



Efectos del fuego en la matriz del suelo. Consecuencias sobre las propiedades físicas y mineralógicas

MARIANA G. MINERVINI^{1,2}; HÉCTOR J.M MORRÁS^{1,✉} & MIGUEL A. TABOADA^{1,2}

¹Instituto de Suelos-CNIA –INTA. ²Consejo Nacional de Investigación Científicas y Técnicas (CONICET)

RESUMEN. Los incendios constituyen disturbios de muy diverso origen y variadas implicancias. Además de los efectos sobre la vegetación, pueden afectar los componentes y las propiedades de los suelos. Las modificaciones en los suelos, a su vez, suelen incrementar los procesos de erosión, de transporte de sedimentos y, como consecuencia de lo anterior, también de inundaciones. La mayor parte de los estudios sobre los impactos edáficos del fuego han tenido como objeto los efectos sobre la materia orgánica y otras propiedades químicas y, en menor medida, los efectos sobre las propiedades físicas y mineralógicas. El propósito de este trabajo fue revisar el estado del arte en la literatura sobre estos últimos efectos, que han sido menos explorados. Se ha encontrado que la profundidad de suelo afectada, así como la magnitud de los cambios, dependen de la intensidad del fuego y de los umbrales de temperatura de sus componentes orgánicos y minerales. La característica física del suelo más afectada por el fuego es la estructura u organización de agregados. Asimismo, en los suelos quemados se verifican incrementos de la hidrofobicidad. Ambos efectos modifican, a su vez, las propiedades hídricas de los suelos, disminuyendo la infiltración e incrementando los riesgos de erosión. El calentamiento de larga duración a temperaturas elevadas puede generar una microagregación de las partículas minerales, dando como resultado la generación de pseudo-texturas más gruesas en el horizonte superficial. En esas condiciones son afectados los minerales de arcilla, habiéndose verificado la disminución del contenido de caolinita y la transformación de los minerales expandibles. Si bien los estudios son escasos, también se han constatado modificaciones en los oxo-hidróxidos de hierro, incluyendo modificaciones de las propiedades magnéticas en la capa superficial del suelo. Los efectos en los compuestos de hierro pueden generar modificaciones del color del suelo, las que pueden ser indicativas de la intensidad del fuego. Trabajos recientes muestran también la fracturación de granos de la fracción arena como consecuencia de la repetición de incendios de alta temperatura. Esta revisión pone de manifiesto las necesidades de investigación respecto a los efectos del fuego sobre los componentes inorgánicos del suelo, hasta el presente menos tenidos en cuenta. La síntesis realizada muestra resultados a menudo contradictorios entre los distintos trabajos, lo cual obedece a las diferentes propiedades constitutivas de los suelos, los distintos tipos de incendios y a sus múltiples posibilidades de combinación.

[Palabras clave: incendios, estructura del suelo, agregación, porosidad, hidrofobicidad, textura, minerales, color]

ABSTRACT. Effects of fire on the soil matrix. Consequences on soil physical and mineralogical properties. Fires constitute disturbances of very diverse origin and varied implications. In addition to the effects on vegetation, fires can affect the components and properties of soils. Changes in soils, in turn, tend to increase erosion processes, sediment transport and, as a consequence, floods. Most of the studies on edaphic fire impacts have been focused on the effects on organic matter and other chemical properties and to a lesser extent on the effects on physical and mineralogical properties. The purpose of this work has been to review the state of the art in the literature on the latter effects that have been less explored. It has been found that the soil depth affected, as well as the magnitude of the changes, depend on the fire intensity and the temperature thresholds of its organic and mineral components. The physical characteristic of the soil most affected by fire is the structure or organization of aggregates. Likewise, increases in hydrophobicity occur in burned soils. Both effects modify, in turn, the water properties of the soils, reducing the infiltration and increasing the risks of erosion. Long-term heating at elevated temperatures can lead to microaggregation of the mineral particles, resulting in the generation of coarser pseudo-textures in the surface horizon. Under these conditions, clay minerals are also affected, with a decrease in kaolinite content and transformation of the expandable minerals. Although studies are scarce, modifications have also been observed in iron oxy-hydroxides, including modifications in magnetic properties in the topsoil. Effects on iron compounds may lead to changes in soil color, which may be indicative of fire intensity. Recent works also show the cracking of grains of the sand fraction as a consequence of the repetition of high temperature fires. This review highlights research needs regarding the effects of fire on inorganic soil components, which were less considered up to present. The synthesis carried out often shows contradictory results among the different works, which is due to the different constitutive properties of the soils, the different types of fires and their multiple combination possibilities.

[Keywords: fires, soil structure, aggregation, porosity, hydrophobicity, texture, minerals, color]

Editora asociada: Natalia Pérez Harguindeguy

✉ hmorras@gmail.com

Recibido: 29 de julio de 2017

Aceptado: 3 de octubre de 2017

INTRODUCCIÓN

Los incendios de vegetación constituyen un modificador potente y rápido del ecosistema donde se producen, afectando tanto a la biomasa vegetal como al suelo subyacente y, a través de estos efectos, también en la hidrología y, cuanto menos transitoriamente, la atmósfera. La ocurrencia del fuego en la vegetación está indudablemente influenciada por factores climáticos: los climas más cálidos y secos tienden a favorecer los incendios; las tormentas con actividad eléctrica también generan incendios, incluso en regiones húmedas. Por otro lado, los incendios de vegetación también han sido producidos históricamente por el hombre, por accidente o de manera intencional con fines diversos (Velde and Barré 2010). Hoy en día los incendios de vegetación adquieren importancia particular en el contexto de su uso para desmonte y limpieza, asociados a la expansión de la frontera agropecuaria que ocurre sobre todo en áreas subtropicales y tropicales. Al mismo tiempo, se ha sugerido que los incendios naturales se incrementarían con el calentamiento climático global (Huggett 1995; IPCC 2014). Este hecho resulta tanto del aumento de la temperatura en general como por la prolongación de los eventos extremos de períodos secos (Silvestrini et al. 2011). Los incendios de vegetación pueden contribuir asimismo al cambio climático

por la liberación a la atmósfera del carbono contenido en la vegetación y el suelo, y por la interrupción de la formación de nubes que, a su vez, disminuyen las precipitaciones (Silvestrini et al. 2011). La combinación de incremento de temperatura, extensión de períodos secos y deforestación que permite la rápida propagación de incendios podría, a su vez, acentuar la frecuencia y magnitud de los eventos de incendio.

Los incendios influyen en los procesos de erosión de suelos, en los procesos hidrológicos, y en los procesos biogeoquímicos (Sala and Rubio 1994; Neary et al. 2005a; Tálamo et al. 2016). El impacto del fuego sobre los suelos, depende de numerosos factores, tales como: tipo de vegetación presente, intensidad y severidad del fuego, tipo de suelo, contenido de humedad en el momento de la quema, duración e intensidad de precipitación post-incendio y calidad y grado de incorporación de cenizas (Agee 1993; DeBano et al. 1998). Existe una mayor proporción relativa de estudios relacionados con los efectos sobre las propiedades químicas del suelo y una menor cantidad de antecedentes de los efectos sobre las propiedades morfológicas, físicas y mineralógicas de los suelos (Are et al. 2009). Además de las vacancias de conocimiento señaladas, existen también resultados controvertidos (Neary et al. 1999; Certini 2005; Shakesby and Doerr 2006; Keeley 2009;

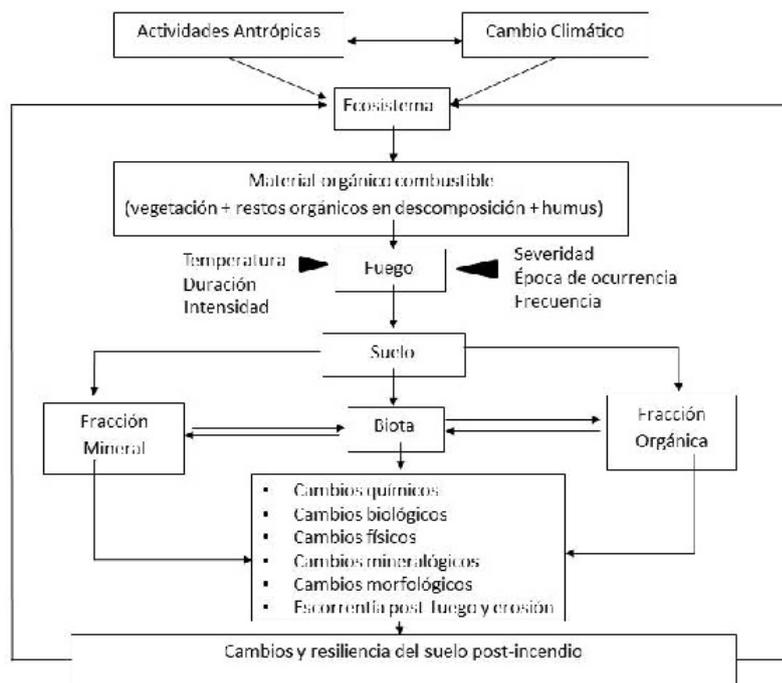


Figura 1. Esquema que resume los factores y los efectos del fuego generado por combustión de diferentes materiales orgánicos sobre los componentes y las propiedades del suelo.

Figure 1. Scheme summarizing the factors and effects of fire generated by combustion of different organic materials on soil components and properties.

Mataix-Solera et al. 2011). En este marco, la presente revisión tiene por objetivo exponer el estado del conocimiento sobre los impactos de los incendios de vegetación en aquellas propiedades relativas a la composición y organización del suelo que han sido hasta ahora menos estudiadas.

La búsqueda bibliográfica se realizó a través de la bases de datos Scirus (www.scirus.com), actualmente no vigente, Scopus (www.scopus.com), Science Direct (www.sciencedirect.com), Scimago (www.scimagojr.com), más búsquedas realizadas en el buscador Google Académico (scholar.google.com), la hemeroteca y las bibliotecas de la Facultad de Agronomía UBA y del Centro de Investigación de Recursos Naturales (CIRN) de INTA. Esta revisión se realizó en dos etapas: en primer lugar se seleccionaron trabajos de revisión bibliográfica relacionados a los incendios de vegetación, con el objeto de comprender los factores, la dinámica y los efectos del fuego y de determinar áreas de vacancia de información, lo que dio lugar a la elaboración de un modelo conceptual (Figura 1). En segundo lugar se seleccionaron trabajos de diversas regiones del mundo, incluyendo una revisión específica de las publicaciones argentinas, a partir de algunas palabras clave como fuego, incendios, mineralogía, entre otras.

EFFECTOS DEL FUEGO

La matriz del suelo está constituida por partículas minerales y materia orgánica, las cuales se organizan en unidades más complejas denominadas agregados. Entre los agregados existen espacios vacíos –el espacio poroso– de importancia fundamental en el ciclo del agua y en los procesos biológicos. En otros términos, la estructura del suelo se define por las características de los agregados y poros, los que pueden ser descriptos en términos de su forma, estabilidad y resiliencia (Dexter 1988; Kay and Angers 2001; Morrás 2015). Los agregados formados en el suelo y sus características son dependientes del contenido total de materia orgánica, de ciertos compuestos orgánicos –en particular los polisacáridos– producidos por la microflora y por exudados de raíces, de la proporción y tipo de arcilla, de la presencia de elementos ligantes como el carbonato de calcio y los oxi-hidróxidos de Fe y Al, de la proporción de iones Ca^{2+} en el complejo de intercambio, etc. (Velde and Barré 2010; Gobat and Le

Bayon 2013). Por su parte, la formación de poros depende de procesos abióticos basados en mecanismos de expansión-contracción y bióticos, en este caso basados en la agregación inducida por componentes orgánicos e inorgánicos, así como también del desarrollo de raíces y de la actividad de la fauna del suelo. Otras propiedades físicas del suelo influenciadas por el estado de agregación y por las características del espacio poroso son la capacidad de retención y la dinámica del agua. En consecuencia, las modificaciones causadas por el fuego en los componentes orgánicos y minerales del suelo pueden tener un efecto directo sobre sus propiedades físicas e hídricas, y de este modo, sobre la disponibilidad de agua para las plantas.

Degradación física y erosión

El fuego acelera la descomposición y la destrucción de la materia orgánica, por lo que tiene un rol perjudicial no sólo sobre ésta, sino también sobre las comunidades biológicas del suelo. Por el contrario, los efectos del fuego sobre las fracciones inorgánicas son usualmente inversos a las producidas en los componentes orgánicos, pudiendo generar incrementos de la agregación y de la estabilidad de agregados. La estabilidad estructural consiste en la capacidad de los agregados de permanecer estables en el tiempo, resistiendo la acción de fuerzas mecánicas exógenas como las que causan la erosión por el agua y el viento (Dexter 1988). Este es uno de los factores principales que más fuertemente influye sobre la erodabilidad del suelo. La eliminación de la cubierta vegetal por incendios es el primer factor que afecta negativamente la estabilidad estructural, ya que torna al suelo más vulnerable a los agentes externos tales como la energía cinética de las gotas de lluvia. Además, la eliminación de la cobertura vegetal disminuye la producción de compuestos orgánicos de carbono lábil, los cuales actúan como agentes ligantes en los agregados (Dexter 1988).

Los efectos del fuego sobre las propiedades físicas del suelo dependen de la temperatura alcanzada por el suelo. García-Corona et al. (2003) en ensayos de laboratorio sobre suelos ricos en C orgánico bajo vegetación de pinos, encontraron que a temperaturas entre 220 °C y 460 °C se produjo una fuerte desagregación, con desaparición casi total de los agregados mayores a 1 mm y una disminución de la estabilidad de los agregados, lo que se relacionó con la combustión de la materia

orgánica. Por el contrario, Giovannini y Lucchesi (1997) encontraron que el calentamiento hasta 600 °C resultó en una disminución de la materia orgánica del suelo, pero en un incremento de la proporción de macroagregados. Al mismo tiempo, diversos autores han encontrado que la estabilidad al agua de los agregados del suelo aumenta con la temperatura, a pesar de la combustión de la materia orgánica. Ese incremento en la estabilidad de agregados inducido por el fuego sería máximo entre 220 °C y 460 °C, habiendo sido atribuido a la deshidratación de geles y a las transformaciones térmicas de los óxidos de Fe y Al que actuarían como cementantes inorgánicos de las partículas del suelo (Giovannini 1994; Six et al. 2004). Debido a que las partículas de óxidos de hierro son normalmente pequeñas y tienen una gran superficie específica con cargas tanto positivas como negativas, también juegan un rol sumamente importante en la agregación del suelo (Schaetzl and Thompson 2015).

Guerrero et al. (2001) estudiaron la estabilidad de agregados en ensayos de campo y en laboratorio, usando simuladores de lluvia en suelos poco desarrollados de diferentes texturas que fueron calentados a diferentes temperaturas. Estos autores encontraron una disminución del contenido de materia orgánica pero, a su vez, un incremento de la estabilidad de agregados. Esta aparente contradicción fue atribuida a la fusión de componentes de la fracción mineral generando cementación de partículas. Estos mismos autores señalan que los suelos afectados por el fuego pueden estar muy degradados, con disminución del contenido de materia orgánica y de la actividad microbiana, pero pueden tener igual muy elevada estabilidad estructural. Sin embargo, estos agregados quemados no contribuirían a una buena calidad de estructura, ni a un adecuado comportamiento hidrofísico y a una mayor fertilidad del suelo. Are et al. (2009) estudiaron el efecto del fuego en microagregados de origen fecal, los que fueron depositados por lombrices en la superficie de suelos con contenido elevado de hierro y arcilla. Los resultados mostraron un incremento de la estabilidad de esos agregados, lo que disminuiría el efecto destructor del impacto de gotas de lluvia. Como se detalla más adelante, otro de los efectos habituales del fuego en el suelo es el incremento de las fracciones de limo y arena en detrimento de la arcilla, lo cual en algunas circunstancias podría aumentar también la erodabilidad de

los suelos. Ello se debe a que los suelos limosos son más sensibles al impacto de la lluvia y, en consecuencia, más susceptibles a la erosión (Darboux and Algayer 2013).

Otro componente de la estructura que puede ser afectado negativamente por el fuego y el calentamiento asociado es la porosidad total y el tamaño de los poros en la superficie del suelo (DeBano et al. 2005). La pérdida de agregación por el fuego reduce la porosidad del suelo y aumenta la densidad aparente (relación entre el volumen de poros y el volumen total de una muestra). En las Yungas jujeñas, Minervini et al. (2014) también hallaron que la densidad aparente fue la propiedad física más afectada por el fuego, presentando aumentos significativos en los primeros 10 cm de espesor del suelo. Se ajustó una relación lineal inversa y estrecha entre el contenido de C orgánico y la densidad aparente, indicando que la pérdida de materia orgánica por combustión hizo disminuir la porosidad de estos suelos. Estos aumentos de densidad aparente debidos a la disminución del volumen total de poros suceden tanto por colapso de la estructura órgano-mineral, como por la obstrucción de la misma por las cenizas liberadas por la combustión del material vegetal (Neary et al. 1999; Certini 2005; Are et al. 2009; Mataix-Solera et al. 2011). Es importante considerar que las modificaciones en los agregados y taponamiento de los poros de los suelos por las cenizas como consecuencia de los incendios, favorece la reducción de la capacidad de infiltración, incrementando la escorrentía y la erosión de los suelos (Giovannini et al. 1988; DeBano et al. 2005). Blake et al. (2007) estudiaron las características y el comportamiento de agregados durante el transporte hídrico en una cuenca de captación de agua en Australia. Estos autores encontraron que los agregados de suelos severamente quemados son más fácilmente transportados por el agua respecto a los suelos no quemados. Ello fue atribuido a una mayor resistencia a la dispersión asociado con una mayor densidad y menor porosidad, como consecuencia de la reducción de materia orgánica y a la contracción de la matriz de suelo.

La modificación de la infiltración y el movimiento del agua en el suelo como consecuencia del aumento de la hidrofobicidad se considera entre los cambios más influyentes en los suelos como resultado del efecto del fuego. Sin embargo, la hidrofobicidad puede encontrarse tanto en suelos no quemados

como quemados. En los primeros, la repelencia al agua es producida por la materia orgánica que cubre las partículas minerales. Asimismo, también los microorganismos y en particular los hongos generan sustancias hidrofóbicas (Chenu and Cosentino 2011). En el caso de los suelos quemados, el mecanismo se relaciona con los gases producidos por la volatilización de sustancias orgánicas durante el incendio, los que penetran en el suelo y se condensan en las partículas más frías subyacentes a algunos centímetros de profundidad, creando una capa hidrofóbica y paralela a la superficie del suelo (DeBano 2000). Los factores que influyen en el desarrollo de hidrofobicidad como consecuencia de los incendios son la severidad del fuego, el tipo y contenido de materia orgánica, el gradiente de temperatura en el suelo mineral, su textura y el contenido de agua (DeBano et al. 2005). Diversos autores encontraron que el máximo de repelencia al agua se produce a temperaturas del suelo de alrededor de los 200 °C y que la hidrofobicidad prácticamente desaparece después de los 350 °C-450 °C (DeBano 2000; Francos et al. 2014).

El incremento de la hidrofobicidad disminuye el agua infiltrada en el suelo. Ello puede afectar el ciclo hidrológico local, incluso a escala de varios cientos o miles de hectáreas. En un bosque de pinos en Israel, Ginzburg y Steinberger (2012) encontraron que, aún cuatro años después del incendio del bosque, la humedad del suelo continuaba siendo menor en las áreas quemadas, independientemente de la nueva cubierta vegetal. La repelencia al agua que se genera por los incendios tiene también incidencia posterior en la modificación del efecto de impacto de las gotas de lluvia y en los procesos de erosión (DeBano 2000; DeBano et al. 2005). La capa formada por condensación de los gases de incendio impide que las raíces finas de las plantas penetren entre las partículas del suelo, dificultando el establecimiento de plántulas, y causando la muerte de los individuos sobrevivientes al incendio (DeBano 1999; Shakesby and Doerr 2006).

La duración de la hidrofobicidad puede variar de días a años, dependiendo de la severidad de los incendios (DeBano 2000). Uno de sus aspectos positivos es el aumento de la estabilidad y la resistencia a la desintegración de los agregados, ya que limita los fenómenos de estallido en agua por aumento de presiones de aire entrampado (Díaz-Fierros et al. 1987; Cosentino et al. 2006; Chenu and Cosentino 2011). Gordillo-Rivero et al. (2013) hallaron que

la hidrofobicidad disminuyó progresivamente en las fracciones de microagregados más gruesas hasta alcanzar los valores iniciales seis años después del fuego. Sin embargo, en la fracción más fina (0.25-0.5 mm), la proporción de microagregados hidrofóbicos se mantuvo constante.

Fracción inorgánica

Las temperaturas elevadas que se generan en los incendios afectan no sólo a la materia orgánica y los organismos biológicos del suelo, sino también a los minerales que lo constituyen. Una de las propiedades de los minerales es su coeficiente de dilatación, que es una función inherente a su estructura cristalológica. En el caso de las rocas, la expansión térmica diferencial de los distintos minerales constitutivos bajo el efecto de la simple insolación diurna, y la contracción subsecuente durante el enfriamiento nocturno, genera tensiones internas y es una de las causas de la fracturación y fragmentación. Este proceso de termoclastismo operaría particularmente en ambientes desérticos, en los que la superficie de las rocas puede alcanzar valores de hasta 82 °C y en los que pueden ocurrir importantes fluctuaciones diarias de temperatura (Gutiérrez Elorza 2001). Durante los episodios de incendios las temperaturas resultan ser mucho más altas que las producidas por la insolación directa, por lo que los procesos de termoclastismo pueden alcanzar mucha mayor magnitud (Blackwelder 1926; Ollier and Ash 1983; citados por Schaetzl and Thompson 2015). Durante la combustión de la biomasa vegetal, la capa superficial de las rocas expuestas al fuego puede superar los 500 °C. Como la roca es un mal conductor del calor, sólo una capa muy delgada de la misma adquiere una temperatura muy elevada que decrece rápidamente con la profundidad; de este modo la capa superficial se expande más rápidamente y puede dar lugar a la ruptura de la roca en delgadas láminas (Birkeland 1974 citado por Morrás 2016). El efecto en la meteorización por expansión térmica es particularmente efectivo si el fuego es inmediatamente seguido por una lluvia que enfríe la superficie de las rocas (Schaetzl and Thompson 2015). Los anteriores procesos pueden afectar tanto a los fragmentos rocosos o clastos gruesos de suelos pedregosos, como a las fracciones inorgánicas más finas contribuyendo a otros procesos químicos y biológicos de meteorización. Recientemente Minervini et al. (2017a) pusieron en evidencia una notable fisuración de granos de cuarzo de

la fracción arena en el horizonte superficial de suelos con vegetación de selva afectada por incendios repetidos.

Textura

La textura del suelo es la proporción relativa de las fracciones arcilla, limo y arena (partículas menores a 2 μm , entre 2 y 50 μm , y entre 50 y 2000 μm , respectivamente). Tanto en trabajos de campo como de laboratorio el calentamiento del suelo resulta, en general, en la generación de texturas más gruesas y, en consecuencia, de suelos más erosionables. Esto se debe a que la fracción granulométrica más afectada por el fuego es la arcilla que se agrega o se aglomera o se descompone (Ulery and Graham 1993). A temperaturas cercanas a los 400 °C se inicia el colapso de la estructura de los filosilicatos arcillosos, produciéndose su destrucción completa a 700 °C-800 °C. Las fracciones de limo y arena están constituidas por minerales diversos, aunque en general el cuarzo es el predominante. Su fusión se produce sólo a temperaturas extremas, superiores a 1200 °C. Las temperaturas alcanzadas en los incendios raramente afectan las fracciones granulométricas por debajo de unos pocos milímetros o hasta un par de centímetros por debajo de la superficie del suelo mineral (DeBano et al. 2005). En cambio, la quema de las raíces de árboles puede afectar varios decímetros por debajo de la superficie del suelo (Ketterings et al. 2000). Estos últimos autores estudiaron el efecto del incendio de vegetación forestal en Oxisoles en Indonesia, encontrando que a temperaturas superiores a 600 °C se produjo un marcado aumento en la proporción de arena y una disminución del limo y en particular de la arcilla. Incrementos menos pronunciados de la fracción arena se observaron también a temperaturas inferiores, pero se limitaron a la capa superficial del suelo entre 0-5 cm de profundidad.

En suelos Molisoles, Alfisoles, Inceptisoles y Andisoles de California con vegetación forestal, Ulery y Graham (1993) observaron que los cambios de textura en el suelo fueron restringidos a las áreas con incendios severos, donde se formaron microagregados estables del tamaño de la arena a temperaturas mayores a 600 °C. Ésto sería consecuencia de la generación de compuestos amorfos de Si y Al resultantes de la destrucción de los filosilicatos, en particular de la caolinita, los que actuarían como agentes cementantes de las partículas finas. En un trabajo posterior en los mismos sitios, Ulery et al. (1996)

comprobaron también, bajo el efecto de temperaturas elevadas, la modificación de partículas de mica del tamaño de arena fina, con liberación del Fe^{2+} de la estructura cristalina. Por su parte, en Molisoles quemados a temperaturas inferiores a 500 °C, Arocena y Opio (2003) encontraron la fracturación de feldespatos y anfíboles de la fracción arena, lo que habría llevado a su reducción de tamaño e incorporación a fracciones más finas. En suelos Entisoles, Inceptisoles y Ultisoles severamente quemados de la parte superior de una cuenca fluvial con vegetación de Eucalipto nativo de Australia, Blake et al. (2007) encontraron una disminución en la fracción de limo fino (2-20 μm) y un incremento en la fracción de arena fina (125-250 μm). Esto se habría debido a la formación de microagregados densos, lo cual tendría implicancia en el transporte coluvial y fluvial de sedimentos y nutrientes. En la Argentina, Hepper et al. (2008) calentaron a diferentes temperaturas la capa 0-5 cm del horizonte superficial de Molisoles de la Región Pampeana, uno de textura franco arenosa y otro de textura franca. Hallaron que con temperaturas de 600 °C se incrementó la fracción gruesa, produciéndose la transformación del suelo franco en franco arenoso y del franco arenoso en arenoso franco. En Molisoles de Córdoba (Argentina), un suelo de textura limosa, calentado a 500 °C en laboratorio mostró un incremento del limo y la arena, posiblemente debido al aglutinamiento de las partículas de arcilla (Sacchi et al., 2015). Por el contrario, en un suelo de textura franca al que se le aplicó la misma temperatura, se observó un aumento del limo, pero una disminución de la arena, lo cual fue atribuido a la ruptura de feldespatos y otros minerales de la fracción más gruesa. En Molisoles de las Yungas (Jujuy, Argentina) afectados por incendios, Minervini et al. (2014; 2017b) observaron incrementos notorios del contenido de limo en la capa superficial entre 0-10 cm de los suelos quemados, con disminución concomitante tanto de la arcilla como de la arena y modificación así de la textura. Según los autores esta modificación granulométrica podría deberse tanto a la aglutinación de la fracción fina como a una posible fragmentación de los granos de la fracción arena, consecutiva a la fracturación efectivamente constatada de esos granos.

Minerales de arcilla

La organización y composición de las arcillas puede modificarse por el calentamiento, procedimiento que justamente se utiliza

para la identificación de los distintos tipos mineralógicos. Los efectos de la temperatura en los minerales han sido extensamente estudiados en ensayos de laboratorio. Entre 25 °C y 200 °C los filosilicatos sufren deshidratación, con pérdida de moléculas de agua fijada en la superficie del mineral o bien ligada a los cationes cambiables. Aproximadamente entre 200 °C y 400 °C se produce la pérdida de oxhidrilos de los hidróxidos de Fe y Al que acompañan frecuentemente a los filosilicatos. Por encima de 400 °C se inicia un proceso de deshidroxilación, es decir de pérdida de agua de constitución y modificación de la estructura cristaloquímica, que es función del tipo de arcilla: la destrucción de las caolinitas se produce alrededor de los 500 °C. La deshidroxilación de las cloritas verdaderas ocurre después de 700 °C, en tanto que la deshidroxilación de minerales intergrado entre vermiculitas y cloritas se da a temperaturas intermedias entre 400 °C y 700 °C dependiendo del grado de organización de la capa interfoliar octahédrica (Robert 1975, 1977; Farmer 1978).

Es así que las altas temperaturas generadas en los incendios de vegetación producen también cambios en la mineralogía de las arcillas de los suelos afectados. En ensayos a campo de quema de vegetación forestal realizados en suelos Oxisoles de Indonesia con caolinita y gibsita dominantes en la fracción arcilla, Ketterings et al. (2000) hallaron una reducción de la cantidad de caolinita a una tercera parte y de la de gibsita a la mitad en la capa superficial del suelo (0-5 cm) a temperaturas superiores a 600 °C. En Inceptisoles, Molisoles y Andisoles de California quemados por incendios forestales, Ulery et al. (1996) encontraron notorias modificaciones en los minerales de arcilla entre 1 y 8 cm de profundidad del suelo. Ello se observó en los sectores más severamente afectados, que adquirieron un color rojizo como consecuencia de la quema a altas temperaturas y por largo tiempo de combustibles densos (troncos y tocones) y en los cuales se destruyó completamente la caolinita. Por otro lado, observaron el colapso a 1.0 nm del retículo cristalino de la vermiculita, de la vermiculita hidroxilada y de la clorita. Dado el colapso de las capas octahédricas interlaminares de estos dos últimos minerales los autores dedujeron que las temperaturas en el suelo habrían oscilado entre 500 °C y 860 °C.

Otra de las consecuencias de los incendios en la fracción inorgánica son los cambios en

el potencial de expansión-contracción y la capacidad de intercambio catiónico de los filosilicatos, en especial cuando los suelos afectados poseen arcillas 2:1 expansibles. Por ejemplo, en Molisoles sub-boreales, Arocena y Opio (2003) encontraron que fuegos prescritos indujeron una disminución en la proporción de los minerales expansibles (vermiculitas) en horizontes superficiales (Ae) y subsuperficiales (Bm); por el contrario, no se observaron modificaciones en la caolinita. Estos resultados indican que en los casos evaluados las temperaturas alcanzadas fueron inferiores a 500 °C. Las arcillas de tipo 2:1 participan en el proceso de fijación o retrogradación del potasio en las estructuras cristalinas. Cuando este elemento se encuentra en cantidad suficiente, se pueden formar capas de potasio anhidro en los espacios interfoliares de las arcillas expansibles, generando el colapso de esos espacios y la transformación hacia estructuras de tipo illita, no expansibles y de menor capacidad de intercambio iónico (Velde and Barré 2010). Esta disminución del potencial de expansión-contracción de las arcillas, determina una menor capacidad de los suelos para generar poros por mecanismos abióticos durante los ciclos de humedecimiento-secado. Ello limita la capacidad de regenerar su estructura por procesos naturales cuando cesa el fuego, proceso conocido como resiliencia (Kay 1990). En ensayos de laboratorio sobre un suelo arcillo limoso y otro franco arenoso, Giovannini et al. (1990a) encontraron una disminución de la plasticidad a partir de los 220 °C y una pérdida de la misma a partir de los 460 °C, lo cual sería también en parte derivado de la modificación de las arcillas.

Oxidos de hierro

La combustión de la biomasa puede también afectar a los minerales de hierro del suelo. Iglesias et al. (1998) encontraron un incremento del hierro libre respecto al hierro total en la capa superficial de suelos quemados en relación a muestras testigo. Cancelo-González et al. (2015) estudiaron en laboratorio el efecto del calentamiento sobre la lixiviación del Fe en muestras de suelo no disturbadas, que fueron sometidas a diferentes temperaturas (222 °C y 401 °C) y a lluvias simuladas. Estos autores encontraron que la lixiviación de hierro se incrementó notoriamente a la temperatura más elevada del ensayo, migrando primero asociado a materia orgánica disuelta y luego en forma inorgánica, al disminuir la concentración de ésta.

En los suelos pueden encontrarse diversos óxidos de hierro (expresión que incluye, óxidos, oxihidróxidos y óxidos hidratados) con átomos en uno o sus dos estados de oxidación (Fe^{2+} , Fe^{3+}), tales como hematita ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), maghemita ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$), magnetita (Fe_3O_4), ferrihidrita (en general de fórmula $5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$), goethita ($\alpha\text{-FeOOH}$), lepidocrocita ($\gamma\text{-FeOOH}$). Estos compuestos pueden ser herencia del material parental, o bien resultado de los procesos de meteorización y pedogénicos (Schwertmann and Taylor 1989; Morrás 2016). La goethita es el óxido de hierro más ampliamente distribuido en los suelos y generalmente es el único óxido de hierro pedogénico en las zonas templadas y frías. La hematita, el óxido de hierro que le da el color rojo a los suelos, es común y generalmente más abundante que la goethita en los suelos de las áreas cálidas y templadas como en la región Mediterránea, donde la humedad relativa ambiente es baja durante períodos prolongados (Torrent et al. 1982). En las regiones subtropicales y tropicales la goethita y la hematita están asociadas en relaciones variables en función de diversos factores del suelo y climáticos. La maghemita, una forma ferrimagnética de Fe_2O_3 , es común en muchos tipos de suelos diferentes, especialmente en los trópicos y subtropicales, y muchas veces se encuentra en mayor concentración hacia la superficie de los perfiles de suelo (Schwertmann and Taylor 1989).

Los óxidos de hierro presentan reacciones térmicas relativamente débiles y a temperaturas altas (por ejemplo la hematita tiene una débil reacción a $680\text{ }^\circ\text{C}$), en tanto los fenómenos térmicos son más importantes en los oxihidróxidos (Robert 1977). Se ha demostrado que la goethita permanece estable desde la temperatura ambiente hasta $200\text{ }^\circ\text{C}$. A partir de los $250\text{ }^\circ\text{C}$ se produce el paso de esa fase hidroxilada, de color amarillo, a la fase oxidada hematita, de color rojo (Rooksby 1961). La formación de la maghemita en los suelos puede darse a través de diversos procesos, siendo uno de ellos la transformación térmica de otros óxidos de Fe pedogénicos –por ejemplo goethita o lepidocrocita– por calentamiento en presencia de compuestos orgánicos (Schwertmann and Taylor 1989). La conversión de minerales de hierro no ferrimagnéticos a óxidos ferrimagnéticos se produciría en pequeña proporción a temperaturas tan bajas como $200\text{ }^\circ\text{C}$, en presencia de materia orgánica, aunque la mayor parte del incremento

ocurriría a temperaturas superiores a $500\text{ }^\circ\text{C}$ (Schwertmann and Taylor 1989; Ketterings et al. 2000; Oldfield and Crowther 2007).

Durante los incendios de vegetación se generarían en los suelos condiciones de oxidación y temperatura que inducen la formación de minerales de hierro magnéticos como la maghemita (Certini et al. 2006; Churchman 2006; Minervini 2017), sugiriéndose también la concentración relativa de minerales magnéticos primarios por destrucción de los paramagnéticos (arcillas) (Minervini 2017). Este incremento del magnetismo puede prolongarse mucho tiempo, durante el cual el fenómeno podría ser detectado por el contraste existente con el magnetismo de los materiales no influenciados por el fuego. Debido a que los minerales magnéticos pueden ser detectados y caracterizados aún en muy bajas concentraciones, esto permitiría utilizar a la susceptibilidad magnética como posible indicador de procesos ambientales (Mullins 1977; Maher 1986; Thompson and Oldfield 1986). Por otro lado, la señal de susceptibilidad magnética covaría netamente con otros parámetros composicionales o físico-químicos del suelo, por lo cual se constituye en un indicador útil para detectar e interpretar modificaciones en los procesos pedogénicos, entre los que se incluye los derivados de los eventos de fuego (Schaeztl and Thompson 2015).

No obstante lo anterior, los estudios químicos y mineralógicos de los compuestos del hierro, y entre ellos sus parámetros magnéticos, han sido muy escasamente utilizados para evaluar el efecto de los incendios de vegetación en los suelos. Ketterings et al. (2000) realizaron experimentos con Oxisoles de Indonesia conteniendo caolinita, gibsitita, anatasa y goethita, consistentes en incendios de vegetación provocados en el campo y en condiciones de laboratorio con diferentes temperaturas de exposición ($100\text{ }^\circ\text{C}$, $300\text{ }^\circ\text{C}$, $600\text{ }^\circ\text{C}$ y más de $600\text{ }^\circ\text{C}$). El mayor cambio se produjo a temperaturas mayores a $600\text{ }^\circ\text{C}$ en la capa 0-5 cm, donde la gibsitita y caolinita disminuyeron y se formó maghemita ultrafina por la deshidratación de la goethita, aumentando así la susceptibilidad magnética. La adición de materia orgánica previo al calentamiento en un suelo con bajo contenido de la misma incrementó la susceptibilidad magnética indicando que la materia orgánica fue necesaria para producir la conversión

completa de la goethita. Por su parte, Rummary (1983) encontró cambios en la señal magnética en relación con los diferentes sedimentos generados por importantes incendios de vegetación en una cuenca en Gales. Gedye et al. (2000) usaron también diversas medidas magnéticas en conjunto con análisis polínicos y de carbón, para reconstruir la historia del fuego en una columna de sedimentos de un lago en Suiza que registra la evolución ambiental desde el último Máximo Glacial hasta el presente. En la Argentina, La Manna y Navas (2012) exploraron la utilización de la susceptibilidad magnética como marcador de eventos de incendios y sus incidencias en el suelo en el marco de un estudio sobre el efecto de los incendios en la estructura y funcionamiento de diversos ecosistemas de Patagonia. Recientemente, Minervini et al. (2015) observaron un incremento notorio de los valores de susceptibilidad magnética a alta y a baja frecuencia en la capa 0-10 cm de suelos quemados varias veces, respecto a suelos no quemados o con una sola quema en el pedemonte de la Selva de las Yungas en Jujuy.

Color

Diversos constituyentes son responsables del color de los suelos, entre los cuales son particularmente determinantes la materia orgánica y los oxihidróxidos de hierro. En este sentido, son evidentes los efectos de los incendios de vegetación en el color del horizonte superficial del suelo, cuyas modificaciones pueden representar indicadores de la gravedad de los incendios. Sertsu y Sánchez (1978) evaluaron las modificaciones del color de distintos suelos en ensayos de laboratorio a diferentes temperaturas. El calentamiento a 200 °C no produjo modificaciones del color; por el contrario, a 400 °C un suelo volcánico de color gris oscuro (10R3/1) y un Vertisol de color pardo oscuro (2.5Y4/2) se modificaron a colores rojizos (5YR3/4 y 2.5YR3/6 respectivamente). El cambio fue, sin embargo, muy pequeño en un Ultisol de color rojo. En cambio, Ketterings et al. (2000) observaron un mayor enrojecimiento en suelos Oxisoles con quemaduras severas a temperaturas superiores a 600 °C. En este caso, los sitios con enrojecimiento del suelo más marcado eran reconocidos como de menor fertilidad y escasa retención de agua. Lombao et al. (2015) encontraron una disminución importante en el parámetro luminosidad del color de un Entisol como consecuencia de incendios

forestales. Este cambio no se observó bajo fuego prescripto, diferencia que sería debida a diferencias en la severidad (temperatura y duración) del fuego entre ambas situaciones. En estudios de campo en suelos con horizontes superficiales oscuros (Molisoles y Andisoles), Ulery et al. (1993; 1996) observaron que los incendios de baja y moderada intensidad no producían cambios en el color de la matriz del suelo, más allá de la formación de ceniza negra. En cambio, los fuegos de alta intensidad con temperaturas superiores a 500 °C producían el enrojecimiento de la misma. En suelos severamente quemados, estos autores encontraron el enrojecimiento de la capa superficial del suelo entre 1 y 8 cm de profundidad, además de la acumulación de ceniza grisácea en superficie. Ello sería el resultado de transformaciones de los óxidos de Fe, con probable incremento de la hematita y/o maghemita, y la eliminación de la materia orgánica. Encontraron también una capa de suelo oscurecida que podía llegar hasta 15 cm de profundidad, cuyo color sería el resultado de la carbonización de la materia orgánica.

Sobre la base de diversos trabajos, Neary et al. (2005d) elaboraron una guía para evaluar la profundidad de quema en los suelos. Los suelos son afectados a mayor profundidad con temperaturas superiores a 500 °C y durante largo tiempo de quema. En estos casos los suelos presentan la capa superficial visiblemente oxidada, con colores rojizos o amarillentos dependiendo del material parental, en tanto que una capa negra de materia orgánica carbonizada de 1-2 cm de espesor aparece a profundidad variable debajo de la superficie. Esta profundidad se incrementa en relación con la duración de las temperaturas elevadas. Con fuegos menos intensos y con menor profundidad de afectación del suelo, no se observan modificaciones del color de la fracción mineral, aparte de una pequeña capa de materia orgánica carbonizada en los primeros milímetros del suelo mineral. Resulta interesante el trabajo de Schmidt et al. (1999) respecto al color de suelos Chernozémicos, caracterizados por tener horizontes A negros y profundos, derivados de la acumulación de materia orgánica humificada y la bioturbación. Estos autores encontraron una fuerte relación entre el color de estos suelos y el contenido de materia orgánica carbonizada –que alcanzaría hasta un 45% del C orgánico total, lo que sugiere que los incendios han jugado un importante rol en la génesis de las llamadas "tierras negras". Esta teoría propone un proceso

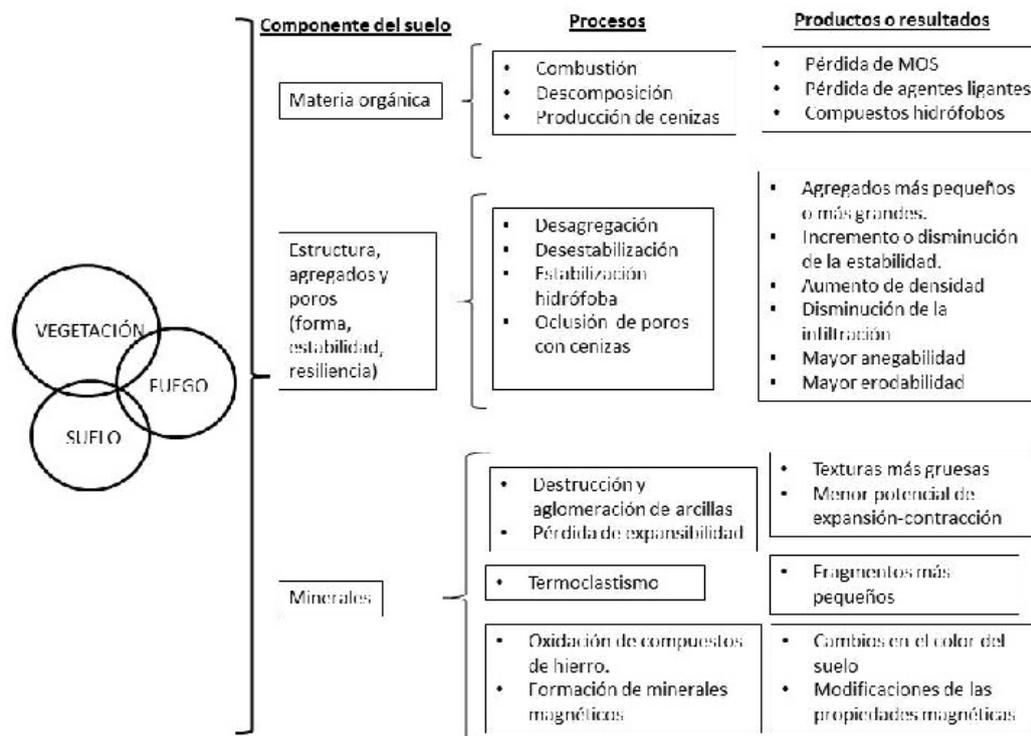


Figura 2. Esquema que resume los procesos que afectan a diversos componentes del suelo como consecuencia del fuego, y los productos o resultados que se derivan.

Figure 2. Scheme summarizing the processes that affect different components of the soil and the products and results derived as a consequence of fire.

alternativo deferente a la idea corriente que asocia el color de estos suelos con el humus. Finalmente, las modificaciones del color en la superficie del suelo afectan la absorción o reflexión de la energía radiante y, por ende, el régimen térmico del suelo, con consecuencias en parámetros hidrofísicos y en la actividad biológica (Schaetzl and Thompson 2015). Ello se suma a la modificación del albedo por los cambios en la vegetación por efecto de los incendios.

CONCLUSIONES

Los incendios de vegetación son disturbios de muy diverso origen y muy variadas implicancias en los ecosistemas. Estos incendios pueden ser naturales o producidos por el hombre; pueden ser ocasionales o recurrentes; su intensidad y severidad pueden ser variadas y las consecuencias sobre los componentes del paisaje muy diversas. Además de los efectos visibles sobre la vegetación, los suelos son también afectados en sus componentes bióticos y abióticos, orgánicos y minerales. En este marco, el propósito de este trabajo ha sido sintetizar el

conocimiento actual sobre los efectos causados por el fuego sobre las propiedades físicas y mineralógicas de los suelos, lo que ha recibido menor atención que los cambios relacionados con otras propiedades edáficas.

Una de las evidencias y conclusiones de esta revisión es que no existen patrones comunes y generales en los efectos de los incendios de vegetación sobre los componentes inorgánicos del suelo. En primer lugar, ello obedece a que los suelos son sumamente complejos y sumamente diversos y en segundo lugar, a que los incendios son también muy distintos. Consecuentemente las posibilidades de combinación son enormes. La profundidad de suelo afectada, así como la magnitud y dirección de los cambios en la fracción mineral y en las propiedades físicas son temas controvertidos y dependen de los umbrales de temperatura de cada componente y de la severidad de los incendios. No obstante, algunos efectos sobre ciertos componentes o ciertas propiedades edáficas se han constatado con mayor frecuencia en estudios a campo y/o en ensayos de laboratorio, los que se presentan esquemáticamente en la Figura 2.

Table 1. Resumen de los efectos de distintas temperaturas alcanzadas por el fuego sobre diversos componentes del suelo, según algunos de los trabajos referidos en esta revisión.
Table 1. Summary of the effects of different temperatures reached by fire on various soil components, according to some of the articles mentioned in this review.

T °C	Efectos sobre el suelo	Autores
>1200	Fusión de los materiales cuarzosos	Giovannini (1988); Ulery (1993)
950	Destrucción completa de las arcillas	Arocena (2003)
750	Pérdida total de la estabilidad estructural de los agregados	Mataix-Solera (2011)
700-800	Destrucción completa de la estructura de los filossilicatos: aumento de la densidad aparente por disminución del volumen total de poros y por la obstrucción de los mismos por las cenizas liberadas por la combustión del material vegetal	Giovannini (1988); Neary et al. (1999); Certini (2005); Are et al. (2009); Mataix-Solera et al. (2011)
400-700	Deshidroxilación de cloritas y de minerales intergrado entre vermiculitas y cloritas. Fracturación de minerales de la fracción arena.	Robert (1975; 1977); Farmer (1978). Arocena and Opio (2003); Minervini et al. (2017a)
500-600	Cambios texturales en los primeros cm de suelo con incremento de las fracciones más gruesas, y disminución de la fracción arcilla	Ulery and Graham (1993); Ketterings et al. (2000); Arocena et al. (2003); Blake et al. (2007); Hepper (2008); Sacchi et al. (2015)
600	Disminución de la gibsita y caolinita en la capa 0-5 cm y formación de maghemita ultrafina por la deshidratación de la goethita: aumento de la susceptibilidad magnética	Ketterings et al. (2000)
500	Capa superficial visiblemente oxidada, con colores rojizos o amarillentos dependiendo del material parental, y una capa subsuperficial negra de materia orgánica carbonizada	Ulery et al. (1993; 1996); Neary et al. (2005)
500	Conversión de la mayor parte de los minerales de hierro no ferrimagnéticos a óxidos ferrimagnéticos	Schwertmann and Taylor (1989); Ketterings et al. (2000); Oldfield et al. (2007)
500	Destrucción de las caolinitas	Robert, (1975; 1977); Farmer (1978); Arocena et al. (2003)
460	Pérdida de la plasticidad del suelo	Giovannini et al (1990); Kay (1990)
450	Incremento en la estabilidad de agregados inducido por el fuego atribuido a la deshidratación de geles y a las transformaciones térmicas de los óxidos de Fe y Al que actuarían como cementantes inorgánicos de las partículas del suelo	Giovannini (1994); Six et al. (2004)
450	Notable incremento del pH Combustión casi total de la MOS Desaparición casi total de la hidrofobicidad	Giovannini (1990); Giovannini (1988); DeBano (2000); Francos et al. (2014)
>400	Inicio del proceso de deshidroxilación por pérdida de agua de constitución y modificación de la estructura cristaloquímica de la arcilla Formación de óxidos e hidróxidos de K ⁺ , Na ⁺ y Mg ²⁺ y carbonatos de Ca Comienzo de los cambios de color en el suelo	Robert (1975; 1977); Farmer (1978) Giovannini (1990; 1994); Ulery et al. (1993); Knicker (2007) Sertsu and Sánchez (1978); Ulery et al. (1993, 1996); Ketterings et al. (2000)
220-460	Fuerte desagregación, desapareciendo casi en su totalidad los agregados mayores a 1 mm, y una disminución de la estabilidad de los agregados	García et al. (2003)
200-400	Pérdida de oxihidrilos de los hidróxidos de Fe y Al que acompañan frecuentemente a los filossilicatos	Robert (1975; 1977); Farmer (1978)
300	Destilación y carbonización de residuos orgánicos	Debano (1998)
250	Transformación de la goethita (estado hidroxilado, color amarillo), en hematita, (estado oxidado, color rojo).	Rooksby (1961)
220	Comienzo de disminución de la plasticidad del suelo	Giovannini et al. (1990); Kay (1990)
200	Máximo de hidrofobicidad causada por destilación de sustancias volátiles y formación de agentes cementantes	DeBano (2000); Francos et al.(2014)
200	Comienzo de la conversión de minerales de hierro no ferrimagnéticos a óxidos ferrimagnéticos en presencia de materia orgánica.	Schwertmann and Taylor (1989); Ketterings et al.(2000); Oldfield et al. (2007)
25 y 200	Deshidratación de los filossilicatos, con pérdida de moléculas de agua fijada en la superficie del mineral o bien ligada a los cationes cambiables. Procesos de termoclastismo en rocas y clastos expuestos	Robert (1975; 1977); Farmer (1978); Gutiérrez Elorza 2001)

En este sentido, la característica física del suelo más afectada por el fuego es su estructura, la cual es notoriamente dependiente de la materia orgánica y de la actividad biológica, las que pueden deteriorarse a temperaturas relativamente bajas. Las modificaciones de tamaño y estabilidad de los agregados del suelo reportadas por diversos autores son muy contrastantes, observándose en algunos casos aumentos y en otros disminución de esas propiedades. La pérdida de estructura reduce la porosidad, modificando así las propiedades hídricas y haciendo al suelo más vulnerable a la escorrentía post-fuego y a la erosión. Asimismo, en suelos quemados y bajo ciertas condiciones se observa un incremento de la hidrofobicidad como resultado de la vaporización y condensación de las sustancias orgánicas, lo que disminuye la infiltración e incrementa los procesos erosivos.

Los estudios existentes muestran que los incendios de vegetación también afectan las fracciones inorgánicas, lo cual dependerá del tipo de mineral, de su tamaño y de las temperaturas y duración del fuego. Contrariamente a los efectos producidos por pérdida de los componentes orgánicos, el fuego puede generar un incremento de la microagregación como resultado de la fusión de minerales y cementación con componentes inorgánicos. Del mismo modo, tanto en trabajos de campo como de laboratorio se ha observado la generación de texturas más gruesas en el horizonte superficial del suelo como resultado del calentamiento a temperaturas elevadas. También, la duración prolongada y las altas temperaturas alcanzadas en incendios con abundante combustible generan modificaciones en los minerales de arcilla. Se ha verificado así, por ejemplo, la disminución del contenido de caolinita y la transformación de los minerales expansibles, lo cual disminuye la capacidad de intercambio

catiónico y modifica el potencial de generar porosidad por mecanismos abióticos. Por otro lado, y si bien los estudios son escasos, como resultado del fuego se han constatado la fracturación de minerales de la fracción arena y modificaciones en los oxi-hidróxidos de hierro, incluyendo incrementos de las propiedades magnéticas en la capa superficial del suelo. Los efectos de la temperatura y la oxidación en los compuestos de hierro pueden trasuntarse asimismo en modificaciones del color del suelo, las que pueden ser indicativas de la intensidad del fuego. En la Tabla 1 se resumen los probables efectos de distintas temperaturas sobre diversos componentes del suelo según algunos de los trabajos referidos en esta revisión. Inversamente, los cambios verificados en los constituyentes del suelo podrían ser utilizados como indicadores indirectos de las temperaturas alcanzadas en el suelo.

En la Argentina, la información sobre los impactos de los incendios en los suelos es en general muy escasa y casi inexistente respecto a las consecuencias en sus propiedades físicas y en la mineralogía. La presente revisión permite tener un panorama actualizado de los resultados disponibles en la literatura internacional respecto a los efectos del fuego en los componentes inorgánicos y en la estructura de los suelos, y de los procesos a nivel del paisaje que de ello se derivan. El conocimiento de estos efectos es necesario para la toma de decisiones sobre manejo, restauración o prevención de zonas afectadas por el fuego. Al mismo tiempo, esta información muestra necesidades de investigación en el marco de los mayores riesgos planteados por los incendios de vegetación como consecuencia del cambio climático y de la deforestación acentuada por la expansión de las fronteras agropecuarias.

REFERENCIAS

- Agee, J. K. 1993. Fire ecology of Pacific Northwest forest. Island Press. Washington DC, USA.
- Are, K. S., G. A. Oluwatosin, O. D. Adeyolanu, and A. O. Oke. 2009. Slash and burn effect on soil quality of an Alfisol: Soil physical properties. *Soil and Tillage Research* **103**(1):4-10.
- Arocena, J. M., and C. Opio. 2003. Prescribed fire-induced changes in properties of sub-boreal forest soils. *Geoderma* **113**:1-16.
- Blake, W., G. I. Droppo, P. J. Wallbrink, S. H. Doerr, R. A. Shakesby, and G. S. Humphreys. 2007. Structural characteristics and behavior of fire-modified soil aggregates. *Geophysical Research* **112**:143-150.
- Cancelo-González, J., D. M. Prieto, F. Díaz-Fierros, and M. T. Barral. 2015. Lixiviación de Al y Fe en suelos sometidos a quemas controladas en laboratorio. *Spanish Journal of Soil Science* **5**(1):83-97.
- Certini, G. 2005. Effects of fire on properties of forest soils: a review. *Oecologia* **143**:1-10.
- Certini, G., and R. Scalenghe. 2006. Soil formation on Earth and beyond: the role of additional soil-forming factors. Pp. 193-221 in G. Certini and R. Scalenghe (eds.). *Soils: Basic concepts and future challenges*. Cambridge University

- Press, Cambridge, UK.
- Chenu, C., and D. Cosentino. 2011. Microbial regulation of soil structural dynamics. Pp. 37-70 in K. Ritz and I. Young (eds.). *The architecture and biology of soils. Life in inner space*. CAB International, Wallingford, UK.
- Churchman, G. J., W. P. Gates, B. K. Theng, and G. Yuan. 2006. Clays and clay minerals for pollution control. *Developments in Clay Science* 1:620-675.
- Cosentino, D., C. Chenu, and Y. Le Bissonnais. 2006. Aggregate stability and microbial community dynamics under drying-wetting cycles in a silt loam soil. *Soil Biology and Biochemistry* 38(8):2053-2062.
- Darboux, F., and B. Algayer. 2013. Crûtes de battance, ruissellement, érosion hydrique. Pp. 141-153 in D. Baize, G. Duval, and G. Richard (eds.). *Le sols et leurs structures. Observations à différentes échelles*. Éditions Quae, Versailles, Francia.
- DeBano, L. F., and C. E. Conrad. 1978. The effect of fire on nutrients in a chaparral ecosystem. *Ecology* 59:489-497.
- DeBano, L. F., D. Neary, and D. G. Ffolliott. 1998. *Fire's effects on ecosystems*. John Wiley and Sons, New York, New York, USA.
- DeBano, L. F. 2000. The role of fire and soil heating on water repellency in wildland environments: a review. *Journal of Hydrology* 231-232:195-206.
- DeBano, L. F., and D. Neary. 2005. The soil resource: its importance, characteristics, and general responses to fire. Pp. 21-28 in D. Neary, K. Ryan and L. DeBano (eds.). *Wildland fire in ecosystems; effects of fire on soils and water*. Gen. Tech. Rep., vol. 4. Forest Service, Rocky Mountain Research Station, U.S.D.A., USA.
- DeBano, L. F., D. Neary, and P. F. Ffolliott. 2005. Soil physical properties. Pp. 29-52 in D. Neary, K. Ryan and L. F. DeBano (eds.). *Wildland fire in ecosystems; effects of fire on soils and water*. Gen. Tech. Rep., vol. 4. Forest Service, Rocky Mountain Research Station, U.S.D.A., USA.
- Dexter, A. R. 1988. Advances in characterization of soil structure. *Soil and Tillage Research* 11:199-238.
- Díaz-Fierros, F., E. Benito Rueda, and R. Pérez Moreira. 1987. Evaluation of the U.S.L.E. for the prediction of erosion in burnt forest areas in Galicia (N.W. Spain). *Catena* 14:189-199.
- Farmer, V. 1978. Water on particle surfaces. Pp. 405-448 in D. Greenland and M. Hayeseds (eds.). *The chemistry of soil constituents*. John Wiley and Sons, Chichester, UK.
- Francos, M., A. Velasco, and X. Úbeda. 2014. Hidrofobicidad en suelos quemados a diferente intensidad. Efectos a largo plazo y ensayos de laboratorio. Pp. 188-191 in XIII Reunión Nacional de Geomorfología, Cáceres, España.
- García-Corona, R., E. Benito, and E. De Blas. 2003. Efectos del calentamiento sobre la agregación de los suelos. *Edafología* 10(3):175-180.
- Gedye, S. J., R. T. Jones, W. Tinner, B. Amman, and F. Oldfield. 2000. The use of mineral magnetism in the reconstruction of fire history: a case study from Lago di Origlio, Swiss Alps. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology* 164: 101-110.
- Gillis, J., and H. Fountain. 2016. Un nuevo clima aviva el fuego. Pp. 1-4 en *The New York Times International Weekly* (en colaboración con Clarín, Buenos Aires). Suplemento, sábado 21 de mayo 2016.
- Ginzburg, O., and Y. Steinberger. 2012. Effects of forest wildfire on soil microbial-community activity and chemical components on a temporal-seasonal scale. *Plant Soil* 360:243-257.
- Giovannini, G., S. Luchessi, and M. Giachetti. 1988. Effect of heating on some physical and chemical parameters related to soil aggregation and erodibility. *Soil Science* 146:255-262.
- Giovannini, G., S. Lucchesi, and M. Giachetti. 1990a. Beneficial and detrimental effects of heating on soil quality. Pp. 95-102 in J. C. Goldammer and M. J. Jenkins (eds.). *Fire and ecosystem dynamics mediterranean and northern perspectives*. SPB Academic Publishing, The Hague.
- Giovannini, G., S. Lucchesi, and M. Giachetti. 1990b. Effects of heating on some chemical parameters related to soil fertility and plant growth. *Soil Science* 149(6):344-350.
- Giovannini, G. 1994. The effect of fire on soil quality. Pp. 15-27 in M. Sala and J. Rubio (eds.). *Soil erosion and degradation as a consequence of forest fires*. Geoforma Ediciones, Logroño, España.
- Giovannini, G., and S. Luchessi. 1997. Modifications induced in soil physico-chemical parameters by experimental fires at different intensities. *Soil Science* 162 (7):479-486.
- Giovannini, G., R. Vallejo, S. Lucchesi, S. Bautista, S. Ciompi, and J. Llovet. 2001. Effects of land use and eventual fire on soil erodibility in dry Mediterranean conditions. *Forest Ecology and Management* 147(1):15-23.
- Gobat, J. M., and C. Le Bayon. 2013. Structure des sols et êtres vivants. Pages 39-64 in D. Baize, G. Duval and G. Richard (eds.). *Le sols et leurs structures. Observations à différentes échelles*. Éditions Quae, Versailles, Francia.
- González, C., A. Abril, and M. Acosta. 1999. Efectos del fuego sobre la fertilidad edáfica y las comunidades microbianas en el Chaco Occidental Argentino. *Ecología Austral* 9(1-2):3-10.
- González-Pérez, J., F. González-Vila, G. Almendros, and H. Knicker. 2004. The effect of fire on soil organic matter-a review. *Environment International* 30:855-870.
- Gordillo-Rivero, Á. J., J. García-Moreno, A. Jordán, and L. M. Zavala. 2013. Monitorización del impacto del fuego en la repelencia al agua y la estructura del suelo durante 6 años. *FLAMMA* 4 (2):71-75.
- Grasso, G. M., G. Ripabelli, M. L. Sammarco, and S. Mazzoleni. 1996. Effects of heating on the microbial populations of a grassland soil. *International Journal of Wildland Fire* 6(2):67-70.
- Guerrero, C., J. Mataix-Solera, J. Navarro-Pedreño, F. García-Orenes, and I. Gómez. 2001. Different patterns of aggregate stability in burned and restored soils. *Arid Land Research and Management* 15(2):163-171.

- Gutiérrez Elorza, M. 2001. Geomorfología climática. Ediciones Omega S.A., Barcelona, España.
- Hardesty, J., R. L. Myers, and W. Fulks. 2005. Fire, ecosystems, and people: a preliminary assessment of fire as a global conservation issue. *The George Wright Forum* 22:78-87.
- Hepper, E., A. Urioste, V. Belmonte, and D. Buschiazzo. 2008. Temperaturas de quema y propiedades físicas y químicas de suelos de la región semiárida pampeana central. *Ciencia del Suelo* 26(1):28-38.
- Huggett, R. J. 1995. *Geoecology. An Evolutionary Approach*. Routledge, London.
- Iglesias, T., V. Cala, and J. González. 1997. Mineralogical and chemical modifications in soils affected by a forest fire in the Mediterranean area. *The Science of the Total Environment* 204 (1):89-96.
- Iglesias López, T., Fernández Bermejo, and J. González Parra. 1998. Modificaciones en algunas características del suelo a causa del fuego. *Cuaternario y Geomorfología* 12(3-4):41-47.
- IPCC. 2014. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Barros, V. R., C. B. Field, D. J. Dokken, M. D. Mastrandrea, K. J. Mach, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, B. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea, and L. L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Pp. 688.
- Irurtia, C., and J. Luna. 1988. Sistemas y equipos de desmonte. Pp. 102-128 en R. Casas (ed.). *Desmonte y habilitación de tierras en la Región Chaqueña Semiárida*. Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe, Santiago, Chile.
- Kay, B. 1990. Rates of change of soil structure under different cropping systems. *Adv Soil Science* 12:1-52.
- Kay, B., and D. Angers. 2001. Soil Structure. Pp. 229-276 in M. E. Sumner (ed.). *Handbook of Soil Science* CRC Press, Boca Raton, Florida, USA.
- Keeley J. E. 2009. Fire intensity, fire severity and burn severity: a brief review and suggested usage. *International Journal of Wildland Fire* 18:116-126.
- Ketterings, Q. M., J. M. Bigham, and V. Laperche. 2000. Changes in soil mineralogy and texture caused by slash and burn fire in Sumatra, Indonesia. *Soil Science Society of America Journal* 64:1108-1117.
- Knicker, H. 2007. How does fire affect the nature and stability of soil organic nitrogen and carbon? A review. *Biogeochemistry* 85(1):91-118.
- Knoepp, J., L. F. DeBano, and D. Neary. 2005. Soil Chemistry. Pp. 53-72 in D. Neary, K. Ryan and L. F. DeBano (eds.). *Wildland fire in ecosystems; effects of fire on soils and water*. Gen Tech Rep vol. 4. Forest Service, Rocky Mountain Research Station, U.S.D.A., USA.
- Kunst, C., and S. Bravo. 2003. Fuego, calor y temperatura. Páginas 39-45 en C. Kunst, S. Bravo and J. Panigatti (eds.). *Fuego en los ecosistemas argentinos*. Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina.
- Kunst, C. 2011. Ecología y uso del fuego en la región chaqueña argentina: una revisión. *Boletín del CIDEU* 10, 81-105. ISSN 1885-5237.
- La Manna, L., and A. Navas. 2012. Susceptibilidad magnética y caracterización geoquímica de suelos de la región andino patagónica. *Actas XIX Congreso Latinoamericano y XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*, 1a edición. Edición de 1100 CDrom. Resumen N° 0360.
- Lázzari, M. A. 2005. Efectos del Fuego Sobre el Suelo. *Revista Agro UNS*. Edit. UNS. Año II 3:17-20.
- Liegel, L. H. 1986. Effects of sterilization procedures on the biological, chemical and physical properties of soils: a review. *Turrialba (IICA)* 36(1):11-19.
- Lombao, A., A. Barreiro, J. Cancelo-González, Á. Martín, and M. Díaz-Raviña. 2015. Impacto de choques térmicos sobre suelos forestales afectados por incendios de diferente severidad y recurrencia. *Spanish Journal of Soil Science* 5(2):165-179.
- Maher, B. A. 1986. Characterisation of soils by mineral magnetic measurements. *Physics of Earth and Planetary Interiors* 42:76-92.
- Mataix-Solera, J., and C. Guerrero. 2007. Efectos de los incendios forestales en las propiedades edáficas. Pp. 5-40 en J. Mataix-Solera (ed.). *Incendios forestales, suelos y erosión hídrica*. Caja Mediterráneo, CEMACAM Font RojaAlcoi, Alicante, España.
- Mataix-Solera, J., C. Guerrero, V. Arcenegui, G. Bárcenas, R. Zornoza. 2008. Los incendios forestales y el suelo: un resumen de la investigación realizada por el Grupo de Edafología Ambiental de la UMH en colaboración con otros grupos. Pp. 185-217 en A. Cerdà and J. M. Solera (eds.). *Efectos de los incendios forestales sobre los suelos en España*. El estado de la cuestión visto por los científicos españoles, Chapter: 3.4, Publisher: Cátedra de Divulgació de la Ciència. Universitat de Valencia, España.
- Mataix-Solera, J., C. Guerrero, F. García-Orenes, G. M. Bárcenas, and M. P. Torres. 2009. Fire effects on soil microbiology. Pp. 133-175 in A. Cerdà and P. R. Robichaud (eds.). *Fire Effects on Soils and Restoration Strategies*. Science Publishers, Inc. Enfield, New Hampshire, USA.
- Mataix-Solera, J., A. Cerdà, V. Arcenegui, A. Jordán, and L. Zavala. 2011. Fire effects on soils aggregation: A review. *Earth-Science Reviews* 109:44-60.
- Minervini, M. G. 2017. Propiedades morfológicas, físicas y mineralógicas, y emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en suelos incendiados de humedal y de yungas. Tesis presentada para optar al título de Doctor de la Universidad de Buenos Aires, Área Ciencias Agropecuarias, Facultad de Agronomía-UBA. Defendida el 6 de junio de 2017.
- Minervini, M. G., H. J. Morrás, and M. A. Taboada. 2014. Efectos del fuego en la selva pedemontana de las yungas jujeñas. Resúmenes XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo II Reunión Nacional "Materia Orgánica y

- Sustancias Húmicas". Bahía Blanca, Argentina.
- Minervini, M. G., H. J. Morrás, and M. A. Taboada. 2015. Susceptibilidad magnética como posible marcador de los efectos del fuego en suelos de la selva pedemontana de las Yungas Jujefías. Libro de Resúmenes. VI Congreso Argentino de Cuaternario y Geomorfología 124.
- Minervini, M. G., H. J. Morrás, and M. A. Taboada. 2017a. Efectos de los incendios en la microorganización de un suelo de la selva pedemontana de la Yunga, Jujuy, Argentina. Pp. 29-31 en Actas XX Congreso Geológico Argentino, Sección Técnica 3, Geomorfología y Suelos, San Miguel de Tucumán, Argentina.
- Minervini, M. G., H. J. Morrás, and M. A. Taboada. 2017b. Impacto del fuego en la granulometría y mineralogía de un suelo en la selva pedemontana de la Yunga, Jujuy, Argentina. Pp. 70-72 en Actas XX Congreso Geológico Argentino, Simposio 14, Pedogénesis y cartografía de suelos como herramientas para la planificación sustentable, San Miguel de Tucumán, Argentina.
- Morrás, H. 2015. Porosidad y microestructura de suelos. Pp. 205-260 en J. Loaiza, G. Stoops, R. Poch and M. Casamitjana (eds.). Manual de micromorfología de suelos y técnicas complementarias. Editorial Pascual Bravo, Medellín, Colombia.
- Morrás, H. 2016. Meteorización y pedogénesis. Pp. 47-83 en F. Pereyra and M. Torres Duggan (eds.). Suelos y geología Argentina. Una visión integradora desde diferentes campos disciplinarios. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo - Asociación Geológica Argentina, Buenos Aires, UNDAV Ediciones, Avellaneda, Argentina.
- Mullins, C. E. 1977. Magnetic Susceptibility of the soil and its significance in soil science. A review. *Journal of Soil Science* 28:223-246.
- Neary, D. G., C. C. Klopatek, L. F. DeBano, and P. F. Folliott. 1999. Fire effects on belowground sustainability: a review and synthesis. *Forest Ecology and Management* 122:51-71.
- Neary, D., K. Ryan, and L. F. DeBano. 2005a. Wildland fire in ecosystems; effects of fire on soils and water. Gen Tech Rep, vol. 4. Forest Service, Rocky Mountain Research Station. U.S.D.A., USA.
- Neary, D., P. Folliott, and J. Landsberg. 2005b. Fire and streamflow regimes. Pp. 107-117 in D. Neary, K. Ryan and L. F. DeBano (eds.). Wildland fire in ecosystems; effects of fire on soils and water. Gen Tech Rep, vol. 4. Forest Service, Rocky Mountain Research Station, U.S.D.A., USA.
- Neary, D., J. Landsberg, A. Tiedemeann, and P. F. Folliott. 2005c. Water quality. Pp. 119-134 in D. Neary, K. Ryan and L. F. DeBano (eds.). Wildland fire in ecosystems; effects of fire on soils and water. Gen Tech Rep, vol. 4. Forest Service, Rocky Mountain Research Station, U.S.D.A., USA.
- Neary, D., K. Ryan, L. F. DeBano, J. Landsberg, and J. Brown. 2005d. Introduction. Pp. 1-20 in D. Neary, K. Ryan, and L. F. DeBano (eds.). Wildland fire in ecosystems; effects of fire on soils and water. Gen Tech Rep, vol. 4. Forest Service, Rocky Mountain Research Station, U.S.D.A., USA.
- Novas, F. 2006. Buenos Aires, un millón de años atrás. Siglo Veintiuno Editores, Serie Mayor. Buenos Aires, Argentina.
- Oldfield, F., and J. Crowther. 2007. Establishing fire incidence in temperate soils using magnetic measurements. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 249:362-369.
- Pausas, J. 2004. Changes in fire and climate in the eastern Iberian Peninsula (Mediterranean basin). *Clim Change* 63: 337-350.
- Robert, M. 1975. Principes de détermination qualitative des minéraux argileux aux rayons X. *Ann Agronomy* 26(4): 363-399.
- Robert, M. 1977. Quelques exemples d'utilisation de l'analyse thermique en minéralogie. CNRS-Service de l'Enseignement des Techniques Avancées de la Recherche, Paris, Francia.
- Rooksby, H. P. 1961. Oxides and hydroxides of aluminium and iron. Pp. 354-392 in G. Brown (ed.). *The X-ray Identification and Crystal Structures of Clay Minerals*. Mineralogical Society, London.
- Rummery, T. 1983. The use of magnetic measurements in the interpretation of fire histories of lake drainage basins. *Hydrobiologia* 103:45-51.
- Ryan, K., and W. Elliot. 2005. Fire effects and soil erosion models. Pp. 171-178 in D. Neary, K. Ryan and L. F. DeBano (eds.). Wildland fire in ecosystems; effects of fire on soils and water. Gen Tech Rep, vol. 4. U.S.D.A., Forest Service, Rocky Mountain Research Station.
- Sacchi, G., P. Campitelli, P. Soria, and S. Ceppi. 2015. Influencia de temperaturas de calentamiento sobre propiedades físicas y químicas de suelos con distinto material parental y uso antrópico. *Spanish Journal of Soil Science* 5(3):82-97.
- Sala, M., and J. L. Rubio. 1994. Soil erosion and degradation as a consequence of forest fires. Pp. 275 in International conference on soil erosion and degradation as a consequence of forest fires (1991) Geofoma Ediciones, Logroño, Barcelona/Valencia, España.
- Schaetzl, R., and M. Thompson. 2015. *Soils. Genesis and Geomorphology*. Second Edition, Cambridge University Press, New York, New York, USA.
- Schmidt, M. W., J. O. Skjemstad, E. Gehrt, and I. Kögel Knabner. 1999. Charred organic carbon in German chernozemic soils. *European Journal of Soil Science* 50(2):351-365.
- Schwertmann, U., and R. Taylor. 1989. Iron oxides. Pp. 379-465 in J. Dixon and S. Weed. *Minerals in Soil Environments* (eds.). Soil Science Society of America Books Series, Second edition, Madison, USA.
- Sertsu, S. M., and P. A. Sánchez. 1978. Effects of heating on some changes in soil properties in relation to an Ethiopian

- land management practice. *Soil Science Society of America Journal* **42**(6):940-944.
- Shakesby, R. A., and S. H. Doerr. 2006. Wildfire as a hydrological and geomorphological agent. *Earth-Science Reviews* **74**:269-307.
- Silvestrini, R. A., B. S. Soares-Filho, D. Nepstad, M. Coe, H. Rodrigues, and R. Assunção. 2011. Simulating fire regimes in the Amazon in response to climate change and deforestation. *Ecological Applications* **21**:1573-1590.
- Six, J., H. Bossuyt, S. Degryze, and K. Denef. 2004. Review: A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and Tillage Research* **79**:7-31.
- Tálamo, A., B. Bermúdez, L. Garibaldi, and A. Chávez. 2016. Erosión y escorrentía en respuesta a lluvias simuladas e incendios en bosques secos de montaña. *Cienc Suelo* **34**(1):105-111.
- Thompson, R., and F. Oldfield. 1986. *Environmental magnetism*. Allen and Unwin, London., UK.
- Torrent, J., R. Guzman, and M. Parra. 1982. Influence of relative humidity on the crystallisations of Fe(III) oxides from ferrihydrite. *Clays and Clay Minerals* **30**(5):337-340.
- Ulery, A. L., and R. C. Graham. 1993. Forest Fire Effects on Soil Color and Texture. *Soil Science Society of America Journal - Abstract* **57**(1):135-140.
- Ulery, A. L., R. C. Graham, and L. H. Bowen. 1996. Forest fire effects on soil phyllosilicates in California. *Soil Science Society of America Journal* **60**(1):309-315.
- Velde, P., and P. Barré. 2010. *Soils, plants and clay minerals: mineral and biologic interactions*. Springer Science and Business Media, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.