



2.6

Las cuencas de drenaje como herramienta para el estudio de los efectos de los incendios forestales

Susana Bautista¹ y Ángeles G. Mayor²

¹Departamento de Ecología, Universidad de Alicante. Apdo. 99. 03080, Alicante. s.bautista@ua.es

²Fundación CEAM. Charles Darwin 14, Parque Tecnológico, 46980 Paterna, Valencia.

Las cuencas de drenaje como herramienta para el estudio de los efectos de los incendios forestales

Susana Bautista¹ y Ángeles G. Mayor²

¹ Dpto. Ecología, Universidad de Alicante. Apdo. 99, 03080 Alicante. s.bautista@ua.es

² Fundación CEAM. Charles Darwin 14, Parque Tecnológico, 46980 Paterna, Valencia.

RESUMEN

Los estudios a escala de cuenca sobre impactos hidrológicos y geomorfológicos de los incendios permiten conocer el balance neto de los procesos de generación y redistribución de escorrentía, de erosión en laderas y cauces, y de redistribución y depósito temporal de sedimentos. El uso de cuencas de drenaje es, por tanto, el método más adecuado para la cuantificación de la exportación neta de sedimentos desde los ecosistemas afectados por los incendios. Sin embargo, existen diversas limitaciones que reducen sensiblemente la contribución de este tipo de estudios al conocimiento del impacto de los incendios y sus factores de control. El presente capítulo discute los pros y contras del uso de cuencas de drenaje y resume los métodos principales, y sus detalles técnicos más relevantes, para la medida del comportamiento hidrológico y la exportación de sedimentos a escala de cuenca. Para la cuantificación de sedimentos en microcuencas y pequeñas vaguadas, se recomienda el uso de mallas de retención de sedimentos (*silt fences*). Para estudios centrados en el comportamiento hidrológico, se describen los elementos esenciales de las estaciones de aforo. Finalmente, se discuten varias metodologías que estiman el impacto geomorfológico de los incendios en cuencas sin emplear estaciones de aforo.

INTRODUCCIÓN

El uso de cuencas de drenaje para estudios hidrológicos y geomorfológicos tiene la ventaja de que considera unidades funcionales completas, con límites naturales, que integran la variedad de procesos, flujos e interacciones implicados en la dinámica de los ecosistemas y paisajes. En el caso del estudio de los procesos de erosión, el uso de cuencas de drenaje integra la erosión en laderas y en la red de canales de drenaje, la erosión laminar y en regueros, así como la redistribución y sedimentación temporal, en distintos puntos de la cuenca, del suelo erosionado (Dietrich y Dunne, 1978; Moody y Martin, 2001a). Es, por tanto, la escala más adecuada para valorar la magnitud de los efectos indirectos (externos) y acumulados de perturbaciones, cambios de uso y actividades de gestión del territorio, así como para el estudio de balances hídricos. Obviamente, el uso de cuencas de drenaje es obligado cuando se estudian variables o atributos que son propios de esta escala de trabajo, como, por ejemplo, el papel de la forma y el tamaño de las cuencas o de la topología de la red de drenaje en el comportamiento hidrológico, o el papel de las perturbaciones en el caudal de corrientes de agua.

Sin embargo, el uso de cuencas tiene una serie de limitaciones que explican su menor participación en los estudios hidrológicos en comparación, por ejemplo, con el uso de parcelas de erosión. Una de las características más limitantes de esta escala de trabajo es la dificultad de establecer réplicas o conjuntos de cuencas de similares características a las que se les puedan aplicar diferentes

tratamientos de forma que se pueda analizar estadísticamente el efecto de los mismos. Incluso pequeñas variaciones en la forma, tamaño o topografía de las cuencas pueden suponer diferencias relevantes en la producción de escorrentía o sedimentos, especialmente tras las perturbaciones. Es por esto que el estudio del efecto de tratamientos y actividades de gestión en cuencas de drenaje requiere normalmente de un periodo de calibrado previo, en el que se analiza, para un conjunto amplio y representativo de precipitaciones, las diferencias intrínsecas entre cuencas en el comportamiento hidrológico y en la exportación de sedimentos. De este modo, una vez aplicados los tratamientos, se podrá diferenciar con propiedad los efectos debidos a los mismos de las diferencias preexistentes entre las cuencas evaluadas. Un caso pionero en el uso de esta metodología es la estación experimental de *San Dimas Experimental Forest* en California, EEUU (USDA, 1954), establecida en 1934 y en la que hay una importante historia de incendios recurrentes que ha generado una valiosa base de datos sobre relaciones precipitación-escorrentía pre y postincendio.

Otras limitaciones al uso de cuencas de drenaje se derivan de la heterogeneidad espacial y temporal de muchas de las variables consideradas a esta escala. Por ejemplo, la producción de escorrentía y sedimentos en cuencas puede ocurrir en eventos muy espaciados en el tiempo, necesiándose periodos de estudio muy amplios para poder obtener un volumen de datos suficiente. La heterogeneidad espacial de las cuencas dificulta la determinación de los factores que controlan la producción de escorrentía y sedimentos. La propia delimitación de los límites de las cuencas de estudio puede resultar difícil en ciertas circunstancias, especialmente en áreas de escasa pendiente o en áreas sujetas a perturbaciones que alteran la red de drenaje. A estas limitaciones hay que añadir el tiempo y coste, normalmente elevados, que implica la instalación y el mantenimiento de estaciones de seguimiento hidrológico a escala de cuenca.

EL USO DE CUENCAS EN EL ESTUDIO DEL EFECTO DE LOS INCENDIOS

Dadas la común heterogeneidad de los paisajes, especialmente en el ámbito mediterráneo, y la variación espacio-temporal de los factores que controlan el impacto de los incendios, especialmente el régimen de precipitaciones, es aconsejable considerar extensiones espaciales y temporales amplias a la hora de analizar los impactos de los incendios. Sin embargo, son minoritarios los estudios que van más allá de las escalas de parcela o ladera (Woodsmith, 2004) y, por tanto, los efectos de los incendios a escala de cuenca son menos conocidos (Moody y Martin, 2001b).

Las limitaciones descritas anteriormente para el uso de cuencas de drenaje como unidades de estudio hidrológico y geomorfológico se agravan en el caso del estudio del efecto de los incendios. Los efectos de los incendios naturales rara vez pueden estudiarse usando cuencas emparejadas o pareadas (Loftis et al., 2001), ya que no es frecuente que se encuentren cuencas comparables con y sin incendio. Tampoco pueden aplicarse con propiedad los métodos de cuencas calibradas, salvo en casos fortuitos en los que se produce un incendio en una cuenca que ya estaba siendo estudiada y para la que existían datos preincendio. En ocasiones, el incendio sólo afecta una parte de la cuenca, dificultando la determinación del impacto del fuego.

Una cuestión especialmente importante en el caso de las cuencas quemadas es la rapidez con la que se necesita instalar las estaciones de medida y el reto que supone el que la producción de escorrentía y sedimentos estimada tras el incendio es muy cambiante en el tiempo, típicamente con producciones altas poco tiempo después del fuego que disminuyen drásticamente

en pocos años. Este hecho dificulta el diseño de las estaciones de medida, ya que deben ajustarse y calibrarse para un rango muy amplio de caudales y carga de sedimentos.

A pesar de las limitaciones descritas, la literatura científica sobre incendios incluye valiosos trabajos realizados a escala de cuenca que han contribuido de manera significativa al conocimiento y la medida de los efectos del fuego en ecosistemas y paisajes, así como a la determinación de los factores y condiciones que modulan dichos efectos. La mayoría de estos estudios se encuentran recogidos en las excelentes revisiones de Scott y Van Wyk (1990), sobre ecosistemas de clima mediterráneo y de Shakesby y Doerr (2006), donde se presenta un análisis exhaustivo de los incendios como agentes hidrológicos y geomorfológicos a diferentes escalas. Destacan, por ejemplo, los trabajos ya clásicos de Brown (1972) en Australia, Scott y Van Wyk (1990) y Scott (1993) en Sudáfrica, Campbell et al. (1977), Wells et al. (1979) y Helvey (1980) en Estados Unidos, entre otros, que aportaron los primeros datos sobre los impactos del fuego en el comportamiento hidrológico y en la producción de sedimentos de cuencas. Trabajos más recientes desarrollados en diversas cuencas del oeste de Estados Unidos y Australia han contribuido al conocimiento de las relaciones precipitación-caudal en áreas quemadas y al estudio del papel de la severidad del fuego, las condiciones edáficas y efecto de diversos tratamientos de rehabilitación postincendio (Moody y Martin, 2001b; Wohlgemuth et al., 2001; Shakesby et al., 2003; Moody et al., 2008). En la cuenca mediterránea, son de especial relevancia los estudios a escala de cuenca realizados en Israel (Inbar et al. 1998) y en la Península Ibérica (Ferreira et al., 1997; Mayor et al., 2007).

MÉTODOS PARA LA EVALUACIÓN Y SEGUIMIENTO DEL IMPACTO DE LOS INCENDIOS A ESCALA DE CUENCA

Los métodos aplicables a escala de cuenca para la evaluación del efecto de los incendios deben seleccionarse, fundamentalmente, de acuerdo a las variables de interés (producción de escorrentía, caudales y caudales punta, carga de sedimentos total, de fondo o en suspensión, y cambios geomorfológicos), a las dimensiones de las cuencas de estudio, a la magnitud de los caudales y carga de sedimentos esperados, al presupuesto disponible y, obviamente, a la naturaleza del estudio propuesto (fuegos naturales o fuegos experimentales, estudios de los impactos del fuego y sus factores, y estudios de los efectos de tratamientos pre o postincendio). Los apartados siguientes resumen diversas aproximaciones metodológicas aplicables a una variedad de condiciones e intereses, comenzando por métodos aplicables a cuencas de menor tamaño y terminando por métodos para la evaluación de los impactos del fuego a escala de paisaje y de grandes cuencas.

***Silt fences*: un método rápido para la cuantificación de sedimentos postincendio en microcuencas**

Uno de los requerimientos esenciales del seguimiento de la producción de sedimentos postincendio es la rapidez en la instalación de las estaciones de medida, para así evaluar el impacto de los primeros eventos de precipitación tras la perturbación, que son, potencialmente, los más productivos. Una de las técnicas con mejor relación entre la calidad de la medida y el tiempo y coste económico de instalación es el uso de mallas de retención de sedimentos (*silt fences*). Inicialmente, el uso de estas estructuras estuvo recomendado para el seguimiento de la erosión postincendio en laderas (Robichaud y Brown, 2001), delimitando mediante trincheras o barreras artificiales los



Figura 1. Esquema de la ubicación de una *silt fence* y de su área de drenaje a la izquierda. Y detalle de una *silt fence* instalado en una zona quemada del Parque Natural de Serra Calderona, Valencia, a la derecha.

límites del área de contribución. Sin embargo, a medida que se ha ido extendiendo el uso de *silt fences*, se ha puesto de manifiesto su enorme potencial para evaluar la producción de sedimentos en pequeñas microcuencas. De este modo, se tienen en cuenta los límites naturales del área de drenaje, se cuantifica conjuntamente la producción de sedimentos generados por arroyada y en regueros o pequeños canales de drenaje.

Las *silt fences* son, esencialmente, un pequeño cercado que obstruye el flujo de escorrentía superficial y retiene los sedimentos que arrastra. Cuando se usan en microcuencas, se construyen normalmente en forma de U o V abierta (Figura 1). Para su construcción se utilizan geotextiles de trenzado denso que dejan un poro muy pequeño. De este modo, el agua de escorrentía puede filtrarse por los poros, aunque lentamente, y la mayor parte del sedimento queda retenido. El manual editado por el Servicio Forestal norteamericano (USDA Forest Service) sobre la construcción de *silt fences* (Robichaud y Brown, 2001) incluye información detallada sobre estos geotextiles.

La instalación de estas estructuras es fácil y rápida y, aunque el tiempo de instalación depende del tamaño elegido y de las dificultades impuestas por las condiciones del terreno, especialmente por la pedregosidad, pueden instalarse por una o dos personas en dos o tres horas. El primer paso crítico en el proceso de instalación es la elección de su ubicación. Deben seleccionarse pequeñas vaguadas o zonas cóncavas de las laderas en las que pueda identificarse claramente la línea principal de concentración de flujo o drenaje de la microcuenca (Figura 1). A lo largo de esta línea principal de drenaje, debe localizarse el punto en el que instalar la *silt fence*. La ubicación elegida dependerá del tamaño que se quiera para la microcuenca. Si es necesario se debe alterar la superficie del suelo para conseguir un contacto continuo entre la base de la *silt fence* y el suelo, evitando depresiones o regueros que faciliten el paso del agua por debajo. En el caso de microcuencas relativamente grandes o en las que se espere una elevada exportación de sedimentos, puede reforzarse el sistema de captura de sedimentos instalando dos *silt fences*, separadas por escasos metros, a lo largo de la línea de drenaje. De este modo, los sedimentos que puedan desbordar la primera *silt fence* pueden quedar atrapados por la segunda.

El procedimiento para instalar estas estructuras puede variar ligeramente. A continuación se describen los pasos y materiales esenciales para la instalación de un modelo que ha probado ser eficaz en ambientes mediterráneos (Figura 2):

1. Determinar en el campo la forma y el tamaño y marcar los extremos y el vértice inferior.
2. Construir el armazón mediante la instalación, siguiendo una línea en U o V abierta, de una serie de barras verticales de hierro corrugado, clavadas en el suelo hasta unos 20 ó 30 cm de profundidad para asegurar su estabilidad. Pueden usarse estacas de madera en aquellos casos en los que puedan clavarse con facilidad. No obstante, en la mayoría de los suelos mediterráneos, pedregosos y compactos, es preferible el uso de barras de hierro.
3. Formar un cercado, extendiendo el geotextil a lo largo de estas barras (por la cara interna de la U o V), de forma que sobresalga y se doble por encima de las barras y también que cubra parte del suelo aguas arriba de las mismas, lo que facilitará la recogida de los sedimentos que se produzcan. Fijar el geotextil a las barras con la ayuda de alambre fino o bridas plásticas.
4. Asegurar un contacto íntimo entre el suelo aguas arriba y el geotextil situado sobre el mismo, de forma que se garantice que la escorrentía y sedimentos producidos no pasen por debajo. Para ello, pueden emplearse grapas o clavos del tamaño adecuado.

Una vez instalados, las *silt fences* deben inspeccionarse después de cada evento de precipitación, o bien con la periodicidad que requiera el experimento diseñado. Los sedimentos producidos en cada evento o periodo de interés se recogen, secan (si aún estuviesen húmedos) y pesan, y su cantidad se expresa por unidad de área de la respectiva cuenca de drenaje.

La facilidad y rapidez de instalación y el bajo coste económico permiten establecer réplicas con poco esfuerzo, lo que facilita el estudio de tratamientos postincendio, así como las comparaciones entre zonas quemadas y sin quemar, o entre distintas zonas quemadas, que pueden variar en severidad o cualquier otra característica de interés. Igualmente, se facilita el seguimiento de los efectos de los incendios desde los primeros días o semanas tras el fuego. Estas estructuras, diseñadas exclusivamente para la cuantificación de sedimentos (no de escorrentías), pueden después combinarse con otros sistemas de seguimiento.

Estaciones de aforo para el seguimiento hidrológico

La selección y diseño de estaciones de aforo para el seguimiento hidrológico de cuencas quemadas depende, como en otros muchos casos, de la disponibilidad económica y las variables hidro-



Figura 2. Ilustración del procedimiento de instalación de mallas de retención de sedimentos (*silt fences*). De izquierda a derecha: Preparación de la estructura de sostén con barras de hierro corrugado clavadas en el suelo. Fijación del geotextil a las barras con bridas plásticas. Fijación del geotextil al suelo mediante grapas de acero. *Silt fence* completo.

lógicas de interés para el estudio. Desde el punto de vista de la frecuencia de muestreo, hay dos grandes tipos de sistemas de aforo de cuencas, los de registro automático, que permiten la medición en continuo de las variables de interés, y los de registro no automático, que tan sólo permiten medir variables totalizadoras como la escorrentía total producida tras un evento de lluvia o tras el periodo de estudio. A igualdad de condiciones, un sistema de aforo automático es más caro que uno no automático ya que requiere de almacenadores de datos (*dataloggers*), instrumentos de medición en continuo y fuentes de alimentación. No obstante, si el presupuesto lo permite, un sistema automático es, por lo general, preferible ya que proporciona el hidrograma del evento además de las variables totalizadoras. El hidrograma describe la dinámica temporal del evento de escorrentía, por lo que permite comparar la evolución temporal de la precipitación con la de la escorrentía y obtener el caudal máximo de descarga o caudal pico. Además, las estaciones de registro automático pueden conectarse a un sistema para la descarga de datos y su visualización en tiempo real desde la oficina, lo que mejora el control de la instalación y ahorra salidas al campo innecesarias. El principal inconveniente de este tipo de estaciones de aforo, además de su mayor coste, consiste en que el fallo de uno de los componentes electrónicos puede suponer la pérdida de los datos. Para minimizar esta posibilidad, es altamente recomendable duplicar los sensores de medición y conectarlos a sistemas de almacenaje y alimentación independientes.

Una estación de aforo de cuenca con sistema de registro automático cuenta, como mínimo, con una sección de control (también llamada aforador de caudal), un medidor de la altura de la lámina de agua, un almacenador de los datos generados por éste, y una fuente de alimentación energética. En el diseño de este tipo de estaciones, la elección de la sección de control o aforador es la parte principal y la que hay que decidir en primer lugar. Los aforadores modifican la sección natural del cauce, de modo que en ese punto el caudal sólo depende de la altura de la lámina de agua. Así, para una sección de control dada, existe una ecuación característica o de descarga que relaciona el caudal y la altura de la lámina de agua. Estas estructuras no suelen estar disponibles en el mercado, o lo están sólo para ciertos modelos, por lo que han de construirse artesanalmente.

Las secciones de control más utilizadas en los aforos de cuencas quemadas, normalmente de pequeño tamaño, son del tipo V-notch (Figura 3) y H-flume (Figura 4) Estos tipos de aforadores se consideran particularmente precisos debido a que su sección triangular les confiere una precisión comparable tanto para descargas pequeñas, que pasan por la porción inferior de la sección, como grandes, que se elevan sobre gran parte de la apertura en V. Para poder aplicar la ecuación característica de un determinado tipo de aforador se han de cumplir una serie de condiciones, que también determinan el diseño de la estación de aforo. Por ejemplo, para poder desestimar la velocidad de aproximación del flujo, que es una de las suposiciones del aforador tipo V-notch, la altura de descarga ha de medirse a una distancia determinada aguas arriba del aforador. Así mismo, el canal de aproximación ha de ser razonablemente recto y de pendiente suave. Un aforador tipo H-flume ha de incluir un canal de aproximación de superficie no rugosa y con una longitud cinco veces superior a la altura de la sección de control. Existen diversos manuales, como los publicados por Bos (1978) y por USDI_BR (http://www.usbr.gov/pmts/hydraulics_lab/pubs/wmm/), en los que se pueden consultar los detalles sobre el diseño y las limitaciones de estos y otros tipos de aforos.

Como se observa en la figura 3, los aforadores V-notch suponen una trampa de sedimentos, que quedan almacenados aguas arriba del aforo, lo que permite medir la producción total de descarga sólida tras el evento. Sin embargo, esta propiedad puede suponer una limitación en el caso



Figura 3. Aforos de tipo V-notch instalados en cuencas experimentales en Colorado (EEUU) y Alicante (España). Se muestran los elementos estructurales más relevantes y diversos instrumentos de medida.

de que la carga de sedimentos sea elevada, ya que la distancia entre el vértice de la “V” del V-notch y la superficie del cauce aguas arriba de la sección de control, que debe ser superior a un umbral determinado, puede reducirse durante el evento por la acumulación de sedimentos, disminuyendo por tanto la precisión de la medida de la descarga. En este caso, es recomendable la construcción de balsas de decantación aguas arriba del aforo con el objetivo de que la mayor parte de la carga sólida quede atrapada antes de la sección de control u optar por un aforador tipo H-flume con depósitos o balsas decantadoras a su salida. Los H-flume también son adecuados para la medida de sedimentos en suspensión, dado que la mayor longitud de su sección de control en la dirección del flujo (Figura 4) facilita la toma de muestras de escorrentía para la posterior medida de los sedimentos. Esta toma de muestras suele hacerse de forma automática, a distintas alturas desde la superficie del aforador y a distintos intervalos de tiempo.

Con respecto a los medidores de la altura de la lámina de agua, las sondas de nivel son muy comunes, tanto las de presión como las capacitivas. También se pueden utilizar sensores ultrasónicos para medir la distancia entre éstos y la lámina de agua. Los sensores descritos han de ir conectados a un almacenador de datos al que envían una señal eléctrica que queda registrada. Además, hay almacenadores de datos que puede procesar los datos y almacenar tan sólo aquellos que interesen: valores medios o instante en que ocurre un evento.

Hay una enorme variedad de tipos de estaciones de aforo, desde las automatizadas hasta las de muestreo manual, pasando por cualquier combinación de sistema mixto. En la figura 3 se muestran dos estaciones de aforo en cuencas quemadas que ilustran parte de esta variedad. La estación más automatizada (Figura 3) consta de un aforador tipo V-notch y permite medir la producción de escorrentía y lluvia en continuo, así como la carga sólida total de sedimentos del evento. De cara a minimizar la pérdida de los datos por un fallo en el sistema de alimentación, la estación está dotada de dos sensores independientes (sonda de nivel y sensor ultrasónico) para medir la altura de la lámina de agua. La carga sólida queda acumulada en el canal de aproximación aguas-arriba de la sección de control de donde se recoge y mide después de cada evento productivo. En la estación de tipo mixto (Figura 3), el hidrograma se obtiene a partir del desborde



Figura 4. Aforo de tipo H-Flume en una cuenca experimental en Alicante (España).

de las balsas que recogen la escorrentía. De este modo, sólo se dispone de información sobre la dinámica del evento para eventos grandes que superan la capacidad de las balsas. Sin embargo, la estación permite medir la producción total de escorrentía y sedimentos (carga sólida y sedimentos en suspensión) para todos los eventos en los que las balsas no llegan a desbordar. Este sistema mixto supone un buen compromiso entre el coste económico y la cantidad y calidad de los datos obtenidos.

Estudios geomorfológicos a escala de cuenca sin el uso estaciones de aforo

En ocasiones, las dimensiones del área de estudio pueden ser excesivas para la instalación de estaciones de aforo o de trampas de sedimentos. Otras veces son las limitaciones logísticas o económicas las que eliminan esta posibilidad. En estos casos, se suele recurrir a estimaciones indirectas, a menudo parciales, de la producción o exportación de sedimentos de las cuencas a partir de una variedad de métodos, algunos de los cuales se discuten a continuación.

El volumen de suelo erosionado, transportado y depositado en las cuencas de drenaje puede estimarse a partir de volumetrías de regueros, cauces, cicatrices de deslizamientos y nuevos barrancos generados o agrandados tras los incendios, así como de las áreas de sedimentación (ver capítulo 2.5; Cerdà y Jordán, 2010). Algunos autores han puesto de manifiesto que la mayor parte de los sedimentos postincendio producidos a escala de cuenca proviene de la erosión de cauces y regueros (Moody y Martin 2001a). Por otro lado, en muchos casos, las coladas de barro y otros procesos de erosión concentrada son el centro de interés del estudio, ya sea por el riesgo de daño a infraestructuras o por el impacto potencial de la exportación masiva de sedimentos en lagos y embalses a los que drena la cuenca de estudio. Para la estimación de estos volúmenes erosionados o depositados se aplican métodos diversos de análisis geomorfológico, desde técnicas fotogramétricas aplicadas a fotografías aéreas hasta detallados perfiles de regueros y cauces. En general, suelen combinarse medidas del número, longitud y ancho de los regueros o cauces (o áreas de depósito) con la caracterización de la variación en el tiempo del perfil de un número suficiente de secciones transversales de los mismos. Por ejemplo, Meyer et al. (2001) estimaron de este modo la masa total de suelo erosionado tras un evento extraordinario de precipitación en dos cuencas de 0,5 km² que habían sido afectadas por un incendio severo siete años antes. Mediante el uso de estaciones totales o bien con varillas graduadas, estos autores definieron los perfiles de las secciones transversales de las cicatrices y barrancos formados tras las coladas de barro generadas por el evento. A partir de ellos, estimaron el área transversal promedio de los diferentes cauces y cicatrices y la multiplicaron por la longitud de los mismos para estimar el volumen total erosionado. Por otro lado, midieron el área de los diferentes depósitos generados y estimaron el grosor de los mismos usando varillas y catas, y a partir de zonas cortadas por los cauces.

La mayor incertidumbre en este tipo de medidas se deriva de la imprecisión a la hora de reconstruir definir los perfiles de la superficie anterior al incendio. Aún así, se estima que, en general, el error puede aproximarse a un 15% (Meyer et al., 2001). Una variación de estas metodologías, especialmente aplicable en el caso de cuencas de gran tamaño, es la estimación de los sedimentos exportados tras el incendio a partir de batimetrías de lagos o embalses (Moody y Martin 2001a).



Figura 5. Dique de regulación hídrica en la rambla Salto del Agua, en Millares, Valencia. La cuenca se quemó por completo en 1994. Se observa la zona de sedimentación aguas arriba del dique.

En el caso de cuencas con corrientes permanentes de agua, puede evaluarse el impacto de los incendios en la carga de sedimentos y en las características químicas del agua mediante la toma periódica de muestras de agua y sedimentos en la corriente (Rhoades et al., 2006). Existe una variedad de instrumentos comerciales para la toma de este tipo de muestras. En general, son instrumentos muy sencillos que pueden también construirse artesanalmente. En el caso de los sedimentos en suspensión, se utilizan colectores con forma de botella o de proyectil. Los colectores se sitúan con la parte estrecha corriente arriba y, de esta forma, se ofrece poca resistencia a la corriente y el agua entra en el colector sin que se perturbe significativamente su velocidad. El cambio brusco en la velocidad del agua cuando ésta llega a la zona ancha del colector hace que se depositen los sedimentos en suspensión. Para el muestreo de la carga de fondo en cursos de agua se utilizan colectores formados por una cesta de malla metálica fijada a un soporte y un estabilizador que mantiene la boca de la cesta orientada hacia la parte alta de la corriente. Es importante tener en cuenta el relieve del fondo para optimizar la ubicación de estos colectores.

Una alternativa interesante y económica para el análisis a escala de cuenca del impacto erosivo de los incendios, y sus factores de control, es la cuantificación de los sedimentos retenidos por los diques de regulación hídrica instalados en numerosos cauces de ramblas y barrancos en áreas de montaña de la región mediterránea (Figura 5). Estos diques, instalados en el marco de proyectos de restauración hidrológico-forestal, retienen un gran parte de los sedimentos arrastrados (especialmente la carga de fondo) por los grandes eventos de escorrentía que se generan en las cuencas aguas arriba de los mismos. Los sedimentos retenidos van acumulándose en capas superpuestas hasta que, con el paso del tiempo, se colmata el área de sedimentación disponible. En el caso de que se hayan producido incendios en las respectivas cuencas de drenaje, la presencia de carbones y cenizas permite distinguir los sedimentos anteriores y posteriores al incendio acumulados en estos diques (Bautista et al., 2008). El volumen de sedimentos acumulados en los diques se estima a partir de medidas de profundidad de sedimentos a lo largo de transectos transversales, interpolando posteriormente los valores. A partir del muestreo de un número adecuado de sondas, se estima el espesor de los sedimentos depositados antes y después del incendio, así como su densidad aparente y, con estos datos, se estima la producción acumulada de sedimentos pre y postincendio.

CONCLUSIONES. RETOS Y OPORTUNIDADES EN EL FUTURO

El uso de cuencas de drenaje para el estudio de los efectos de los incendios permite conocer el balance neto de dichos efectos en unidades naturales del paisaje. A pesar de que presenta numerosos aspectos positivos, el estudio del efecto de los incendios a escala de cuenca ha estado relativamente limitado en el pasado. Sin embargo, ciertos avances tecnológicos recientes están ayudando a potenciar este tipo de enfoque. Por un lado, el extraordinario progreso y creciente accesibilidad de las tecnologías basadas en sensores remotos facilita enormemente la elaboración de cartografías de interés para el estudio de los incendios a escala de cuenca y paisaje. Por otra parte, las posibilidades técnicas para el control y seguimiento de fuegos experimentales han mejorado sensiblemente, lo que abre las puertas a la realización de experimentos con fuegos controlados a escala de cuenca. El interés creciente por los estudios integrados, en los que se analizan los impactos de las perturbaciones a diversas escalas y sobre un amplio rango de atributos ecológicos, geomorfológicos y socio-ambientales, es el marco ideal para potenciar los estudios a escala de cuenca. Entre los retos pendientes para este tipo de estudios se incluye la determinación de relaciones de escala entre procesos de ladera y de cuenca; la identificación de las fuentes principales de sedimentos y el papel de la distribución espacial de las mismas en la exportación global; y el estudio integrado del impacto de los incendios en los balances de agua y carbono, así como del efecto de la variación climática en dichos impactos.

AGRADECIMIENTOS

Las autoras agradecen la colaboración de todos los colegas que han contribuido a la difusión de las mejores metodologías para el estudio hidrológico y geomorfológico a escala de cuenca de los impactos de los incendios, y muy especialmente la colaboración de Joan Llovet, Lee MacDonald, John Moody, Deborah Martin, Dan Neary y Pete Robichaud. Parte de los trabajos propios discutidos en este capítulo están financiados por el proyecto PATTERN (AGCL2008/-05532-C02-01/FOR). La Fundación CEAM está cofinanciada por la Generalitat Valenciana y la Fundación Bancaja.

REFERENCIAS

- Bautista, S., Giovanardi, F.S. y Vallejo, V.R. 2008. Environmental factors controlling post-fire sediment yield at the catchment scale in a Mediterranean fire-prone area. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 10, EGU2008-A-11506, 2008. EGU General Assembly, April 2008, Vienna.
- Bos, M.G. 1989. Discharge measurement structures. 3rd ed., Publication No. 20, International Institute for Land Reclamation and Improvement/ILRI. Wageningen.
- Brown, J.A.H. 1972. Hydrologic effects of a bushfire in a catchment in south-eastern New South Wales. *Journal of Hydrology*, 15, 77-96.
- Campbell, R.E., Baker, M.B., Folliott, P.F., Larson, F.R. y Avery, C.C. 1977. Wildfire effects on a ponderosa pine ecosystem: an Arizona case study. Research Paper RM-191. United States Department of Agriculture Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experimental Station. Fort Collins, CO.
- Cerdà, A. y Jordán, A. 2010. Métodos para la cuantificación de la pérdida de suelo y aguas tras incendios forestales, con especial referencia a las parcelas experimentales. En: A. Cerdà y A. Jordán (Eds.), *Actualización en métodos y técnicas para el estudio de los suelos afectados por incendios forestales*. Càte-

- dra Divulgació de la Ciència - FUEGORED. Universitat de València. Valencia. Pp.: 185-241.
- Dietrich, W.E. y Dunne T. 1978. Sediment budget for a small catchment in mountainous terrain. *Zeitschrift für Geomorphologie Supplement*, 29, 191-206.
- Ferreira, A.J.D., Coelho, C.O.A., Shakesby, R.A. y Walsh, R.P.D. 1997. Sediment and solute yield in forest ecosystems affected by fire and rip-ploughing techniques, central Portugal: A plot and catchment analysis approach. *Physics and Chemistry of the Earth*, 22, 309-314.
- Helvey, J.D. 1980. Effects of a north central Washington wildfire on runoff and sediment production. *Water Resources Bulletin*, 16, 627-634.
- Inbar, M., Tamir, M. y Wittenberg, L. 1998. Runoff and erosion processes after a forest fire in Mount Carmel, a Mediterranean area. *Geomorphology*, 24, 17-33.
- Loftis, J.C., MacDonald, L.H., Streett, S., Iyer, H.K. y Bunted, K. 2001. Detecting cumulative watershed effects: The statistical power of pairing. *Journal of Hydrology*, 251, 49-64.
- Mayor, A.G., Bautista, S., Llovet, J. y Bellot, J. 2007. Post-fire hydrological and erosional responses of a Mediterranean landscape: Seven years of catchment-scale dynamics. *Catena*, 71, 68-75.
- Meyer, G.A., Pierce, J.L., Wood, S.H. y Jull, A.J.T. 2001. Fire, storms, and erosional events in the Idaho batholiths. *Hydrological Processes*, 15, 3025-3038.
- Moody, J.A. y Martin, D.A. 2001a. Initial hydrologic and geomorphic response following a wildfire in the Colorado Front Range. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26, 1049-1070.
- Moody, J.A. y Martin, D.A. 2001b. Post-fire, rainfall intensity-peak discharge relations for three mountainous watersheds in the western USA. *Hydrological Processes*, 15, 2981-2993.
- Moody, J.A., Martin, D.A., Haire, S.L. y Kinner, D.A. 2008. Linking runoff response to burn severity after a wildfire. *Hydrological Processes*, 22, 2063-2074.
- Rhoades, C., Entwistle, D. y Butler, D. 2006. Initial streamwater response to the Hayman Fire, Colorado Front Range. *Proceedings 2nd Interagency Conference on Research in the Watersheds*. May 15-18 2006; Coweeta Hydrologic Lab. Otto, NC. Pp.: 89-98.
- Robichaud, P.R. y Brown, R.E. 2002. Silt Fences: An economical technique for measuring hillslope soil erosion. *General Technical Report RMRS-GTR-94*. USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station. Fort Collins, CO.
- Scott, D.F. 1993. The hydrological effects of fire in South African mountain catchments. *Journal of Hydrology*, 150, 409-432.
- Scott, D.F. y Van Wyk, D.B. 1990. The effects of wildfire on soil wettability and hydrological behaviour of an afforested catchment. *Journal of Hydrology*, 121, 239-256.
- Shakesby, R.A. y Doerr, S.H. 2006. Wildfire as a hydrological and geomorphological agent. *Earth-Science Reviews*, 74, 269-307.
- Shakesby, R.A., Chafer, C.J., Doerr, S.H., Blake, W.H., Wallbrink, P.J., Humphreys, G.S. y Harrington, B. 2003. Fire severity, water repellency characteristics and hydrogeomorphological changes following the Christmas 2001 Sydney forest fires. *Australian Geographer*, 34, 147-175.
- USDA, 1954. Fire-flood sequence on the San Dimas Experimental Forest. *USDA California Forest and Range Experiment Station, Forest Service, Technical Paper No. 6*. Berkeley, CA.
- Wells, C.G., Campbell, R.E., DeBano, L.F., Lewis, L.C., Fredriksen, R.L., Franklin, E.C., Froehlich, R.C. y Dunn P.H. 1979. Effects of fire on soil - A state of knowledge review. *US Department of Agriculture, Forest Service, General Technical Report WO-7*. US Government Printing Office, Washington, DC.
- Wohlgemuth, P.M., Hubbert, K.R. y Robichaud P.R. 2001. The effects of log erosion barriers on post-fire hydrologic response and sediment yield in small forested watersheds, southern California. *Hydrological Processes* 15, 3053-3066.
- Woodsmith, R.D., 2004. Entiat Experimental Forest: catchment-scale runoff data before and after a 1970 wildfire. *Water Resources Research*, 40, W11701.

