

# EL CONTROVERTIDO EFECTO DE LOS INCENDIOS

## EL FUEGO EN EL CICLO DEL CARBONO EN LOS ECOSISTEMAS MEDITERRÁNEOS

Francisco Javier González-Vila y Gonzalo Almendros

La materia orgánica es clave en la fertilidad, la hidrología y los procesos erosivos de los suelos. Y se ve afectada por los incendios forestales, ya que el fuego provoca cambios en sus propiedades. Las investigaciones demuestran que al pasar el fuego se crean sustancias nuevas y que el fuego tiene el papel de acelerador de la mineralización, pero también favorece la producción de formas de materia orgánica recalcitrantes.

A escala planetaria, se ha estimado que entre 530 y 555 millones de hectáreas de suelo forestal se ven afectadas anualmente por el fuego, lo que equivale a la quema de aproximadamente 50.000 millones de toneladas de biomasa al año. Los incendios forestales constituyen un fenómeno global que afecta de forma sistemática a los bosques tropicales y subtropicales, a los templados, a los boreales, a las sabanas tropicales y también a las tierras cultivadas.

El efecto del fuego sobre el suelo, además de dar lugar a una destrucción o degradación selectiva de los constituyentes orgánicos, determina también un incremento sustancial de la diversidad molecular de la materia orgánica de los suelos, con lo que aparecen nuevas estructuras no sintetizadas por la vegetación ni por los microorganismos y se producen reacciones de condensación exotérmica con efectos de aromatización de formas alifáticas de carbono y de ciclación de compuestos originalmente biodegradables de nitrógeno.

En definitiva, el fuego crea nuevas formas de materia orgánica.

Otros efectos colaterales del fuego, como son el incremento en la hidrofobicidad de la materia orgánica y la formación de enlaces irreversibles con la matriz del suelo –arcillas y óxidos de hierro y aluminio– conducen al aumento de la condensación y complejidad estructural

de la materia orgánica, lo que, unido a su polidispersidad o a la distribución tridimensional y caótica de sus componentes, la hacen difícilmente reconocible por las enzimas específicas del suelo. De hecho algunos autores han llegado a comparar la maduración biológica o enzimática de la materia orgánica del suelo, que requiere cientos o miles de años, con el efecto de los incendios, que producen en ocasiones efectos prácticamente instan-

táneos, difícilmente distinguibles de los procesos bióticos propios del suelo. El fuego, por lo tanto, acelera los procesos de cambio y evolución de la materia orgánica.

Por todo ello, la investigación científica estudia la calidad antes que la cantidad de carbono secuestrado en el suelo. En particular, el estudio de la calidad del suelo daría la medida más fiable de la resiliencia o capacidad de los suelos de experimentar pocos cambios frente a impactos ambientales como el cambio climático.

**«ENTRE 530 Y 555 MILLONES DE HECTÁREAS DE SUELO FORESTAL SE VEN AFECTADAS ANUALMENTE POR EL FUEGO, LO QUE PROVOCA LA QUEMA DE APROXIMADAMENTE 50.000 MILLONES DE TONELADAS DE BIOMASA AL AÑO»**

### ■ EL FUEGO, ¿BUENO O MALO?

La historia del fuego y su manejo es la de una ecología humana adaptada al fuego, que ha conocido cambios en los paradigmas dominantes en relación con las causas y efectos (catastróficos vs. favorables) de los incendios foresta-

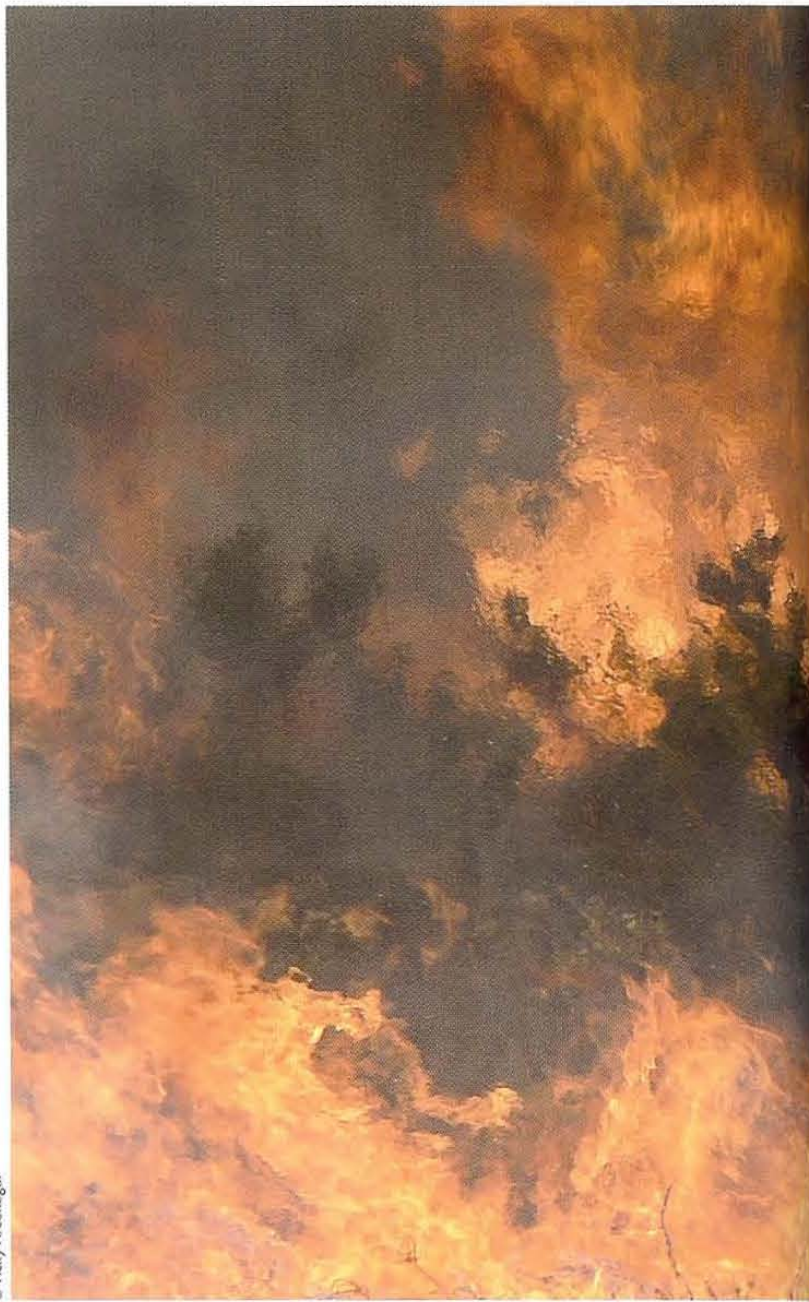


les. Los frecuentes incendios que sufrimos hoy son una consecuencia de la intervención humana en la ecología forestal, especialmente por la reducción de herbívoros, en épocas relativamente recientes, desde hace aproximadamente entre 100.000 y 250.000 años. De igual forma, y en relación con la naturaleza de los efectos del fuego, se acepta generalmente que sus repercusiones sobre el medio natural son desastrosas, y esa es la percepción que se deriva de las variaciones en parámetros químicos y físicos de los correspondientes suelos afectados, donde el alcance de los cambios supera, por lo general en varios órdenes de magnitud, al producido por otras perturbaciones inducidas por la acción humana. En particular, experimentos basados en contrastar los efectos de incendios naturales con los de fuegos controlados contribuyen a resolver la controversia sobre los variables efectos del fuego –algunos de ellos positivos– sobre el ciclo biogeoquímico de los suelos y la calidad de las distintas formas de carbono orgánico, y así intentar inducir selectivamente los efectos beneficiosos sobre el suelo y reducir los adversos.

#### ■ LA INVESTIGACIÓN DE LOS INCENDIOS FORESTALES

El estudio de los efectos de los incendios forestales sobre los ecosistemas, en particular sobre el funcionamiento de los suelos, constituye una línea de investigación a la que se presta especial atención en todo el mundo, dada la relevante incidencia medioambiental del fenómeno, recurrente en determinadas formaciones fitosociológicas. Entre las líneas fundamentales que han centrado el interés de las investigaciones sobre los efectos de los incendios forestales en los sistemas edáficos, cabe citar las siguientes: el fuego y la sucesión ecológica; la erosión y degradación del suelo y la influencia en los procesos hidrológicos superficiales y subsuperficiales; el fuego y la hidrofobicidad; los factores de fertilidad física del suelo; la acumulación de formas estables de carbono a largo plazo (*black carbon* y humus pirogénico); los descriptores moleculares del efecto del fuego en la materia orgánica; la actividad enzimática y de la microfauna del suelo; la intencionalidad del fuego asociada a los intereses económicos de uso del suelo; el fuego y la liberación a la atmósfera de productos volátiles cancerígenos o mutágenos; y la previsión y provisión de servicios de extinción y control.

Todos estos temas generales han dado lugar a la proliferación de una extensa bibliografía y a la frecuente celebración de conferencias internacionales. Entre estas tienen gran repercusión las series de congresos Forest Fires Research y Fire Ecology and Management, así como los talleres específicos sobre efectos de incendios forestales celebrados en las últimas convenciones de la European



© Vicky Arcenegui

Geosciences Union (EGU, Viena, 2002–2011) y en los numerosos congresos sobre riesgos ambientales. Asimismo, crece cada día el número e interés de revistas especializadas (*Journal of Forest Fire Research*, *International Journal of Wildland Fire*, *Fire Safety*, *Fire and Materials* o *Fire Management Notes*), así como la frecuente presencia de artículos sobre este tema en revistas multidisciplinarias de ecología y ciencias del suelo, forestales o medioambientales. Un compendio de estas numerosas referencias se recoge en la publicación mensual *Current Titles in Wildland Fire* del Fire Research Institute de Arizona.<sup>1</sup> Por otro lado, en muchos países existen sociedades científicas que reúnen a especialistas nacionales en los variados aspectos del estudio de los efectos de los incendios, como la red española Fuegored<sup>2</sup> creada en 2007 bajo el auspicio del Ministerio de Ciencia e Innovación.

<sup>1</sup> <http://www.fireresearchinstitute.org>

<sup>2</sup> <http://www.fuegored.com>





Los incendios afectan a todo tipo de bosque y generan anualmente 50.000 millones de toneladas de biomasa. El fuego destruye o degrada materia orgánica, pero también crea nueva. Por eso, es importante estudiar la calidad y no solo la cantidad de carbono secuestrado en el suelo después de un incendio.

#### ■ EL FUEGO Y EL CICLO DEL CARBONO EN SUELOS DE ECOSISTEMAS MEDITERRÁNEOS

La incidencia de los incendios es particularmente acusada en los países con clima mediterráneo, donde se reconocen como uno de los principales motores del cambio en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas. Ello se debe a las características propias del clima mediterráneo semiárido, como es una estación cálida y seca, con déficit hídrico en el suelo. Esto determina la paralización de los procesos bioquímicos o enzimáticos del suelo, de tal forma que los mecanismos de biodegradación y humificación apenas tienen lugar durante dos o tres meses del año, lo que retarda considerablemente el flujo del carbono y sobre todo la liberación de

nutrientes necesarios para la recarga de la solución del suelo. En estas condiciones el fuego constituye un agente recurrente en la aceleración del ciclo biogeoquímico del carbono, destruyendo una vegetación de lento crecimiento que se recupera en pocos años a expensas de la liberación de nutrientes en las cenizas, pero conservando o incluso incrementando el contenido en carbono acumulado en el suelo.

Por otro lado, las especies vegetales típicamente mediterráneas son de alta inflamabilidad dado su bajo contenido en agua y la concentración relativamente elevada de aceites esenciales combustibles. Además, estos ecosistemas frecuentemente incorporan especies pirofíticas, con adaptaciones anatómicas o fisiológicas que les permiten rebrotar tras el efecto del fuego.

Mientras que los ecosistemas de elevada actividad biológica, como la selva tropical, presentan un balance nulo o negativo en la acumulación de carbono del suelo, debido a la continua actividad biológica –y a que el carbono de la atmósfera se secuestra fundamentalmente en la biomasa y no en el suelo– en los ecosistemas semiáridos la acumulación de *black carbon*, unida a la formación de sustancias húmicas recalcitrantes o difícilmente reconocibles por las enzimas, constituye un proceso abiótico decisivo para la progresiva estabilización y acumulación del carbono en el suelo.

Por último, en los ecosistemas mediterráneos encontramos factores socioeconómicos que contribuyen a la proliferación de los incendios en algunos escenarios, como son el mantenimiento de prácticas ancestrales (quema de rastrojos y otros residuos agrícolas) o el éxodo de la población rural, que ha provocado el abandono de terrenos de cultivo y de las prácticas tradicionales de explotación sostenible del monte. Entre estos factores, tampoco hay que olvidar el gran porcentaje de incendios que son provocados deliberadamente.

#### ■ EL FUTURO DE LA INVESTIGACIÓN SOBRE EL IMPACTO DE LOS INCENDIOS FORESTALES

El seguimiento de los efectos de los incendios sobre las propiedades de los suelos es clave para diseñar las estrategias de rehabilitación y restauración de zonas afectadas. Se considera en este sentido de gran importancia profundizar en un aspecto particular del estudio del impacto del fuego en el suelo, como es la alteración que experimenta la materia orgánica, centrándose particularmente en el análisis a nivel molecular de las alteraciones que afectan a las distintas formas de carbono del suelo, en particular las denominadas sustancias húmicas.

Hasta ahora, los estudios de la materia orgánica del suelo han contribuido a una visión neutra de los incen-





© Artemi Cerdà / Universitat de València

El paso del fuego por las plantaciones arboladas deja paisajes desoladores, como en esta imagen de los incendios de Teruel de 2009.



© Artemi Cerdà / Universitat de València

A los veinte días de un incendio vuelve la vida, gracias al suelo que acumula nutrientes, agua y raíces, tubérculos o semillas.

dios como un factor que, por sí mismo, no constituye un factor progresivo o regresivo en la evolución de los ecosistemas a nivel global. Como quiera que el fuego es un señalado factor abiótico en la diversidad molecular de la materia orgánica del suelo, el estudio de las alteraciones que provoca constituye una línea de interés para una correcta interpretación de los procesos ambientales que permiten inferir la calidad de los ecosistemas y la salud del suelo, y que quedan registrados en la composición molecular de la materia orgánica, principalmente en lípidos y sustancias húmicas.

Los estudios sobre las alteraciones de la materia orgánica por el fuego tienen, además, un indudable interés práctico, toda vez que la composición del humus puede ser utilizada como indicador del grado de recuperación en el tiempo de suelos afectados por incendios forestales. Los numerosos estudios centrados en la difícil identificación de descriptores moleculares o *proxies* de la incidencia o intensidad de los suelos en el pasado difícilmente aportan descriptores cualitativos o cuantitativos de especial valor diagnóstico o con capacidad de generalizarse en diferentes ecosistemas. Entre esos *proxies* se ha señalado la formación de ácidos bencenocarboxílicos, la generación de furfuralos, la ciclación de las formas amídicas de N, o la destrucción o insolubilización de perilenquinonas. Recientemente ha podido comprobarse que los cambios en los índices de preferencia de carbono (relación entre moléculas alquílicas con número par o impar de átomos de carbono) y longitud media de la cadenas de los lípidos lineales del suelo (fundamentalmente hidrocarburos lineales y ácidos grasos) pueden servir como medida válida del grado de recuperación en el tiempo de suelos afectados por incendios.

Por lo tanto, el fuego provoca que la materia orgánica originalmente biodegradable se estabilice en el suelo durante períodos prolongados y que se formen nuevas sustancias de tipo húmico que no existen en los orga-

nismos vivos. Los incendios provocan alteraciones en la microestructura del suelo, disparando procesos de hidrofobicidad o repelencia, pero también aumentando la estabilidad de los enlaces entre la materia orgánica y mineral. El fuego intenso determina, además, la pérdida de muchos grupos funcionales de la materia orgánica (fundamentalmente carboxilos), la neoformación de estructuras cíclicas o condensadas, y la polimerización de precursores solubles que suponen alteraciones estructurales de las biomacromoléculas (celulosa, lignina...) que las hacen menos biodegradables al no ser fácilmente reconocibles por las enzimas. De hecho, algunas de las formas más estables de materia orgánica del suelo se generan rápidamente por efecto del fuego, como es el caso de las pseudomelanoidinas, o macromoléculas



© Artemi Cerdà / Universitat de València

La presencia del ganado permite la discontinuidad en la cubierta vegetal y con eso el control de fuego.





Los grandes incendios forestales están unidos al abandono del territorio. En la imagen, el barranco de la Fos o de los Naranjos entre Bocairente y Onteniente. Los bancales y el molino abandonado son notarios mudos del tiempo y de los cambios en los usos del suelo.

provenientes de la deshidratación térmica de carbohidratos (material chamuscado), la formación de productos de Maillard, a partir de productos nitrogenados y carbohidratos, la condensación de compuestos lipídicos que se resinifican o se incorporan a las otras formas de estructura de materia orgánica y, principalmente, la acumulación de productos de carbonización de la biomasa lignocelulósica genéricamente conocidos como *black carbon*, que, aunque puede biodegradarse en períodos de tiempo razonables en condiciones tropicales y cuando se encuentra finamente dividida, puede llegar a constituir una importante proporción del carbono de suelo, muy difícilmente cuantificable por las técnicas analíticas convencionales.

Es necesario profundizar en las bases moleculares de la estructura de la materia orgánica del suelo (aproximaciones espectroscópicas no destructivas, quimiotaxónicas y metabolómicas), y sobre el efecto selectivo del fuego sobre las rutas biogénicas y diagenéticas que contribuyen a los procesos naturales de estabilización de las formas de carbono en el suelo. ☺

**«EL FUEGO CONSTITUYE UN AGENTE RECURRENTE EN LA ACELERACIÓN DEL CICLO BIOGEOQUÍMICO DEL CARBONO; DESTRUYE UNA VEGETACIÓN DE LENTO CRECIMIENTO, PERO CONSERVA O INCLUSO INCREMENTA EL CONTENIDO EN CARBONO ACUMULADO EN EL SUELO»**

**BIBLIOGRAFÍA**

- ALMENDROS, G. *et al.*, 1990. «Fire-induced Transformation of Soil organic Matter from an Oak Forest: an Experimental Approach to the Effects of Fire on Humic Substances». *Soil Sci.*, 149:158-168.
- GONZÁLEZ-PÉREZ, J. A. *et al.*, 2004. «The Effect of Fire on Soil Organic Matter—a Review». *Environ. Int.* 30: 855-870.
- GONZÁLEZ-VILA, F. J. y G. ALMENDROS, 2003. «Thermal Transformation of Soil Organic Matter by Natural Fires and Laboratory-controlled Heatings». In: Ikan, R. (ed.). *Natural and Laboratory Simulated Thermal Geochemical Processes*. Kluwer Academic Publishing. Dordrecht.

**Francisco Javier González-Vila.** Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología, CSIC. Sevilla.

**Gonzalo Almendros.** Museo Nacional de Ciencias Naturales, CSIC. Madrid.