996. Marginación de tierras y erosión en áreas de montaña. En: T. Lasanta y J.M. García Ruiz (Eds.), *Erosión y recuperación de tierras en áreas marginales*. Instituto de Estudios Riojanos, Sociedad Española de Geomorfología. Logroño. Pp.: 33-50.
- García Ruiz, J.M. y Valero Garcés, B.L. 1996-1997. Procesos geomórficos históricos y su relación con la actividad humana en el Pirineo Central Español. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 22-23, 33-56.
- Gerlach, T. 1967. Evolutions actuelles des versants dans les Carpathes, d'après l'exemple d'observations fixes. En Macar, P. (Ed.): *L'évolution des versants*, 129-138.
- Gimeno, E., Andreu, V. y Rubio, J.C. 2000. Changes in organic matter, nitrogen, phosphorus and cations in soil as a result of fire and water erosion in a Mediterranean landscape. *European Journal of Soil Science*, 51, 201-210.
- Gimeno-García, E., Andreu, V., Rubio, J.L., 2004. Spatial patterns of soil temperatures during experimental fires. *Geoderma* 118, 17-38.
- Gimeno-García, E., Andreu, V., Rubio, J.L., 2007. Influence of vegetation recovery on water erosion at short and medium-term after experimental fires in a Mediterranean shrubland. *Catena* 69, 150-160.
- Gómez Amelia, D. y Schnabel, S. 1992. Procesos sedimentológicos e hidrológicos en una pequeña cuenca bajo explotación de dehesa en Extremadura. II Reunión Nacional de Geomorfología. Murcia. Pp.: 55-63.
- González del Tánago, M., Cañadas, N., Blanco, R. y Ternan, L. 1994. Erosión bajo diferentes cubiertas vegetales, en un suelo de rañas de Guadalajara. III Reunión Nacional de Geomorfología, Tomo II. Logroño. Pp.: 227-238.
- González Hidalgo, J.C. 1992. Pautas espaciales de la erosión hídrica en el semiárido aragonés. Exposición topográfica y cubierta vegetal factores de erosión. Tesis Doctoral. Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio. Universidad de Zaragoza.
- González Hidalgo, J.C. 1994. Efectos de la superficie protegida en la variación de la producción de sedimentos. *Cuaternario y Geomorfología* 8 (3-4), pp. 65-76.
- González-Pelayo, O., Andreu, V., Campo, J., Gimeno-García, E., Rubio, J.L., 2006. Hydrological properties of Mediterranean soils burned with different fire intensities. *Catena*, 68, 186-193.
- González-Pelayo, O., Andreu, V., Gimeno-García, E., Campo, J. y Rubio, J.L. 2010. Rainfall influence on plot-scale runoff and soil loss from repeated burning in a Mediterranean-shrub ecosystem, Valencia, Spain. *Geomorphology*, 118, 444-452.
- Gutiérrez Elorza, M. y Rodríguez Vidal, J. 1985. Fenómenos de subfisión (piping) en la depresión media del Ebro. *Cuadernos de Investigaciones Geográficas*, X, 75-83.
- Haigh, M.J. 1981. The use of erosion pins in the study of slope evolution. *British Geomorphological Research Group. Technical Bulletin*, 18, 31-49.
- Hayward, J.A. 1968. The measurement of soil loss from fractional acre plots. *Lincoln Papers*. En: *Water resources 5*, New Zealand Agricultural Engineering Institute. Lincoln College. Canterbury.
- Higgit, D.L. y Warbuton, J. 1999. Applications of differential GPS in upland fluvial geomorphology. *Geomorphology*, 29, 121-134.
- Hudson, N.W. 1993. *Field measurement of soil erosion and runoff*. FAO. Roma.
- Ingelmo, F., Ibáñez, A. y Pomares, F. 1999. Water erosion in a degraded soil amended with sewage sludge under dry Mediterranean climate. *Extended Abstracts 6th International Meeting on Soils with Mediterranean Type of Climate*, Barcelona, 1017-1019.
- Ingelmo, F., Ibáñez, A., Pomares, F., García, J. y Mares, M. 1998. Measures for soil protection in citrus orchards and in abandoned fields in the Community of Valencia (Spain). En: A. Rodríguez, C.C. Jiménez y M.L. Tejedor (Eds.) *The soil as a strategic resource: degradation processes and conservation measures*. Geoforma Ediciones. Logroño. Pp.:431-439.
- La Roca, N. 1984. La erosión por arroyada en una estación experimental (Requena, Valencia). *Cuadernos de Investigación Geográfica*, X, 85-98.
- Lasanta, A y Cerdà, A. 2005. Long-term erosional responses after fire in the Central Spanish Pyrenees: 2. Solute release. *Catena*, 60, 80-101.

- Lasanta, T. y Sobrón, I. 1988. Influencia de las prácticas de laboreo en la evolución hidrogeomorfológica de suelos cultivados con viñedo. Cuadernos de Investigación Geográfica, 14, 81-97.
- López Bermúdez, F. 1989. Incidencia de la erosión hídrica en la desertificación de una cuenca fluvial mediterránea semiárida: Cuenca del Segura. España. En: Degradación de zonas áridas en el entorno mediterráneo español. Monografías de la Dirección General de Medio Ambiente. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. Madrid. Pp.: 63-81.
- López Bermúdez, F., García Ruiz, J.M., Romero Díaz, M^a. A., Ruiz Flaño, P., Martínez Fernández, J.M., Lasanta, T. 1993. Medidas de flujos de agua y sedimentos en parcelas experimentales. Cuadernos Técnicos de la SEG, nº 6. Geoforma Ediciones. Logroño.
- López Bermúdez, F., Romero Díaz, M.A., Ruiz, A., Fisher, G.C., Francis, C. y Thornes, J.B. 1985. Erosión y ecología en la España semiárida (Cuenca de Mula, Murcia). Cuadernos de Investigación Geográfica, X, 113-126.
- López Bermúdez, F., Romero, M.A. y Martínez, J. 1991. Soil erosion in semi-arid Mediterranean environment. El Ardal experimental field (Murcia, Spain). En: M. Sala, J.L Rubio y J.M. García-Ruiz (Eds.), Soil Erosion Studies in Spain. Geoforma Ediciones. Logroño. Pp.:137-152.
- Marqués, M.A. 1991. Soil erosion research: experimental plots on agricultural and burnt environments near Barcelona. En: M. Sala, J.L Rubio y J.M. García-Ruiz (Eds.), Soil Erosion Studies in Spain. Geoforma Ediciones. Logroño. Pp.:pp. 153-164.
- Marqués, M.A. y Mora, E. 1992. The influence of aspect on runoff and soil loss in a Mediterranean burnt forest (Spain). Catena, 19, 333-344.
- Martínez Raya, A., Francia, J.R., Ruiz Gutiérrez, S., Martínez Vilela, A. Y Aguilar, J. 2001. Evaluation of soil protection with different types of plant cover. En García-Torres, L., Benites, J. y Martínez Vilela, A. (Eds.) Conservation agriculture. A worldwide challenge. I World Congress on Conservation Agriculture. Madrid. Pp.: 431-434.
- Martínez-Casasnovas, J.A., Ramos, M.C., y Ribas-Dasi, M. 2002. Soil erosion caused by extreme rainfall events: mapping and quantification in agricultural plots from very detailed digital elevation models. Geoderma, 105, 125-140.
- Meaza, G., Edeso, J.M., Merino, A. y Ormaetxea, O. 1994. Cambios en la dinámica geomorfológica y sus repercusiones en los suelos y en la vegetación natural a consecuencia de explotación forestal intensiva. El caso de la cabecera del Mape-Sollube (Ría de Gernika-Urdaibai. Vizcaya). III Reunión Nacional de Geomorfología. Tomo II. Logroño. Pp.: 441-456.
- Molina, M.J. y Linares, J.V. 1996. Moviilización del suelo por impacto de las gotas de lluvia: ensayo de un nuevo diseño de cápsulas para su determinación en pendientes. Cuaternario y Geomorfología, 10, 21-31.
- Navarro Hevia, J. y San Martín Fernández, R. 2000. Primeros datos sobre erosión hídrica en las obras viarias del entorno de Palencia. Rutas, 80, 4-15.
- Navarro Hevia, J., San Martín, R. y Jonte, M.A. 2000. Erosion rates in railroad cuts around Palencia (Spain). En: J.L. Rubio, R.P.C. Morgan, S. Asins y V. Andreu (Eds.), Third International ESSC Congress "Man and Soil at the Third Millennium". Volumen II. Geoforma Ediciones. Valencia. Pp.: 1401-1414.
- Navas, A. y Machin, J. 1991. A preliminary research on the use of cesium-137 to investigate soil erosion in the semiarid landscape of the central Ebro river valley. En: M. Sala, J.L Rubio y J.M. García-Ruiz (Eds.), Soil Erosion Studies in Spain. Geoforma Ediciones. Logroño. Pp.: 191-202.
- Nicolau, J.M. 1996. Effects of topsoiling on rates of erosion and erosion processes in coal mine spoil banks, Teruel, Spain. International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, 10, 73-78.
- Oostwoud Wijdenes, D.J., Poesen, J., Vandekerckhove, L. y Ghesquiere, M. 2000. Spatial distribution of gully head activity and sediment supply along an ephemeral channel in a Mediterranean environment. Catena, 39, 147-167.
- Padrón, P.A., Vargas, G.E. y Ortega, M.J. 1998. Preliminary data from erosion experimental plots of Andisols of Tenerife (Canary Islands). En: A. Rodríguez, C.C. Jiménez y M.L Tejedor (Eds.), The soil as a strategic resource: degradation processes and conservation measures. Geoforma Ediciones. Logroño. Pp.:219-227.

- Pereira, P., Bodí, M.B., Úbeda, X., Cerdà, A., Mataix-Solera, J., Balfour, V. y Woods, S. 2010. Las cenizas en el ecosistema suelo. 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.: 349-401.
- Pérez Cabello, F. 2001. La capacidad de reconstrucción ambiental posterior al incendio forestal: modelización en el prepirineo oscense. Tesis Doctoral. Universidad de Zaragoza. Zaragoza.
- Pérez-Cabello, F., Cancer, L., de la Riva, J., Echeverría, M., e Ibarra, P. 2000. El papel de la vegetación quemada y del proceso de regeneración vegetal en relación con la pérdida del suelo. EL caso del incendio de Agüero (Prepirineo oscense, España). *Il Suolo*, 3, 24-30.
- Porta, J., Poch, R.M. y Boixadera, J. 1989. Land evaluation and erosion control practices on mined soils in NE Spain. En: U. Schwertmann, R.J. Rickson y K. Auerswald (Eds.), *Soil erosion protection measures in Europe*. Soil Technology, Series 1. Catena Verlag. Cremlingen. Pp.: 189-206.
- Puigdefábregas, J., Solé, A., Lázaro, R. y Nicolau, J.M. 1992. Factores que controlan la escorrentía en una zona semiárida sobre micaesquistos. *II Reunión Nacional de Geomorfología*, pp. 117-127.
- Ramos-Scharrón, C.E. 2004. Measuring and predicting erosion and sediment yields on St. John, U.S Virgin Islands. Ph.D. Dissertation. Department of Geosciences, Colorado State University. Fort Collins, CO.
- Ramos-Scharrón, C.E. y MacDonald, L.H., 2005. Measurement and prediction of sediment production from unpaved roads, St. John, U.S. Virgin Islands. *Earth Surface Processes and Landforms*, 30, 1283-1304.
- Renschler, C.S., Mannaerts, C. y Diekkruger, B. 1999. Evaluating spatial and temporal variability in soil risk-rainfall erosivity and soil loss ratios in Andalucía, Spain. *Catena*, 34, 209-225.
- Robichaud, P.R. y Brown, R.E. 2002. Silt Fences: An Economical Technique for Measuring Hillslope Soil Erosion. General Technical Report RMRS-GTR-94, Rocky Mountain Research Station, United State Department of Agriculture, Forest Service, 24 pp.
- Rodríguez Martínez-Conde, R., Puga, J.M., Vila, R. y Cibeira, A. 1996. La erosión en campos cultivados en Galicia (NW España). *IV Reunión de Geomorfología, O Castro (La Coruña)*, 147-162.
- Rodríguez, J.M., Vicén, F.J., Badía, D. y Ascaso, J. 1999-2000. Efecto del incendio forestal sobre la auto-sucesión vegetal y erosión en los montes de Castejón de Valdejasa (Zaragoza). *Geogica*, 7,55-68.
- Romero Díaz, M.A. 2000. Los estudios de erosión en la región de Murcia. Referencias bibliográficas. *Papeles de Geografía*, 32, 141-164.
- Romero Díaz, M.A. 2002. La erosión en la Región de Murcia. Universidad de Murcia y Caja de Ahorros del Mediterráneo, Murcia, 337 pp.
- Romero Díaz, M.A., López Bermúdez, F., Thornes, J.B. Francis, C.F. y Fisher, G.C. 1988. Variability of overland flow erosion rates in a semi-arid Mediterranean environment under matorral cover, Murcia, Spain. *Catena Supplement*, 13, 1-11.
- Romero Díaz, A., Barberá, G.G. y López Bermúdez, F. 1995. Relaciones entre erosión del suelo, precipitación y cubierta vegetal en un medio semiárido del sureste de la península ibérica. *Lurralde*, 18, 229-243.
- Rubio, J., Andreu, V. y Cerni, R. 1990. Degradación del suelo por erosión hídrica: Diseño experimental y resultados preliminares. En: J. Albaladejo, M.A. Stocking y E. Díaz (Eds.), *Degradación y regeneración del suelo en condiciones ambientales mediterráneas*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Murcia, 215-235.
- Rubio, J.L. 1987. Desertificación en la Comunidad Valenciana: antecedentes históricos y situación actual de erosión. *Revista Valenciana D'Estudis Autònoms* 7, 231-258.
- Rubio, J.L., Andreu, V. y Cerni, R. 1990. Degradación del suelo por erosión hídrica: Diseño experimental y resultados preliminares. En: J. Albaladejo, M.A. Stocking y E. Díaz (Eds.), *Degradación y regeneración del suelo en condiciones ambientales mediterráneas*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Murcia. Pp.: 215-235.
- 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, 67-78.

- Ruiz Flaño, P. 1993. Procesos de erosión en campos abandonados del Pirineo. El ejemplo del valle de Aísa. Monografías Científicas 4, Geoforma Ediciones. Logroño. Pp.:191 pp.
- Sala, M. 1988. Slope runoff and sediment production in two mediterranean mountain environments. *Catena*, 12, 13-29.
- Sala, M. 1996. Cobertura vegetal y respuesta hidrológica. Ejemplo de las Cordilleras Costeras Catalanas. En A.J. Campesino y C. Velasco (Eds.) España-Portugal: Ordenación Territorial del Sureste Comunitario. Universidad de Extremadura, Cáceres, 177-188.
- Sánchez, G. 1995. Arquitectura y dinámica de las matas de esparto (*Stipa tenacissima* L.) efectos en el medio e interacciones con la erosión. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid. Madrid.
- Sánchez, J.R., Mangas, V.J., Ortiz, C., y Bellot, J. 1994. Forest fire effect on soil chemical properties and runoff. En: M. Sala y J.L. Rubio (Eds.). Soil erosion and degradation as a consequence of forest fires. Geoforma Ediciones. Logroño. Pp.:53-65.
- Sancho, C., Benito, G. y Gutiérrez, M. 1991. Aguas de erosión y perfiladores microtopográficos. Cuadernos Técnicos de la S.E.G. nº2, SEG, Geoforma Ediciones. Logroño.
- Sancho, C., Gutiérrez, M. y Peña, J.L. 1991. Erosion and sedimentation during the upper Holocene in the Ebro depression: quantification and environmental significance. En: M. Sala, J.L. Rubio y J.M. García-Ruiz (Eds.), Soil Erosion Studies in Spain. Geoforma Ediciones. Logroño. Pp.: 219-228.
- Sanroque, P., Rubio, J.L. y Mansanet, J. 1985: Efectos de los incendios forestales en las propiedades del suelo, en la composición florística y en la erosión hídrica de zonas forestales de Valencia (España). *Revue d'Ecologie et de Biologie du Sol*, 22, 131-147.
- Scoging, H. 1982a. Spatial variations in infiltration, runoff and erosion on hillslopes in semi-arid Spain. En: R. Bryan y A. Yair (Eds.), *Badland Geomorphology and Piping*. Geobooks. Norwich. Pp.: 89-112.
- Scoging, H. 1982b. Runoff generation and sediment mobilisation by water. En: D.S.G. Thomas (Ed.), *Arid Zone Geomorphology*. Belhaven Press. Londres. Pp.: 87-116.
- Schnabel, S. 1997. Soil erosion and runoff production in a small watershed under silvo-pastoral landuse (Dehesas) in Extremadura, Spain. Geoforma Ediciones. Logroño. Pp.:167 pp.
- Schnabel, S., Gómez Amelia, D. y Bernet, R. 1996. La pérdida de suelo y su relación con la cubierta vegetal en una zona de dehesa. VII Coloquio Ibérico de Geografía, Cáceres. Cáceres. Pp.: 195-206.
- Schnabel, S., Gómez Amelia, D. y Ceballos, A. 1998. Eventos extremos y erosión en cárcava. En: A. Gómez Ortiz, y F. Salvador Franch (Eds.), *Investigaciones recientes de la Geomorfología Española*. Pp.: 143-152.
- Schumm, S.A. 1956a. The role of creep and rainwash in the retreat of badlands slopes. *American Journal of Science*, 254, 693-706
- Schumm, S.A. 1956b. Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. *Bulletin of the Geological Society of America*, 67, 597-646
- Schumm, S.A. 1962. Erosion on miniature pediments in badlands National Monument, South Dakota. *Bulletin of the Geological Society of America*, 73, 719-724.
- Sirvent J, Desir G., Gutiérrez M, Sancho C, Benito G. 1997. Erosion rates in badland areas recorded by collector, erosion pins and profilometer techniques (Ebro basin, NE-Spain). *Geomorphology*, 18, 61-75.
- Sirvent, J., Gutiérrez, M. y Desir, G. 1996. Erosión e hidrología de áreas acarcavadas. En: T. Lasanta y J.M. García Ruiz (Eds.), *Erosión y recuperación de tierras en áreas marginales*. Instituto de Estudios Riojanos, Sociedad Española de Geomorfología. Logroño. Pp.: 109-135.
- Solé, A., Calvo, A., Cerdà, A., Lázaro, R., Pini, R. y Barbero, J. 1997. Influences of micro-relief patterns and plant cover on runoff related processes in badlands from Tabernas (SE Spain). *Catena*, 31, 23-38.
- Soler, M. 1991. Pèrdua de sòl i de nutrients posterior a un incendi forestal. Tesis Doctoral. Universitat de Barcelona. Barcelona.
- Soler, M. y Sala, M. 1990. La erosión producida tras un incendio en un encinar. I Reunión Nacional de Geomorfología. Teruel. Pp.: 669-675.
- Soler, M. y Sala, M. 1992 Effects of fire and of clearing in a Mediterranean *Quercus ilex* woodland: an experimental approach. *Catena*, 19, 321-332.

- Soler, M., Sala, M. y Gallart, F. 1994. Post fire evolution of runoff and erosion during an eighteen month period. En: M. Sala y J.L. Rubio (Eds.), Soil erosion and degradation as a consequence of forest fires. Geofoma Ediciones. Logroño. Pp.:149-161.
- Soto, B. y Díaz-Fierros, F. 1998. Runoff and soil erosion from areas of burnt scrub: comparison of experimental results with those predicted by the WEPP model. *Catena*, 31, 257-270.
- Soto, B., Basanta, R., Benito, E., Pérez, R. y Díaz Fierros, F. 1994. Runoff and erosion from burnt soils in Northwest Spain. En: M. Sala y J.L. Rubio (Eds.), Soil erosion and degradation as a consequence of forest fires. Geofoma Ediciones. Logroño. Pp.:91-98.
- Staley, D., Wasklewicz, T. y Kean, J. 2010. Observations of drainage network change in a recently burned watershed using terrestrial laser scanning. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 12, EGU2010-4849-1, 2010, EGU General Assembly 2010. Viena.
- Stroosnijder, L. 2005. Measurement of erosion: it is possible?. *Catena*, 64, 162-173.
- Ternan, J.L., Williams, A.G., Elmes, A. y Fitzjohn, C. 1996. The effectiveness of bench-terracing and afforestation for erosion control on Raña sediments in Central Spain. *Land Degradation and Development*, 7, 337-351.
- Thornes, J.B. 1985. The ecology of erosion. *Geography*, 70, 222-36.
- Úbeda, X. 2000. Els incendis forestals com a causants de l'increment d'erosió del sòl. *Butlletí de la Institució Catalana d'Historia Natural*, 68, 5-14.
- Úbeda, X., Reina, L. y Sala, M. 1998. Cuantificación de la erosión en un camino forestal de un bosque típico mediterráneo de *Quercus suber*. *NORBA Revista de Geografía*, X, pp. 185-196.
- Vega, J.A., Bara, S., Villamuera, M.A. y Alonso, M. 1983. Erosión después de un incendio forestal. Memoria interna del Departamento Forestal de Zonas Húmedas de Lourizan. CRIDA 01. INIA. Madrid.
- Vega, J.A., Fernández, C. y Fonturbel, T. 2005. Throughfall, runoff and soil erosion after prescribed burning in forest scrubland in Galicia (NW Spain). *Land Degradation and Development*, 16, 37-51.
- Wishowskie, J.M., Mamo, M. y Bubenzer, G.D. 1998. Trap efficiencies of filter fabric fence. 1998 Annual meeting American Society of Agricultural Engineers. Paper 98-2158. St. Joseph, MI.

