



EL CONTROVERTIT EFECTE DELS INCENDIS

EL FOC EN EL CICLE DEL CARBONI EN ELS ECOSISTEMES MEDITERRANIS

Francisco Javier González-Vila i Gonzalo Almendros

La matèria orgànica és clau en la fertilitat, la hidrologia i els processos erosius dels sòls. I es veu afectada pels incendis forestals, ja que el foc provoca canvis en les seues propietats. Les investigacions demostren que en passar el foc es creen substàncies noves i que el foc té el paper d'accelerador de la mineralització, però també afavoreix la producció de formes de matèria orgànica recalitrants.

A escala planetària, s'ha estimat que entre 530 i 555 milions d'hectàrees de sòl forestal es veuen afectades anualment pel foc, la qual cosa equival a la crema d'aproximadament 50.000 milions de tones de biomassa l'any. Els incendis forestals constitueixen un fenomen global que afecta de manera sistemàtica els boscos tropicals i subtropicals, els temperats, els boreals, les sabanes tropicals i també les terres cultivades.

L'efecte del foc sobre el sòl, a més de donar lloc a una destrucció o degradació selectiva dels seus constituents orgànics, determina també un increment substancial de la diversitat molecular de la matèria orgànica dels sòls, amb la qual cosa apareixen noves estructures no sintetitzades per la vegetació ni pels microorganismes i es produeixen reaccions de condensació exotèrmica amb efectes d'aromatització de formes alifàtiques de carboni i de ciclització de compostos originàriament biodegradables de nitrogen. En definitiva, el foc crea noves formes de matèria orgànica.

Altres efectes col·laterals del foc, com ara l'increment en la hidrofobicitat de la matèria orgànica i la formació d'enllaços irreversibles amb la matriu del sòl –argiles i òxids de ferro i alumini– condueixen a l'augment de la condensació i complexitat estructural de la matèria orgànica, la qual cosa, unida a la seua polidispersitat i a la distribució tridimensional i caòtica dels seus components, la fan difícilment recognoscible pels enzims específics del sòl. De fet alguns autors han arribat a comparar la maduració biològica o enzimàtica

de la matèria orgànica del sòl, que requereix centenars o milers d'anys, amb l'efecte dels incendis, que produeixen de vegades efectes pràcticament instantanis, difícilment distingibles dels processos biòtics propis del sòl. El foc, per tant, accelera els processos de canvi i evolució de la matèria orgànica.

Per tot això, la investigació científica estudia la qualitat abans que no la quantitat de carboni segregat al sòl. En particular, l'estudi de la qualitat del sòl donaria la mesura més fiable de la resiliència o capacitat dels sòls d'experimentar pocs canvis enfront d'impactes ambientals com el canvi climàtic.

«ENTRE 530 I 555 MILIONS D'HECTÀREES DE SÒL FORESTAL ES VEUEN AFECTADES ANUALMENT PEL FOC, LA QUAL COSA PROVOCA LA CREMA D'APROXIMADAMENT 50.000 MILIONS DE TONES DE BIOMASSA L'ANY»

■ EL FOC, BO O DOLENT?

La història del foc i de la gestió que se'n fa és la d'una ecologia humana adaptada al foc, que ha conegut canvis en els paradigmes dominants en relació amb les causes i efectes (catastròfics vs. favorables) dels incendis forestals. Els freqüents incendis que patim avui són una conseqüència de la intervenció humana en l'ecologia forestal, especialment per la reducció d'herbívors, en èpo-

ques relativament recents, des de fa aproximadament entre 100.000 i 250.000 anys. Igualment, i en relació amb la naturalesa dels efectes del foc, s'accepta generalment que les repercussions sobre el medi natural són desastroses, i aquesta és la percepció que deriva de les variacions en paràmetres químics i físics dels corresponents sòls afectats, on l'abast dels canvis supera, generalment en diversos ordres de magnitud, el produït per altres per-

A l'esquerra, Javier Riera. *Agullent-LAB*, 2011. Fotografia sobre paper, 82 x 120 cm.

torbacions induïdes per l'acció humana. En particular, experiments basats a contrastar els efectes d'incendis naturals amb els de focs controlats contribueixen a resoldre la controvèrsia sobre els variables efectes del foc –alguns dels quals positius– sobre el cicle biogeoquímic dels sòls i la qualitat de les distintes formes de carboni orgànic, i així intentar induir selectivament els efectes beneficiosos sobre el sòl i reduir els adversos.

■ LA INVESTIGACIÓ DELS INCENDIS FORESTALS

L'estudi dels efectes dels incendis forestals sobre els ecosistemes, en particular sobre el funcionament dels sòls, constitueix una línia d'investigació a què es presta especial atenció en tot el món, donada la rellevant incidència mediambiental del fenomen, recurrent en determinades formacions fitosociològiques. Entre les línies fonamentals que han centrat l'interès de les investigacions sobre els efectes dels incendis forestals en els sistemes edàfics, cal citar les següents: el foc i la successió ecològica; l'erosió i degradació del sòl i la influència en els processos hidrològics superficials i subsuperficials; el foc i la hidrofobicitat; els factors de fertilitat física del sòl; l'acumulació de formes estables de carboni a llarg termini (*black carbon* i humus pirogènic); els descriptors moleculars de l'efecte del foc en la matèria orgànica; l'activitat enzimàtica i microfauna del sòl; la intencionalitat del foc associada als interessos econòmics d'ús del sòl; el foc i l'alliberament a l'atmosfera de productes volàtils cancerígens o mutàgens; i la previsió i provisió de serveis d'extinció i control.

Tots aquests temes generals han donat lloc a la proliferació d'una extensa bibliografia i a la freqüent celebració de conferències internacionals. Entre aquestes tenen gran repercussió les sèries de congressos Forest Fires Research i Fire Ecology and Management, com també els tallers específics sobre efectes d'incendis forestals celebrats en les últimes convencions de l'European Geosciences Union (EGU, Viena, 2002–2011) i en els nombrosos congressos sobre riscos ambientals. Així mateix, creix cada dia el nombre i interès de revistes especialitzades (*Journal of Forest Fire Research*, *International Journal of Wildland Fire*, *Fire Safety*, *Fire and Materials* o *Fire Management Notes*), així com la presència freqüent d'articles sobre aquest tema en revistes multidisciplinàries d'ecologia i ciències del sòl, forestals o mediambientals. Un compendi d'aquestes nombroses referències s'arreplega en la publicació mensual *Current Titles in Wildland Fire* del Fire Research Institute d'Arizona.¹ D'altra banda, en

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



© Vicky Arcenegui

molts països hi ha societats científiques que reuneixen especialistes nacionals en els variats aspectes de l'estudi dels efectes dels incendis, com la xarxa espanyola FuegoRed² creada el 2007 sota l'auspici del Ministeri de Ciència i Innovació.

■ EL FOC I EL CICLE DEL CARBONI EN SÒLS D'ECOSISTEMES MEDITERRANIS

La incidència dels incendis és particularment acusada als països amb clima mediterrani, on es reconeixen com un dels principals motors del canvi en l'estructura i funcionament dels ecosistemes. Això és degut a les

² <http://www.fuegored.com>



Els incendis afecten tot tipus de bosc i generen anualment 50.000 milions de tones de biomassa. El foc destrueix o degrada matèria orgànica, però també en crea de nova. Per això, és important estudiar la qualitat i no només la quantitat de carboni segrestat al sòl després d'un incendi.

**«L'EFECTE DEL FOC SOBRE EL SÒL,
A MÉS DE DONAR LLOC A UNA
DESTRUCCIÓ O DEGRADACIÓ SELECTIVA
DELS CONSTITUENTS ORGÀNICS, CREA
TAMBÉ NOVES FORMES DE MATÈRIA
ORGÀNICA»**

característiques pròpies del clima mediterrani semiàrid, com ara una estació càlida i seca, amb dèficit hídric al sòl. Això determina la paralització dels processos bioquímics o enzimàtics del sòl, de manera que els mecanismes de biodegradació i humificació amb prou feines tenen lloc durant dos o tres mesos de l'any, la qual cosa retarda considerablement el flux del carboni i sobretot l'alliberament de nutrients necessaris per a la recàrrega de la solució del sòl. En aquestes condicions el foc constitueix un agent recurrent en l'acceleració del cicle biogeoquímic del carboni, que destrueix una vegetació de lent creixement que es recupera en pocs anys a costa de l'alliberament de nutrients en les cendres, però que alhora conserva o fins i tot incrementa el contingut en carboni acumulat al sòl.

D'altra banda, les espècies vegetals típicament mediterrànies són d'alta inflamabilitat, donat el seu baix contingut en aigua i la concentració relativament elevada d'olis essencials combustibles. A més, aquests ecosistemes sovint incorporen espècies pirofítiques, amb adaptacions anatòmiques o fisiològiques que els permeten rebrotar després de l'efecte del foc.

Mentre que els ecosistemes d'elevada activitat biològica, com la selva tropical, presenten un balanç nul o negatiu en l'acumulació de carboni del sòl, a causa de la contínua activitat biològica –i al fet que el carboni de l'atmosfera se segresta fonamentalment a la biomassa i no al sòl– als ecosistemes semiàrids, l'acumulació de *black carbon* unida a la formació de substàncies húmiques recalcitrants o difícilment recognoscibles pels enzims constitueixen un procés abiòtic decisiu per a la progressiva estabilització i acumulació del carboni al sòl.

Finalment, als ecosistemes mediterranis trobem factors socioeconòmics que contribueixen a la proliferació dels incendis en alguns escenaris, com ara el manteniment de pràctiques ancestrals (crema de restolls i altres residus agrícoles) o l'èxode de la població rural, que ha provocat l'abandó de terrenys de conreu i de les pràctiques tradicionals d'explotació sostenible de la muntanya. Entre aquests factors, tampoc no hem d'oblidar el gran percentatge d'incendis que són provocats deliberadament.

■ EL FUTUR DE LA INVESTIGACIÓ SOBRE L'IMPACTE DELS INCENDIS FORESTALS

El seguiment dels efectes dels incendis sobre les propietats dels sòls és clau per dissenyar les estratègies de rehabilitació i restauració de zones afectades. Es considera en aquest sentit de gran importància aprofundir en un aspecte particular de l'estudi de l'impacte del foc



© Artermi Cerdà / Universitat de València

El pas del foc per les plantacions arbrades deixa paisatges desoladors, com en aquesta imatge dels incendis de Terol del 2009.



© Artermi Cerdà / Universitat de València

Vint dies després d'un incendi torna la vida, gràcies a un sòl on s'acumulen nutrients, aigua i arrels, tubercles o llavors. El sòl és la clau.

al sòl, com és l'alteració que experimenta la matèria orgànica, centrant-se particularment en l'anàlisi a nivell molecular de les alteracions que afecten les distintes formes de carboni del sòl, en particular les denominades substàncies húmiques.

Fins ara, els estudis de la matèria orgànica del sòl han contribuït a una visió neutra dels incendis com un factor que, per si mateix, no constitueix un factor progressiu o regressiu en l'evolució dels ecosistemes a nivell global. Com siga que el foc és un assenyalat factor abiòtic en la diversitat molecular de la matèria orgànica del sòl, l'estudi de les alteracions que provoca constitueix una línia d'interès per a una interpretació correcta dels processos ambientals que permeten inferir la qualitat dels ecosistemes i la salut del sòl, i que queden enregistrats en la composició molecular de la matèria orgànica, principalment en lípids i substàncies húmiques.

Els estudis sobre les alteracions de la matèria orgànica pel foc tenen, a més, un interès pràctic indubtable, atès que la composició de l'humus pot ser utilitzada com a indicador del grau de recuperació en el temps de sòls afectats per incendis forestals. Els nombrosos estudis centrats en la difícil identificació de descriptors moleculars o *proxies* de la incidència o intensitat dels sòls en el passat difícilment aporten descriptors qualitius o quantitius d'especial valor diagnòstic o amb capacitat de generalitzar-se en diferents ecosistemes. Entre aquests *proxies* s'ha assenyalat la formació d'àcids bencenocarboxílics, la generació de furfurals, la ciclització de les formes amídiques de N, o la destrucció o insolubilització de perilenquinones. Recentment ha pogut comprovar-se que els canvis en els índexs de preferència de carboni (relació entre molècules alquílques amb nombre parell o imparell d'àtoms de carboni) i longitud mitjana de les cadenes dels lípids lineals del sòl (fonamentalment hidrocarburs lineals i àcids grassos) poden servir com a mesura vàlida del

grau de recuperació en el temps de sòls afectats per incendis.

Per tant, el foc provoca que la matèria orgànica originàriament biodegradable s'estabilitze al sòl durant períodes prolongats i que es formen noves substàncies de tipus húmic que no existeixen en els organismes vivents. Els incendis provoquen alteracions en la microestructura del sòl, disparant processos d'hidrofobicitat o repel·lència, però també augmentant l'estabilitat dels enllaços entre la matèria orgànica i mineral. El foc intens determina, a més, la pèrdua de molts grups funcionals de la matèria orgànica (fonamentalment carboxils), la neoformació d'estructures cíclics o condensades, i la polimerització de precursors solubles que suposen alteracions estructurals de les biomacromolècules (cel·lulosa, lignina...) que les fan menys biodegradables car no són fàcilment recognoscibles pels enzims. De fet,



© Artermi Cerdà / Universitat de València

La presència del ramat permet la discontinuïtat en la coberta vegetal i amb això el control del foc.



Els grans incendis forestals estan units a l'abandonament del territori. En la imatge, el barranc de la Fos o dels Tarongers entre Bocairrent i Ontinyent. Els bancals i el molí abandonat són notaris mutus del temps i dels canvis en els usos.

algunes de les formes més estables de matèria orgànica del sòl es generen ràpidament per efecte del foc, com és el cas de les pseudomelanoïdines, o macromolècules provinents de la deshidratació tèrmica de carbohidrats (material socarrat), la formació de productes de Maillard, a partir de productes nitrogenats i carbohidrats, la condensació de compostos lipídics que es resinifiquen o s'incorporen a les altres formes d'estructura de matèria orgànica i, principalment, l'acumulació de productes de carbonització de la biomassa lignocel·lulòsica genèricament coneguts com *black carbon*, que, encara que pot biodegradar-se en períodes de temps raonables en condicions tropicals i quan es troba finament dividit, pot arribar a constituir una important proporció del carboni de sòl, molt difícilment quantificable per les tècniques analítiques convencionals.

És necessari aprofundir en les bases moleculars de l'estructura de la matèria orgànica del sòl (aproximacions espectroscòpiques no destructives, quimiotoxològiques i metabolòmiques), i sobre l'efecte selectiu del foc sobre les rutes biogèniques i diagenètiques que contribueixen als processos naturals d'estabilització de les formes de carboni al sòl. ☉

BIBLIOGRAFIA

- 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. i 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. Institut de Recursos Naturals i Agrobiologia, CSIC. Sevilla.

Gonzalo Almendros. Museu Nacional de Ciències Naturals, CSIC. Madrid.