



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

**La severidad del fuego como factor control
de la regeneración edáfica: una revisión
bibliográfica**

**Fire severity as key factor in soil
regeneration: a bibliographic review**

Autor
Javier Franco García

Directora
Dª María Teresa Echeverría Arnedo

Grado en Geografía y Ordenación del Territorio
Facultad de Filosofía y Letras
Universidad de Zaragoza

Curso 2016/2017

Resumen

Los incendios forestales constituyen uno de los factores de modelado del medio natural más importantes en el ámbito mediterráneo. Uno de los conceptos clave en el estudio de la afección que éstos tienen sobre los ecosistemas es la severidad del fuego. El propósito de este trabajo es comprender el significado actual del concepto de severidad mediante el estudio de la evolución del mismo; así como analizar el efecto de la severidad sobre los diferentes componentes del suelo, a través de la bibliografía existente. Como resultado, se evalúa el comportamiento hidrogeomorfológico de los suelos tras el fuego en función de su severidad, examinando posibles alteraciones en infiltración, escorrentía, erosión y, por tanto, en la regeneración ambiental de los suelos.

Palabras clave: incendios, severidad, suelos, infiltración, escorrentía, erosión.

Abstract

Wildland fires are one of the most relevant factors in shaping ecosystems in the Mediterranean Basin. A key concept in the study about how fire affects environment, is fire severity. The purpose of this research is to assess severity's real meaning through studying the evolution of the concept. Moreover, by means of the existing bibliography, the effect of severity on soils and its components will be studied. As a result, soils' hydrogeomorphological behaviour after a fire will be evaluated by addressing changes in infiltration, runoff, erosion, and soil's regeneration indeed.

Key words: wildfires, severity, soils, infiltration, runoff, erosion.

Índice

1. Introducción. Estado de la cuestión.....	4
2. Justificación del trabajo	9
3. Objetivos	10
4. Metodología.....	11
5. Evolución del concepto de Severidad	12
6. Cómo afecta la severidad del fuego al suelo	17
6.1. Hidrofobicidad.....	19
6.2. Materia orgánica del suelo	23
6.3. Estabilidad de los agregados	24
6.4. Porosidad y enconstramiento	26
6.5. PH	28
7. Comportamiento hidrogeomorfológico del suelo en función de la severidad del fuego	29
8. Conclusiones	34
9. Bibliografía	36
9.1. Bibliografía referenciada en el texto	36
9.2. Bibliografía consultada	41

Índice de figuras y tablas

Figura 1. Evolución del número de incendios en España. Elaboración propia a partir de datos del Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (mapama.gob.es). Página 6.

Figura 2. Evolución de las Ha quemadas por año en España. Elaboración propia a partir de datos del Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (mapama.gob.es). Página 6.

Figura 3. Evolución del número de GIF en España. Elaboración propia a partir de datos del Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (mapama.gob.es). Página 7.

Figura 4. Gran Incendio Forestal de Luna (Julio de 2015). Fuente: Heraldo de Aragón. Página 8.

Figura 5. Factores implicados en el calentamiento del suelo durante un incendio forestal (Mataix-Solera y Guerrero, 2007). Página 17.

Figura 6. Distribución de la ceniza en una zona quemada (Moody et al., 2013). Página 18.

Figura 7. Cenizas de diferentes colores, ordenadas por su procedencia y la temperatura a la que han sido obtenidas (Bodí et al. 2013). Página 19.

Figura 8. Principales fuentes de sustancias hidrofóbicas en el suelo (Varela y Benito, 2013). Página 20.

Figura 9. Esquema del efecto de la severidad del incendio en la respuesta hidrológica de un suelo muy repelente al agua (Varela y Benito, 2013, a partir de Doerr et al., 2006). Página 23.

Figura 10. Tres diferentes patrones en los cambios en la estabilidad de los agregados en relación con la severidad del fuego (adaptado de Mataix-Solera et al., 2011). Página 25.

Tabla 1. Matriz propuesta por Keeley para la medición de la severidad. Adaptado de Keeley (2009). Página 14.

Tabla 2. Síntesis del comportamiento hidrogeomorfológico del suelo en función de la severidad. Elaboración propia. Páginas 31 y 32.

1. Introducción. Estado de la cuestión.

El fuego, en la cuenca mediterránea, ha sido un importante agente de modelado del paisaje y de los ecosistemas a lo largo de toda la historia (Pereira *et al.*, 2010). De hecho, es considerado por numerosos autores como un factor necesario para el correcto funcionamiento de los ecosistemas presentes en los bosques mediterráneos (Bodí, *et al.*, 2012a).

El ser humano ha utilizado el fuego como un recurso para distintos usos económicos. Es precisamente este uso que el hombre le ha dado al fuego (y al medio natural, en general), el que ha generado cambios y variaciones en los regímenes de incendios desde la aparición del hombre (Pausas, 2011).

Sin ir más lejos, los incendios controlados han sido utilizados por los científicos como una fuente de datos y de estudio a lo largo de los años, llegando a la conclusión de que éstos pueden llegar a suponer un crecimiento positivo de los elementos esenciales y beneficiosos para el desarrollo vegetal (Pereira, *et al.*, 2010).

En el ámbito Mediterráneo, se ha producido un gran cambio en el régimen de incendios en las últimas décadas, partiendo de un régimen marcado por el combustible limitado hacia uno marcado por los períodos secos. El motivo de este cambio es el profundo abandono rural y su consecuente abandono de cultivos, cambios de uso en la madera y cambios en las condiciones del combustible para los incendios (Pausas, 2011).

Tomando España como territorio de ámbito mediterráneo de muestra, observamos este cambio en el régimen de incendios, a partir del análisis de los datos del número total de incendios en el último medio siglo en el ámbito mediterráneo (Figura 1), así como de la superficie quemada (Figura 2) y del número de Grandes Incendios Forestales (GIF, aquellos que afectan a más de 500 Ha) (Figura 3). Todos los datos que se aportan a continuación han sido extraídos de los informes anuales sobre incendios forestales en España, elaborados por el equipo de estadísticas del Área de Defensa contra Incendios Forestales del Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente. Los datos contemplan la serie histórica completa, desde el primer informe del año 1961 hasta el último avance informativo de las estadísticas del año 2016.

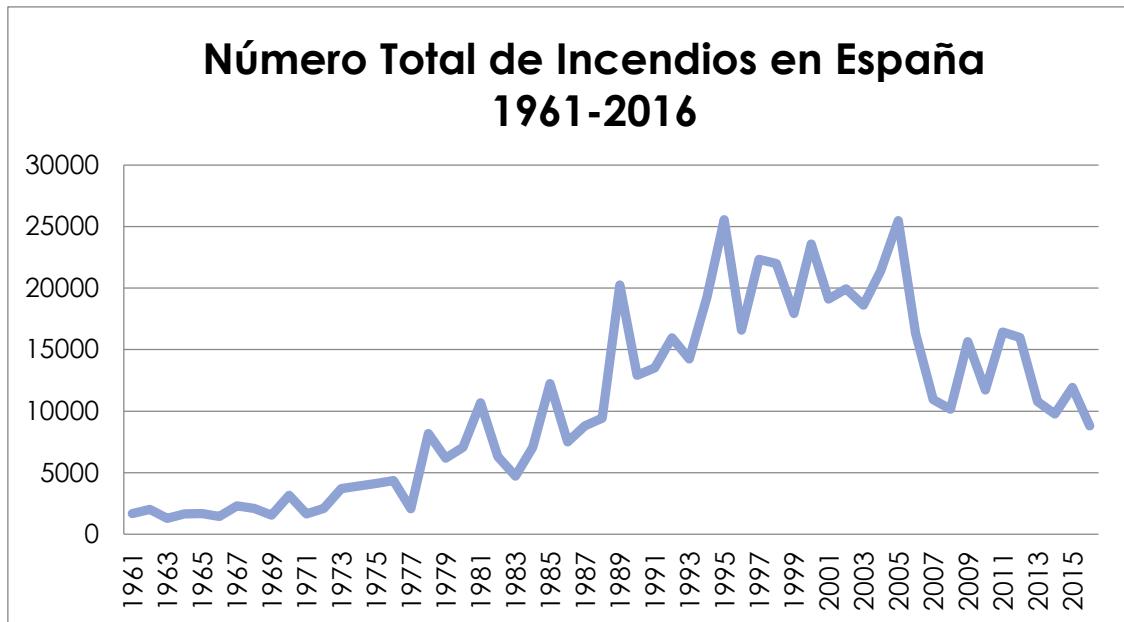


Figura 1. Evolución del número de incendios en España. Elaboración propia.

Observando la evolución del dato del número total de incendios declarados en España, observamos una tendencia claramente ascendente desde los años 70 del siglo XX hasta la primera década del siglo XXI, cuando la cifra total de incendios parece estabilizarse o incluso retroceder. Los cambios en los usos del suelo (replantaciones forestales y abandono de cultivos) son las principales causas del aumento del número de incendios a partir de los años 70 (Pausas, 2011).

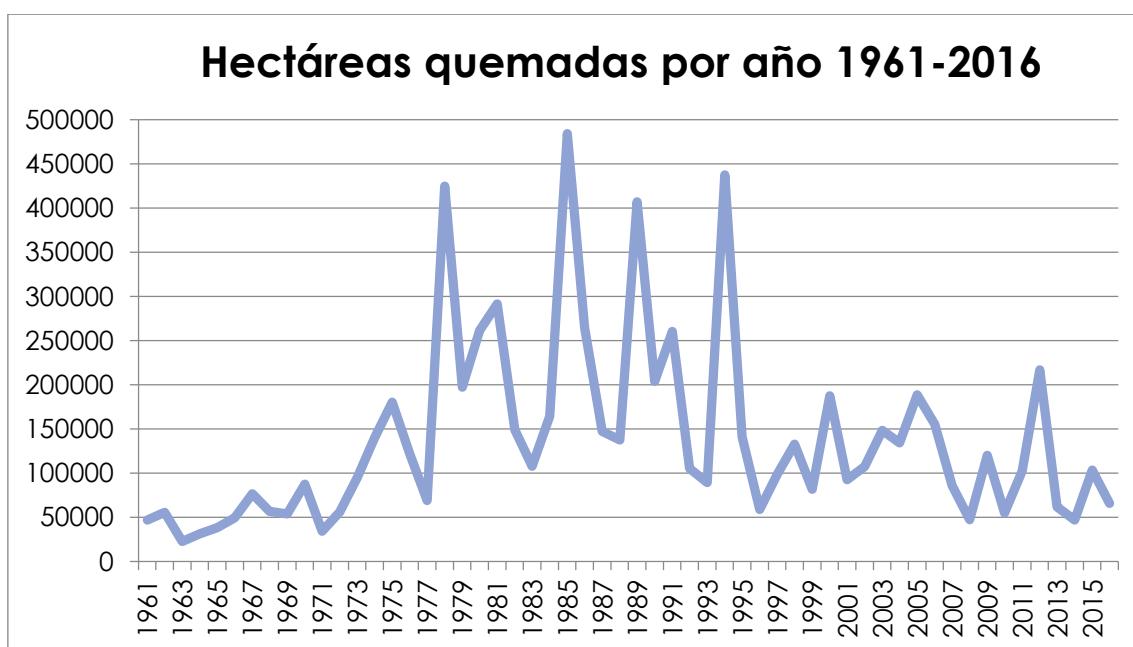


Figura 2. Evolución de las Ha quemadas por año en España. Elaboración propia.

La tendencia ascendente del número de incendios, sin embargo, no se traduce en una línea igualmente creciente en el número de hectáreas quemadas. Esta cifra sufre un importante aumento (con altibajos) en los años 70, 80 y principios de los 90; pero retrocede casi hasta los niveles previos con la llegada del siglo XXI.

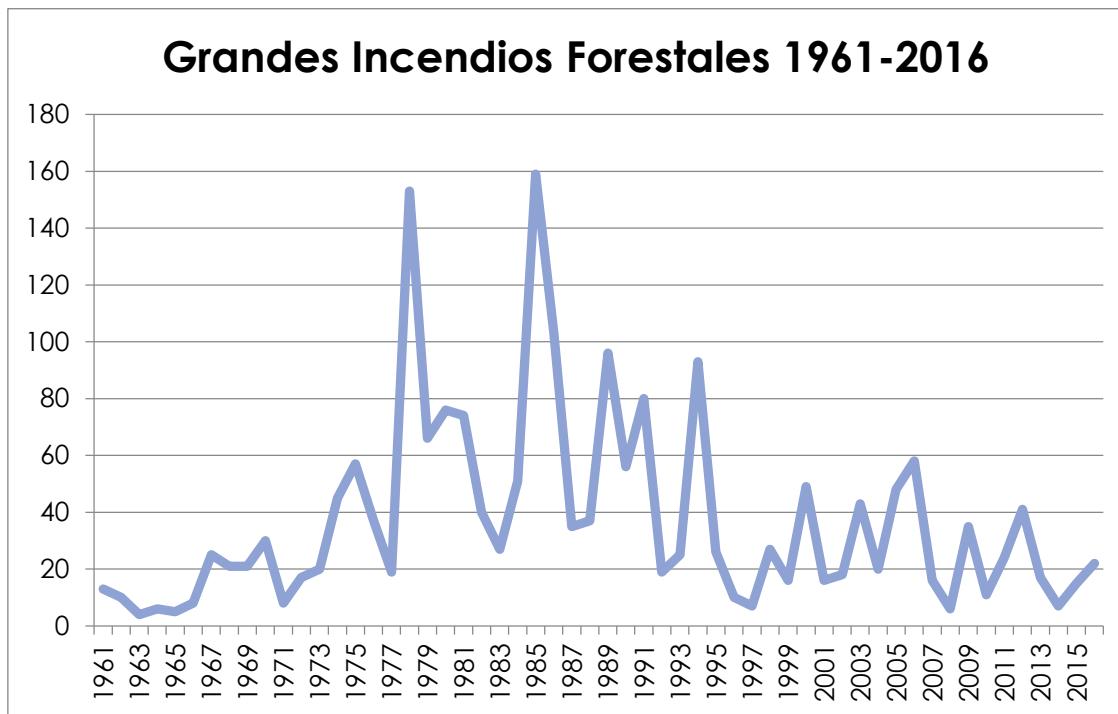


Figura 3. Evolución del número de GIF en España. Elaboración propia.

En esta tercera gráfica, la línea trazada describe una trayectoria muy similar a la anterior (Figura 2), produciéndose un incremento destacado del número de GIF en los años 70, 80 y 90; y retrocediendo la cifra con la entrada del nuevo siglo.

Para un buen número de expertos, estos datos refrendan un cambio en el régimen de incendios, motivado, en buena parte debido al cambio global en los usos del suelo (Pausas, 2011).

Por todo ello, el estudio de los efectos del fuego sobre los ecosistemas mediterráneos es ahora más importante si cabe.

El fuego, pues, causa efectos en numerosos elementos del ecosistema (suelos, vegetación, etc.), y el grado de cambio que éste produce sobre el medio está condicionado por diversos factores, así como por las características particulares del incendio y del fuego en sí.



Figura 4. Gran Incendio Forestal de Luna (Julio de 2015). Fuente: Heraldo de Aragón.

Uno de los factores que la bibliografía señala como clave para conocer la respuesta del medio al fuego es la severidad (Doerr, et al., 2006; Vega, et. al., 2008; Woods y Balfour, 2010; Kinner y Moody, 2010). Sin embargo, los distintos autores utilizan el término de forma dispar, en cuanto al significado del mismo, así como en cuanto al signo de las consecuencias de un grado de severidad u otro sobre los ecosistemas afectados por el fuego.

Por tanto, es necesario esclarecer, en primer lugar, qué es la severidad y porqué ha habido una cierta confusión o evolución del concepto en la bibliografía. Para ello, se ha realizado una síntesis de la evolución del término en las distintas publicaciones a lo largo de los años.

En segundo lugar, es igualmente necesario conocer cómo la severidad en un incendio modifica los distintos elementos del medio natural, tanto de manera directa, como indirecta. De forma directa, la severidad del fuego tiene afección sobre la vegetación, las características físico-químicas de los suelos afectados, la fauna, etc. Indirectamente puede modificar los distintos procesos hidrogeomorfológicos y bioedáficos, que pueden desencadenar problemas ambientales como el aumento de la erosión o el desarrollo de especies pirófitas.

Por consiguiente, en el presente documento se exponen los efectos que la severidad provoca sobre estos elementos mencionados con anterioridad, tratando de identificar el signo de los mismos.

2. Justificación del trabajo

El presente trabajo se caracteriza por su marcado corte bibliográfico. En concreto, se trata de una revisión bibliográfica crítica de las publicaciones científicas que describen, analizan o evalúan la severidad del fuego, sus efectos sobre el medio natural y, particularmente, sobre los suelos de las áreas quemadas.

Hasta el momento, la comunidad científica no ha alcanzado un consenso acerca de aquello que rodea al concepto de severidad: desde la propia definición de severidad y el adecuado uso del término, hasta su influencia sobre los distintos elementos que componen un ecosistema.

Precisamente por esto último, es necesario continuar trabajando sobre estos aspectos, en orden de alcanzar algún tipo de acuerdo en torno al tema en cuestión.

Si bien la gran mayoría de estas investigaciones debieran ser principalmente experimentales, con una mayor presencia de trabajo de campo que proporcione datos reales de los procesos que tienen lugar en el medio tras un incendio; trabajos bibliográficos, como el que se ha desarrollado en este caso, siempre tienen su razón de ser dentro del sujeto de estudio en cuestión.

De hecho, uno de los principales roles que debe jugar este tipo de trabajos es el de “cementante” o “aglutinante” de la información proporcionada por los estudios previos, con el objetivo de sintetizarla y sentar las bases de nuevas investigaciones a partir de las conclusiones obtenidas de la revisión crítica de la bibliografía.

3. Objetivos

El principal objetivo del presente trabajo es la realización de una **revisión bibliográfica del concepto severidad**, sus diferentes significados y el uso actual del término por parte de la comunidad científica. A lo largo de esta revisión, se abordan otros objetivos, tales como:

- ⇒ Comentar las variables y procesos ambientales afectados por la severidad del fuego.
- ⇒ Precisar las consecuencias del grado de severidad en las alteraciones edáficas.
- ⇒ Evaluar el comportamiento hidrogeomorfológico postfuego en función de la severidad del incendio.
- ⇒ Definir la relación entre grado de severidad y erosión postfuego y, por lo tanto, el papel de la severidad del incendio en relación con la regeneración del territorio quemado.

4. Metodología

El presente Trabajo Fin de Grado, enmarcado dentro de la modalidad de Trabajo Académico Específico, ha seguido un proceso metodológico basado en una revisión bibliográfica actualizada.

Tras la definición de los objetivos del trabajo, el proceso comienza con una **primera aproximación a la bibliografía sobre los incendios forestales y su severidad**.

En esa primera aproximación, nos servimos de bibliografía relativa a trabajos realizados en el departamento de Geografía y Ordenación del Territorio. Asimismo, se obtienen una gran cantidad de artículos científicos, publicados en distintas revistas, a partir de la búsqueda por palabra clave o autor en herramientas de búsqueda digitales como Google Scholar, World Wide Science, SciELO o Dialnet.

De forma simultánea a la búsqueda bibliográfica, se esboza un **primer esquema de trabajo**, en el que se desglosan con carácter preliminar, aquellos epígrafes a desarrollar.

Para agilizar el procesamiento de la información contenida en los artículos, y, en relación con el esquema propuesto; se realizan **fichas** donde se recogen aportaciones relacionadas con el esquema señalado, así como material gráfico y bibliográfico.

Una vez se ha adquirido cierto conocimiento básico sobre la materia, se procede a la **precisión del esquema inicial** y a la elaboración de los distintos apartados que integran el documento, siendo este proceso supervisado de forma continua, dando lugar a un documento dinámico, tanto en la forma, como en sus contenidos.

Recordando el carácter bibliográfico del trabajo, los **resultados y la discusión** del mismo se organizan en torno a dos epígrafes fundamentales: cómo afecta la severidad del fuego al suelo y comportamiento hidrogeomorfológico del suelo en función de la severidad del suelo.

5. Evolución del concepto de Severidad

El concepto de severidad irrumpió con fuerza en la literatura de fuegos en los años 80, encaminado a explicar el vacío de cómo la diferente intensidad de los incendios afectaba a los ecosistemas (Keeley, 2009).

Hasta entonces, la intensidad del fuego y sus diferentes posibilidades de medición, eran lo más estudiado en este tipo de artículos (**Van Wagner, 1973**). Sin embargo, ya en los años 70, algunos autores comienzan a señalar la ineeficacia de la intensidad como indicador de la regeneración post-fuego (**Lyon y Stickney, 1976**). La intensidad es considerada desde este momento como una característica puramente física y cuantitativa del fuego, lo que la convierte en medible a partir de diversas fórmulas.

En **1985, Ryan y Noste**, definen la severidad como el efecto del fuego sobre el ecosistema y desarrollan un índice que trata de explicar el cambio en el medio natural. Este índice, posteriormente revisado por otros autores, integra las condiciones pre-fuego, el comportamiento del fuego y los efectos del mismo.

Durante los años 90, se suceden las investigaciones en las que se define la severidad como la magnitud del cambio producido en el ecosistema. Éstas, tratan de diseñar parámetros para conseguir medir la severidad, centrándose en la pérdida de materia orgánica (Keeley, 2009).

Ya en el siglo XXI, autores del peso científico de **Doërr (2006)**, se reafirman en la idea de la severidad como una característica que explica el grado de materia orgánica y de vegetación destruida en el incendio.

Sin embargo, el concepto sigue teniendo un uso confuso en los distintos artículos científicos. Por esta razón, en los últimos años, se han publicado varios artículos que tratan de aclarar el significado real del concepto y diferenciarlo de intensidad.

Destaca la aparición de dos conceptos asociados a la severidad en el **Glossary of Wildland Fire Terminology (2006)** elaborado por el National Wildfire Coordinating Group estadounidense. En este glosario, la severidad del incendio (*burn severity*) es definida como la evaluación del pulso de calor que se emite hacia el suelo durante el incendio. En cambio, la severidad del fuego (*fire severity*), es considerada como el

grado de alteración del ecosistema provocado por el fuego, siendo posible una cuantificación a partir del producto de la intensidad del fuego y la duración del mismo.

Otro ejemplo es el de **Lentille (2006)**, que, tras señalar la existente confusión conceptual, se refiere a la severidad del fuego (*fire severity*) como la afección más inmediata tras el incendio, abarcando aspectos como la vegetación consumida o la alteración del suelo. Además, añaden que el término severidad del incendio (*burn severity*) está referido al tiempo que tarda el ecosistema en recuperar las condiciones pre-fuego.

Siguiendo esta línea marcada por Lentille, **Kasischke (2007)** relaciona, a través de una fórmula, los conceptos de severidad del incendio (*burn severity*), siendo ésta una función de las condiciones previas al incendio y de la severidad del fuego (*fire severity*):

$$\text{Burn Severity} = f(\text{Pre-Fire Environment} + \text{Fire Severity})$$

En **2009**, **Keeley** (University of California) publica un artículo titulado *Fire intensity, fire severity and burn severity: a brief review and suggested usage*, en el que realiza una revisión de cómo se han utilizado los términos *intensidad* y *severidad* para intentar acabar con la confusión existente y proponer un uso definitivo. En él, Keeley, concibe la severidad del fuego como un concepto nacido a partir de la necesidad de describir cómo la intensidad afecta a los ecosistemas, y propone una matriz (Tabla 1) para medir las diferentes severidades a partir de la propuesta por Ryan y Noste en (1985):

Severidad del fuego	Descripción
No quemado	Sin efecto directo del calor, las plantas permanecen verdes e inalteradas.
Chamuscado	No quemado, pero las plantas muestran pérdida de hojas debido al calor radiado.
Ligeramente quemado	<p>Los árboles mantienen sus hojas verdes, aunque parecen chamuscadas.</p> <p>Musgo, hierbas y restos; quemados o consumidos.</p> <p>Materia orgánica del suelo prácticamente intacta, aunque afectada en superficie.</p>
Incendio superficial moderado o severo	<p>Árboles muestran pérdida de follaje, aunque las hojas no se han consumido por completo.</p> <p>Sotobosque quemado o consumido.</p> <p>Restos arbóreos del suelo, quemados y consumidos.</p> <p>Capa orgánica del suelo previa al fuego, consumida en mayor parte.</p>
Quemado profundo o incendio de copas	<p>Árboles muertos y sus hojas consumidas.</p> <p>Compuestos orgánicos superficiales consumidos.</p> <p>Deposición de cenizas blancas en capas de considerable profundidad.</p>

Tabla 1. Matriz propuesta por Keeley para la medición de la severidad. Adaptado de Keeley (2009).

Define, por tanto, la severidad del fuego como la pérdida o descomposición de materia orgánica, tanto sobre el suelo como por debajo de la superficie. Asimismo, reflexiona acerca del término severidad del incendio (*burn severity*), que ha sido usado de forma indistinta junto al término severidad del fuego (*fire severity*). Esta confusión no supone un gran problema excepto en el caso de que éste término se use específicamente para incluir la severidad del fuego y la respuesta de los ecosistemas. Para finalizar, recomienda separar las mediciones de la severidad de las de la respuesta del ecosistema (Keeley, 2009).

Esta revisión realizada por Keeley tiene gran importancia, pues su clasificación (sus definiciones también, pero en menor medida) es utilizada como referencia en muchos estudios posteriores (Mataix-Solera, *et al.*, 2011; Bodí, *et al.*, 2012a; Jiménez-Pinilla *et al.*, 2016).

Otro elemento a tener en cuenta en los estudios referidos a la severidad del fuego es la aparición de la teledetección como una herramienta útil para el estudio de áreas quemadas. Mediante índices como el dNBR (*delta Normalized Burn Ratio*), es posible medir la cantidad de vegetación y materia orgánica consumida por el fuego y el cambio de situación en la cantidad de suelo desnudo existente (**Moody y Martin, 2009**). El resultado de este índice es tomado como una propia medida de severidad en algunas ocasiones.

Lo que sí parece claro en este punto, es el hecho de que la severidad ya es considerada como un factor de primer orden en el comportamiento de los ecosistemas afectados por los incendios (**Kinner y Moody, 2010; Pereira, et al., 2010; Woods y Balfour, 2010**).

En estudios recientes, particularmente en los desarrollados en el ámbito de la Península Ibérica, se define la severidad como el grado de impacto del fuego sobre el ecosistema, sin diferenciar entre severidad del fuego y del incendio, y apoyándose en la base de la clasificación de Keeley para otorgar valores de severidad a los incendios (**Bodí, et al., 2012a; Bento-Gonçalves, et al., 2012**). **Pereira et al. (2012)** añaden que la severidad es el indicador idóneo para describir la recuperación paisajística, así como el riesgo de erosión del entorno. Ésta va a depender de las complejas interacciones entre numerosos elementos del medio: geomorfología, pendiente, cantidad de combustible disponible, etc. (Pereira, *et al.*, 2012). Siguiendo la misma línea, **FUEGORED** (Red temática nacional “Efectos de los incendios forestales sobre los Suelos”), define, en algunas de sus fichas técnicas del año 2013, la severidad como el grado de afectación, referido al suelo, la vegetación o al ecosistema en general; o como la magnitud del cambio ecológico causado por el fuego. También señala la relación de la severidad del fuego con la intensidad, así como con otros factores y condiciones pre-fuego (**Lozano y Jiménez-Pinilla, 2013; Montorio y Pérez-Cabello, 2013**).

En 2013, cuatro autores de referencia en el análisis de los incendios forestales (**Moody, Shakesby, Robichaud y Martin**), firman un artículo en el que profundizan en el concepto de severidad y en sus efectos. Consideran la severidad como una característica cualitativa referida a los efectos del fuego sobre el medio. Ésta, afecta a la infiltración, la escorrentía y, por lo tanto, a la erosión. Destacan que es muy variable en función de las condiciones pre-fuego de cada lugar. Las medidas directas de la severidad son muy complicadas de realizar, por lo que se acude a métodos indirectos (**Moody, et al., 2013**).

Desde la Universidad de Zaragoza, en la época más reciente, se han publicado algunos estudios en los que la severidad y las modificaciones que esta provoca en los distintos elementos del medio, juegan un papel central. De esta manera, **Montorio et al. (2014)** definen la severidad como la magnitud del cambio ecológico causado por el fuego. Además, se diferencian dos tipos de efectos del fuego, de primer y segundo orden, siendo los primeros resultado directo del proceso de combustión, y ligados a la severidad del incendio o del fuego; y los segundos, relacionados con la regeneración vegetal y la dinámica hidrogeomorfológica posterior al fuego (Montorio et al., 2014). Retomando la fórmula propuesta por Kasischke et al. (2007), los autores hacen hincapié en considerar la severidad del fuego como uno de los parámetros más importantes debido a su carácter predictivo de la respuesta del ecosistema (Montorio et al., 2014)

Pese a todo lo expuesto anteriormente, existen artículos actuales que utilizan el término severidad de forma confusa, incluso haciéndolo sinónimo del concepto de intensidad.

6. Cómo afecta la severidad del fuego al suelo

El fuego, por todo lo comentado en epígrafes anteriores, produce cambios en la vegetación, en el suelo, en la fauna y, en definitiva, en la composición del ecosistema en general. Todas estas afecciones son esenciales en el proceso de recuperación del paisaje quemado.

En los **suelos**, los incendios generan modificaciones físicas, químicas y biológicas (Mataix-Solera y Guerrero, 2007). Estos cambios pueden ser directos, en relación con el calentamiento y la combustión generados por el fuego; o bien, indirectos, debido a la situación micróclimática derivada del incendio y del recubrimiento de cenizas que aquél acarrea (Bodí *et al.*, 2012a).

Las distintas modificaciones causadas en los suelos por el fuego, dependen de diversos factores. Un buen número de ellos son independientes de las características y condiciones del fuego, tal y como muestra el siguiente esquema:

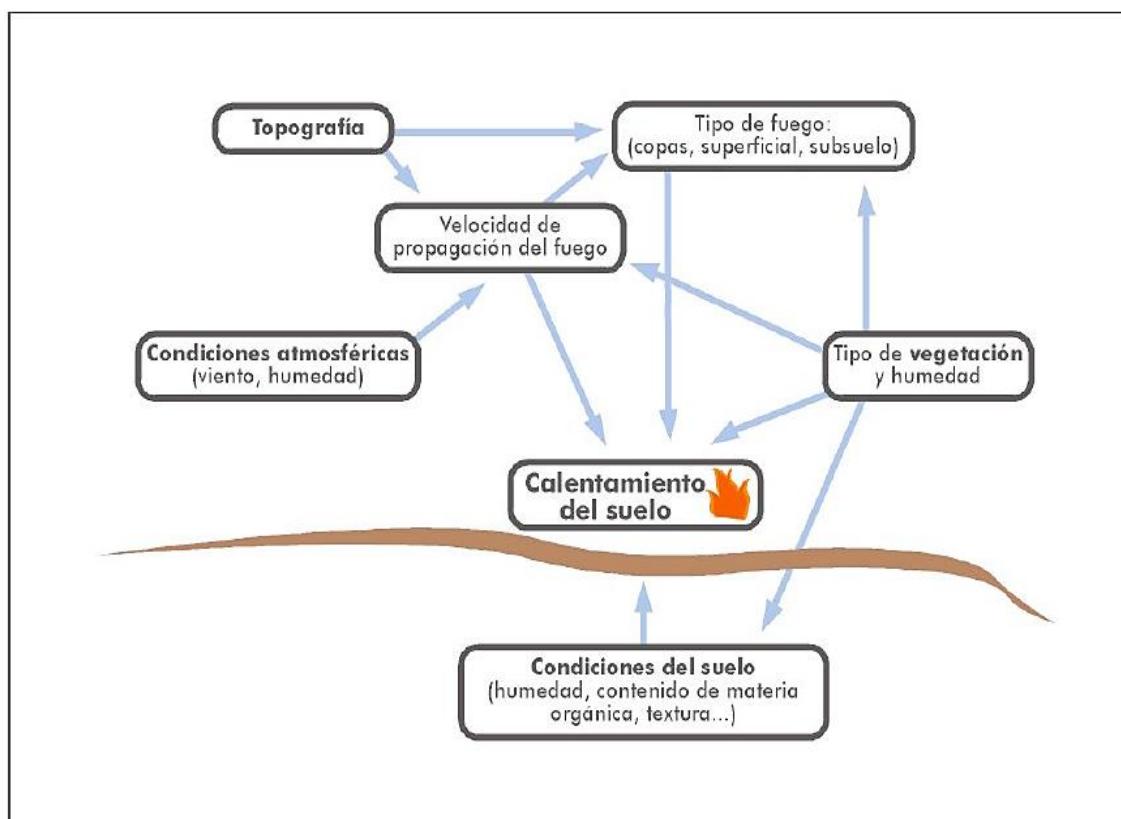


Figura 5. Factores implicados en el calentamiento del suelo durante un incendio forestal (Mataix-Solera y Guerrero, 2007).

Sin embargo, el fuego en sí, es el responsable directo de muchas de las afecciones que un incendio deja en el suelo, variando éstas en función de las características del incendio.

La presencia de ceniza, entendida como el residuo sólido de la biomasa quemada, compuesto por materia orgánica quemada, materia mineral y carbón vegetal (Bodí *et al.*, 2012b), es un importante condicionante del funcionamiento de distintos procesos edáficos, como veremos más adelante. Sin embargo, el espesor y las características de la capa de ceniza no es único y uniforme en los distintos incendios (Figura 6), pues depende del tipo de combustible quemado, del contenido de humedad del mismo y de la propia severidad del fuego (Woods y Balfour, 2010).



Figura 6. Distribución de la ceniza en una zona quemada (Moody *et al.*, 2013)

De hecho, el color que presenta la ceniza es un indicador bastante fiable de la severidad del incendio, tal y como han demostrado algunos estudios (Bodí *et al.*, 2011; Pereira *et al.*, 2012; León *et al.*, 2013)). Así, un color rojizo o amarronado en las cenizas, indica baja severidad; cenizas negras o grises oscuras representan una severidad media o moderada; y cenizas grises claras o blancas son indicativas de un incendio de alta severidad, producidas por la combustión total de la vegetación (Úbeda *et al.*, 2009; Bodí *et al.*, 2011; Pereira *et al.*, 2012; León *et al.*, 2013).



Figura 7. Cenizas de diferentes colores, ordenadas por su procedencia y por la severidad del fuego (Bodí *et al.* 2013)

En resumen, la magnitud y la duración de los cambios provocados por el fuego sobre el suelo, está asociada de forma directa a la severidad del incendio (Mataix-Solera *et al.*, 2011).

De esta manera, conociendo cómo influye el grado de severidad (a través de productos como la ceniza) en los distintos elementos y propiedades de los suelos, es posible predecir y evaluar la respuesta del medio al fuego.

6.1. Hidrofobicidad

La hidrofobicidad, o repelencia al agua, es una característica natural en algunos suelos, que actúa reduciendo su permeabilidad, de manera que el suelo se resiste al humedecimiento durante un determinado periodo de tiempo (Varela y Benito, 2013; Jiménez-Pinilla *et al.*, 2016). La repelencia al agua del suelo se debe a ciertas sustancias procedentes de plantas vivas, de materia orgánica en descomposición, de hongos y de exudados radicales (Bodí *et al.*, 2012c; Varela y Benito, 2013).

Como se muestra en el siguiente esquema (Figura 8), los diferentes compuestos se depositan sobre la superficie mineral, creando una capa de material impermeable:



Figura 8. Principales fuentes de sustancias hidrofóbicas en el suelo (Varela y Benito, 2013).

Esta propiedad edáfica no tiene un patrón espacial definido. De hecho, la repelencia al agua se caracteriza por ser espacialmente muy variable. Numerosos estudios aportan datos que avalan la importancia de la variabilidad espacial de la hidrofobicidad, pues puede oscilar entre una escala milimétrica hasta una kilométrica (Zavala *et al.*, 2009; Bodí *et al.*, 2012c; Jiménez-Pinilla *et al.*, 2016).

Algunos trabajos relacionan la aparición de repelencia al agua con otros factores o características de los suelos como el pH o el tipo de sustrato rocoso; así como con el tipo de vegetación desarrollada en ellos.

En la relación pH-hidrofobicidad, se han encontrado correlaciones de cierta relevancia. En el estudio realizado por Zavala *et al.* (2014), señalan el aumento de la repelencia al agua en suelos ácidos. Además, remarcan que el pH de los suelos puede condicionar el desarrollo de la hidrofobicidad mediante el control de la actividad microbiana y los hongos (Zavala *et al.*, 2014). Es decir, en suelos ácidos, es necesario un nuevo aporte de sustancias hidrofóbicas, procedentes de la producción vegetal, para que los niveles de repelencia al agua se re-establezcan tras un periodo de precipitaciones prolongado en el que se haya podido perder el nivel inicial de hidrofobicidad (Doerr y Thomas, 2000).

De la misma manera, múltiples investigaciones desarrolladas en el ámbito mediterráneo, apuntan hacia una variabilidad de la repelencia al agua según el sustrato rocoso del suelo. En un principio, se dio por sentado que, para suelos calcáreos o alcalinos ($\text{pH} > 7$), la repelencia al agua no era susceptible de desarrollarse. Los estudios posteriores en este ámbito, en cambio, señalan que sí puede llegar a desarrollarse hidrofobicidad, aunque, sus parámetros sean bastante fluctuantes y no sea el tipo de sustrato el que condicione su aparición (Bodí *et al.*, 2013).

Sin embargo, sí que puede ser un condicionante importante, si agregamos el factor de la vegetación a la ecuación. En este sentido, en suelos mediterráneos, se han obtenido resultados que apuntan hacia una repelencia al agua más persistente en suelos bajo *Pinus halepensis*; mientras que en suelos poblados por matorrales arbustivos como el romero (*rosmarinus officinalis*) o la carrasca (*Quercus coccifera*), los valores de recurrencia y persistencia de hidrofobicidad son más bajos (Cerdà y Doerr, 2007; Bodí *et al.*, 2013).

La hidrofobicidad es una de las características de los suelos que se ve modificada por la severidad del fuego. Tras un incendio, la repelencia al agua del suelo puede haberse visto inducida (si no existía ya), incrementada, disminuida o destruida (Doerr *et al.*, 2006; Zavala *et al.*, 2009; Bodí *et al.*, 2012c; Jiménez-Pinilla *et al.*, 2016)

Un nutrido número de publicaciones, defienden que el grado de hidrofobicidad del suelo tras el fuego depende de las temperaturas alcanzadas por el mismo, mientras está activo. Muchos de estos estudios han tratado de determinar los umbrales térmicos a partir de los cuales el comportamiento de la hidrofobicidad cambia. La mayor parte de ellos, parten de una división inicial realizada por DeBano y Krammes (1966) que ha sido levemente modificada a lo largo del tiempo. Se establece, pues, que la hidrofobicidad apenas varía por debajo de 175°C, se incrementa considerablemente entre los 175 y los 200°C y desaparece en torno a los 300°C debido a la volatilización de las sustancias hidrofóbicas (DeBano y Krammes, 1966; Doerr *et al.*, 2006; Zavala *et al.*, 2009; Kinner y Moody, 2011; Bodí *et al.*, 2012c; Varela y Benito, 2013; Jiménez-Pinilla *et al.*, 2016). Estos umbrales, inicialmente extraídos de trabajos de laboratorios con un tipo de suelo en concreto, se han ido confirmado, con alguna ligera variación, a medida que otros estudios han realizado experimentos similares en una mayor variedad de tipologías de suelos (Doerr *et al.*, 2006).

El tiempo que transcurre entre la modificación de la repelencia al agua y el retorno a los niveles de hidrofobicidad prefuego suele variar entre los 13 y los 25 meses (Doerr *et al.*, 2006), aunque la gran variabilidad espacial y temporal de esta propiedad hace que la monitorización de la misma sea complicada, por lo que este dato puede diferir según las diferentes metodologías utilizadas para el estudio, o según su localización (Varela y Benito, 2013).

Estos cambios en la hidrofobicidad del suelo, provocados por los incendios forestales, afectan a los procesos hidrológicos que tienen lugar tras los propios fuegos. Los escenarios posibles son variados, en función de las condiciones prefuego y de la severidad, entre otros factores: desde un aumento de la infiltración hasta un incremento de la escorrentía (y, por consiguiente, de la erosión), como se muestra en el siguiente esquema (Figura 9):

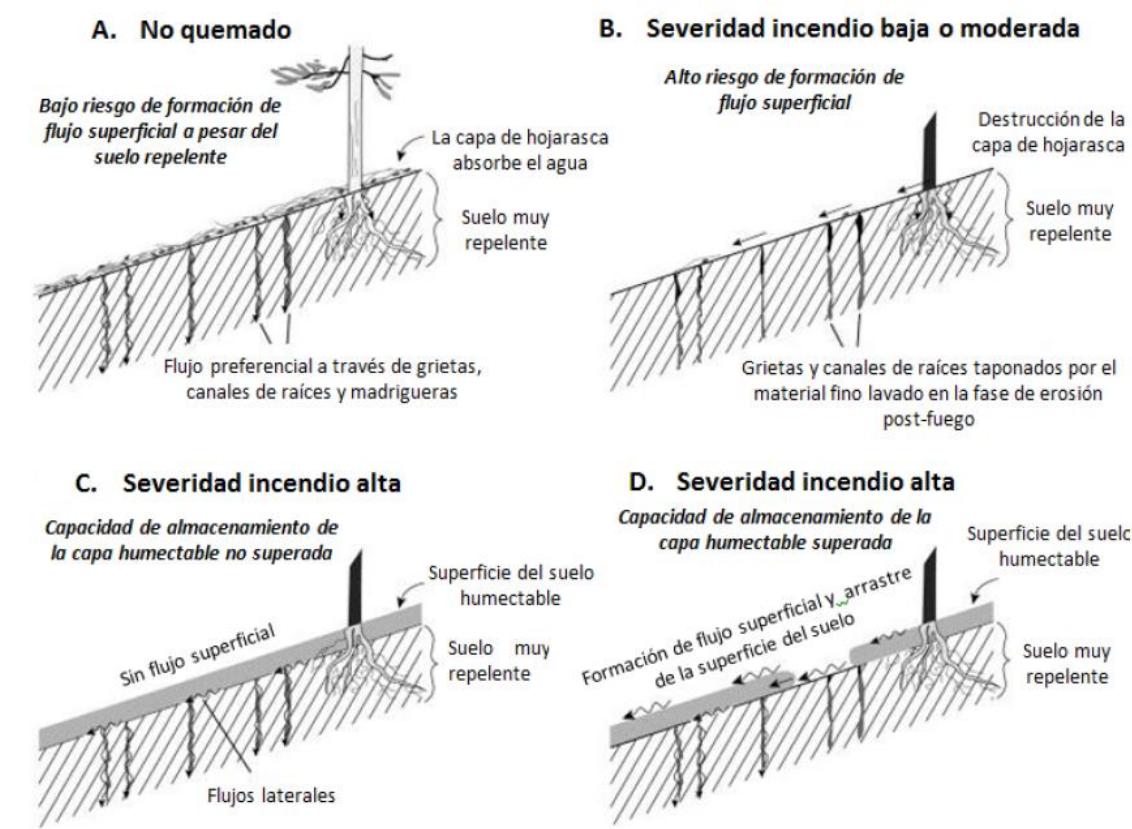


Figura 9. Esquema del efecto de la severidad del incendio en la respuesta hidrológica de un suelo muy repelente al agua (Varela y Benito, 2013, a partir de Doerr *et al.*, 2006).

Sin embargo, al asociar los niveles de hidrofobicidad con un alto grado de severidad del incendio, se han producido contradicciones o errores, debidos, en mayor parte, a las diferentes condiciones prefuego o a la

posibilidad de que fuertes precipitaciones hayan lavado la capa de cenizas creada sobre el sustrato, antes de poder tomar las muestras en el campo (Doerr *et al.*, 2006).

En conclusión, podemos considerar la modificación de la hidrofobicidad por parte del fuego (y de la severidad), como una característica clave en el desarrollo de la respuesta postfuego del ecosistema.

6.2. Materia orgánica del suelo

La materia orgánica del suelo, entendida como la fracción del suelo compuesta por residuos animales y vegetales en diferentes niveles de descomposición, así como por otros organismos (vivos y no-vivos) y sustancias ya sintetizadas en el suelo (Glossary of Wildland Fire Terminology, 2006), es otro de los elementos del suelo que se ven modificados por la acción del fuego y su severidad.

Debido a la importancia de la materia orgánica del suelo como indicador de la calidad del ecosistema, los efectos que el fuego provoca en ella, han sido ampliamente estudiados a lo largo de los años. Sin embargo, la cuantificación del cambio que el fuego genera en la materia orgánica es difícilmente definible, debido a la actuación simultánea de diferentes procesos químicos durante el incendio.

Un fuego que actúe sobre el suelo, calentándolo a gran temperatura durante un corto periodo de tiempo, puede eliminar la práctica totalidad del contenido de materia orgánica en el suelo (Bodí *et al.*, 2012a). Sin embargo, los efectos del fuego sobre la materia orgánica más relevantes, son los cambios producidos en la calidad y no en la cantidad, pues podrían explicar las propiedades y el funcionamiento de los suelos tras el paso del fuego (de la Rosa *et al.*, 2013).

Estos cambios están determinados, entre otros factores, por la temperatura que llegue a alcanzar el fuego, que determina el instante en el que las relaciones de Carbono/Nitrógeno cambian. A partir de 300°C, se pueden producir cambios estructurales en el contenido de materia orgánica del suelo. Sin embargo, en incendios de menor intensidad, el contenido (y calidad) de materia orgánica puede incluso aumentar gracias a la incorporación de material parcialmente quemado (de la Rosa *et al.*, 2013).

Como se ha comentado previamente, la alteración de la materia orgánica tiene una gran importancia en los estudios relacionados con la severidad del fuego. Algunos autores, han reducido la medición de la severidad al grado de pérdida o descomposición de la materia orgánica del suelo (Keeley, 2009).

Por otro lado, la materia orgánica constituye en sí un elemento más de los que son modificados por la diferente severidad de un incendio. En este caso, una mayor severidad del incendio, en un principio, acarrearía una cantidad de materia orgánica perdida o degradada superior.

6.3. Estabilidad de los agregados

Otra de las propiedades físicas que se ven afectadas por la severidad del fuego es la estructura del suelo, la cual está definida por la estabilidad de los agregados (Arcenegui *et al.*, 2013). La agregación de partículas en el suelo consiste en la unión de varias de ellas con la ayuda de alguna sustancia cementante.

La respuesta al fuego de los agregados del suelo puede ser muy variable, ya que su comportamiento depende de otros factores como la materia orgánica, la repelencia al agua o la textura; y, por supuesto, la severidad del incendio.

En 2011, Mataix-Solera *et al.*, realizan una síntesis de los tres patrones que puede seguir la estabilidad de los agregados en función de la severidad del fuego (Figura 10).

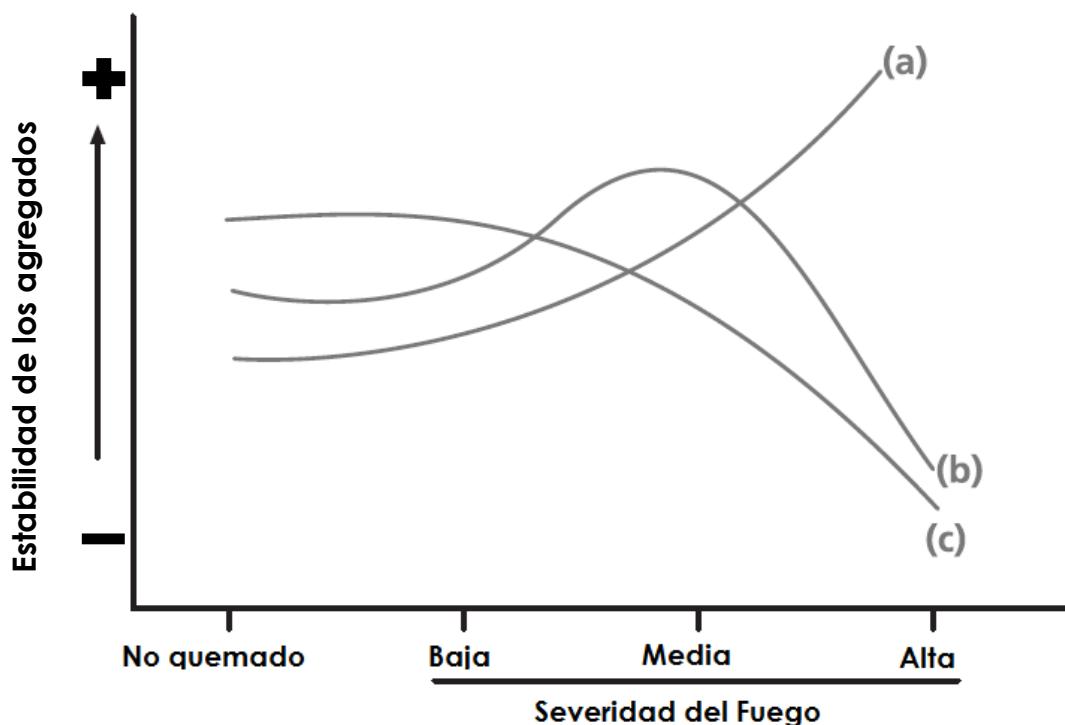


Figura 10. Tres diferentes patrones en los cambios en la estabilidad de los agregados en relación con la severidad del fuego (adaptado de Mataix-Solera *et al.*, 2011)

- La línea a describe el comportamiento de los suelos arcillosos, ferrosos y calcáreos. Se observa que la estabilidad de los agregados es superior cuanto mayor sea la severidad del fuego; sin embargo, no está claro si es positivo para el correcto funcionamiento del suelo, pues, pese a controlar la erosión potencial, la ausencia de materia orgánica puede perturbar el correcto funcionamiento edáfico (Mataix-Solera *et al.*, 2011).
- La línea b describe el comportamiento típico de los suelos permeables, que tienen materia orgánica como su principal cementante. La tendencia ascendente en cuanto a estabilidad se ve interrumpida cuando las temperaturas del fuego son elevadas, desencadenando un posible riesgo de erosión (Mataix-Solera *et al.*, 2011).
- La línea c refleja la evolución de la estabilidad de los agregados en suelos arenosos inicialmente hidrofóbicos. En este caso, al ser la materia orgánica de nuevo el principal cementante, la estabilidad desaparece conforme aquella se va quemando (Mataix-Solera *et al.*, 2011).

Ante estos resultados, la conclusión es que, para aquellos suelos cuyo cementante principal no sea la materia orgánica, una mayor severidad del fuego favorecerá el correcto funcionamiento de los suelos.

No obstante, es necesario tener en cuenta que la gran mayoría de los agregados pueden haber sido destruidos debido al fuego, por lo que los no afectados por el fuego, habrían salido reforzados del proceso del incendio (Arcenegui *et al.*, 2013).

Arcenegui *et al.* (2013) realizaron un estudio basado en un experimento de laboratorio en el que se preguntaban precisamente si ese aumento en la estabilidad de los agregados era real en los suelos quemados. Tras aplicar el estudio en dos tipos diferentes de suelos, su conclusión fue que, efectivamente, la estabilidad es mayor, aunque el número de agregados es mucho menor, por lo que se podrían desencadenar con mayor facilidad los distintos procesos erosivos.

En resumen, se puede señalar, desde el punto de vista de la severidad, que para severidades medias o bajas, apenas se producen cambios relevantes en la estabilidad de los agregados. Sin embargo, un amplio abanico de alteraciones se abre en cuanto la severidad comienza a ser importante (Mataix-Solera *et al.*, 2011; Arcenegui *et al.*, 2013).

6.4. Porosidad y enconstramiento

La porosidad es otra de las características del suelo que se ve afectada por el fuego y la severidad del mismo, en esta ocasión, de manera indirecta, pues depende de otros factores y procesos como la estabilidad de los agregados, la pérdida de materia orgánica o la ocurrencia de precipitaciones tras el incendio.

De forma simple, la porosidad puede ser entendida como el conjunto de huecos que existen entre las partículas que forman el suelo. Está muy ligada a la estabilidad de los agregados y a la cantidad de materia orgánica. Asimismo, se trata de una característica de enorme relevancia para explicar el desarrollo de la escorrentía superficial postfuego, ya que la capacidad de infiltración del suelo depende, en buena medida de la existencia y el tamaño de los agregados.

Por otro lado, el encostramiento del suelo se produce al sufrir éste el choque directo de las gotas de lluvia, el denominado *splash*, sobre la superficie del suelo desnudo. Este *splash*, redistribuye las partículas más finas del suelo, obstruyendo así los poros, y, por tanto, reduciendo la capacidad de infiltración del suelo (Montorio *et al.*, 2014).

En cuanto al efecto del fuego sobre la porosidad, se diferencian dos claras tendencias prácticamente opuestas. Ambas están firmemente sustentadas por un gran número de trabajos y publicaciones.

La primera de estas dos corrientes, apoyada en trabajos como el de Malik (1984) y Onda (2008) señala que las partículas más finas de ceniza se introducen en los poros del suelo, sellándolos y entorpeciendo la infiltración (Larsen *et al.*, 2009; Bodí *et al.*, 2012a; Montorio *et al.*, 2014).

La segunda de ellas, en cambio, representada por publicaciones de Cerdà (1998), Martin y Moody (2001), Cerdà y Doerr (2008), Woods y Balfour (2008), Bodí *et al.* (2012), sostiene que la capa de cenizas generada por el fuego tiene cierta capacidad para absorber y almacenar el agua de las precipitaciones, por lo que los poros del suelo se mantienen como en las condiciones anteriores al fuego, ya que la infiltración se puede ver incluso favorecida por esta capa de cenizas (Bodí *et al.*, 2012c; Montorio *et al.*, 2014).

El efecto de la capa de ceniza, se ve realizado por la presencia de acículas o restos de vegetación parcialmente quemada (Montorio *et al.*, 2014). Por lo tanto, podemos aventurar que una mayor severidad del fuego, provocará una mayor alteración de la porosidad por el encostramiento. Esto se debe a que, ante la ausencia de escorrentía cortical, debido a la combustión total de la vegetación, que frene la lluvia, las gotas impactarán de forma más intensa sobre la superficie, que, pese a estar cubierta de ceniza, acusará la falta de acículas y vegetación parcialmente quemada.

6.5. PH

El pH de los suelos es una de las características químicas de los suelos que resulta alterada en mayor medida por el paso del fuego y su severidad. Las modificaciones sufridas por esta propiedad, son consecuencia directa de la presencia de cenizas, que aportan al suelo carbonatos, óxidos y cationes básicos (Mataix-Solera y Guerrero, 2007; Bodí, *et al.*, 2012a).

La combustión efectiva de materia orgánica del suelo, libera cationes básicos (Ca^{+2} , Mg^{+2} y K^{+}) contenidos en las cenizas. Al humedecerse éstas, se produce la hidrólisis de los cationes básicos y, por tanto, la elevación del pH (Mataix-Solera y Guerrero, 2007; Notario del Pino, 2013). De la misma manera, la conductividad eléctrica y la salinidad también se ven incrementadas por el efecto de las cenizas, lo cual puede llegar a dificultar, más si cabe, la regeneración vegetal de las zonas quemadas (Mataix-Solera y Guerrero, 2007).

El grado de aumento del pH de los suelos tras el paso del fuego depende de la severidad del mismo. Un incendio de altas temperaturas y extenso tiempo de permanencia (alta severidad) conseguirá una combustión más efectiva de la materia orgánica, lo que facilitará la liberación de los cationes básicos, acumulados como óxidos y carbonatos; y generará una reacción básica más potente en el suelo, pudiendo llegar a elevar el pH en 4 o 5 unidades (Mataix-Solera y Guerrero, 2007; Notario del Pino, 2013).

Estos cambios en el pH, en la salinidad, y en la conductividad eléctrica, no son, en general, muy persistentes, pues, tras las primeras lluvias, los cationes básicos son lavados, por lo que el suelo tiende a recuperar su *status* químico anterior al fuego mediante la desaparición de las cenizas, que representaban la causa de buena parte de las modificaciones (Mataix-Solera y Guerrero, 2007; Bodí, *et al.*, 2012a; Notario del Pino, 2013; Montorio *et al.*, 2014).

7. Comportamiento hidrogeomorfológico del suelo en función de la severidad del fuego

Las distintas afecciones del fuego y su severidad sobre el suelo, confluyen a la hora de evaluar el comportamiento hidrogeomorfológico que éste presenta pasado el incendio. Es decir, a tenor de lo expuesto hasta el momento, se puede aseverar que el efecto del fuego y de su severidad modifica, mediante sus afecciones sobre propiedades físicas y químicas del suelo, la capacidad de infiltración de éste, y, consecuentemente, la escorrentía superficial que se produce tras un periodo de precipitaciones.

En definitiva, las alteraciones que la severidad del fuego produce sobre los elementos del mismo (hidrofobicidad, materia orgánica, estabilidad de los agregados, porosidad y pH), hacen que la hidrología del suelo cambie drásticamente en cuanto la lluvia hace aparición (Moody *et al.*, 2008; Pérez-Cabello *et al.* 2009; Bodí *et al.*, 2012c).

El protagonismo de la severidad en este proceso de alteración está asumido como un hecho por la gran mayoría de autores que han desarrollado estudios en este ámbito (Cerdá y Doerr, 2008; Moody *et al.*, 2008; Pérez-Cabello *et al.*, 2009; Shakesby, 2011), aunque hay variedad de interpretaciones de cómo funciona y cuál es su resultado final en cuanto a tasas de escorrentía y erosión se refiere. Por lo tanto, este proceso no es tan sencillo como pudiera parecer, pues en él intervienen numerosas variables. Por ello, es necesario comprenderlo en su totalidad: desde que cae la primera gota de lluvia tras el incendio hasta que se desencadenan los distintos procesos hidrogeomorfológicos, tales como el *splash* o salpicadura, la infiltración o la escorrentía superficial.

En el **periodo más inmediato tras el incendio**, las primeras precipitaciones que ocurran, no se van a topar con el suelo desnudo y desprotegido, si no que se encontrarán con la capa de ceniza que lo cubre y con los restos de vegetación que no se han quemado totalmente, si el incendio no es de una gran severidad. La capa de **cenizas** tiene un papel esencial en este momento del proceso. Esta capa, como ya se ha comentado en la explicación de la afección de la severidad sobre la porosidad, funciona, de forma mayoritaria, como absorbente del agua precipitada, por lo que, en primera instancia, favorece la infiltración y reduce la escorrentía (Cerdà, 1998; Martín y

Moody, 2001; Cerdá y Doerr, 2008; Woods y Balfour, 2008; Bodí *et al.*, 2012b; León *et al.*, 2013).

Si bien este razonamiento está bastante aceptado por la comunidad científica, el proceso es algo más complejo e incluso algunos estudios han mostrado resultados diferentes, en los que se afirma que la ceniza contribuye al aumento de la escorrentía (Malik, 1984; Onda, 2008), como también se ha visto previamente en el apartado de la afección sobre la porosidad.

Las características de las cenizas, así como el grosor de la capa formada, determinados por la severidad del fuego, pueden hacer variar los resultados hidrogeomorfológicos de las primeras lluvias postfuego. En concreto, las cenizas negras (relacionadas con fuegos de baja severidad, sí favorecen por completo la infiltración, actuando como una especie de esponja para el agua. En cambio, las cenizas blancas favorecen el encostramiento y el sellado de los poros del suelo (León *et al.*, 2013). Asimismo, Bodí *et al.* (2013) han ligado recientemente propiedades hidrofóbicas a algunos tipos concretos de cenizas generadas a baja temperatura.

Pese a todo ello, los principales procesos hidrogeomorfológicos desencadenados sobre los suelos quemados se producen, por tanto, tras la desaparición de esta capa de cenizas debido a la acción del viento o del agua (León *et al.*, 2013).

Una vez la ceniza ha sido lavada o disipada por el viento, el agua de lluvia se va a encontrar únicamente frente al suelo afectado por el fuego, por lo que el splash de las gotas de lluvia va a generar cambios edáficos. Se aprovecharán los cambios generados en la estabilidad de los agregados, obstruyendo los poros del suelo (Montorio *et al.*, 2014). Un fuego de alta severidad, que haya destruido la mayor parte de los agregados (Arcenegui *et al.*, 2013), tenderá a acarrear un sellado de los poros del suelo, favoreciendo así la escorrentía y los procesos erosivos.

A este efecto, debemos añadirle la influencia de los nuevos niveles de hidrofobicidad del suelo, tras haber sido este sometido a elevadas temperaturas. En determinados tipos de suelo, el efecto de aumento de la hidrofobicidad (o su destrucción a partir de cierto umbral), pueden condicionar los procesos de infiltración y escorrentía, favoreciendo una u otra (Figura 9, página 20).

Este aumento de tasas de erosión, solamente pervive un periodo limitado de tiempo tras el incendio, de cuatro a siete años según algunos estudios (Moody y Martin, 2009).

En definitiva, la bibliografía señala que la severidad del fuego controla los procesos hidrogeomorfológicos del suelo tras un incendio, aumentando la escorrentía en los incendios de mayor severidad. En la siguiente tabla (Tabla 2), se sintetiza esta idea:

Severidad	Tipo de cenizas	Modificación características del suelo	Procesos hidrológicos postfuego
Baja	Negras	<ul style="list-style-type: none">• Hidrofobicidad: Apenas muestra variaciones• Materia orgánica: apenas variada• Estabilidad Agregados: se mantiene• Porosidad: apenas alterada• PH: Poco variado	<p>La capa de cenizas favorece la infiltración con las primeras lluvias. Una vez ésta sea lavada, los niveles de escorrentía serán parecidos a los que hubiera antes del fuego</p>
Media	Grises oscuras	<ul style="list-style-type: none">• Hidrofobicidad: aumenta considerablemente• Materia orgánica: bastante alterada• Estabilidad Agregados: reducida• Porosidad: Menor• PH: Elevado notablemente	<p>En función de las condiciones previas al fuego, el comportamiento hidrogeomorfológico será más similar al de un incendio de baja o de alta severidad</p>

Alta	Grises claras o blancas	<ul style="list-style-type: none">• Hidrofobicidad: aumenta (o se destruye si el suelo se ha calentado por encima de 300º)• Materia orgánica: muy degradada y consumida• Estabilidad Agregados: aumentada, aunque la mayoría de ellos se ha destruido• Porosidad: Muy disminuida• PH: Aumentado en hasta 5 puntos	Después de que las lluvias hayan lavado la capa de cenizas, se produce un considerable aumento de la escorrentía y, por tanto, de la erosión

Tabla 2. Síntesis del comportamiento hidrogeomorfológico del suelo en función de la severidad. Elaboración propia.

Pese a que este razonamiento básico acerca del comportamiento hidrogeomorfológico del suelo tras un incendio está sustentado en un gran número de publicaciones; son también destacables las que, tras realizar experimentos en el campo, han llegado a conclusiones diferentes o han matizado mucho el proceso descrito anteriormente.

Un buen ejemplo de ello, es el estudio llevado a cabo por León *et al.* (2014) en los Montes de Zuera (Norte de Zaragoza), sobre las áreas afectadas por los incendios de Castejón (2008) y de Remolinos (2009). El objetivo principal del estudio desarrollado por los autores era determinar el efecto de la capa de cenizas sobre la infiltración en dos tipos diferentes de sustratos: calcáreos y yesosos.

A la vista de los resultados de las medidas de infiltración que arrojaron los experimentos, los autores llegaron a la conclusión de que, en efecto, la ceniza actúa de capa protectora del suelo, favoreciendo la infiltración mientras esta capa esté presente. Sin embargo, los resultados también muestran una diferencia de tasas de infiltración en función del tipo de suelo sobre el que se aplicaran las mediciones. De esta manera,

destacan que la infiltración es mayor en suelos calcáreos que en suelos yesosos cubiertos por cenizas. Asimismo, señalan la tipología y el grosor de la ceniza (y, por tanto, la severidad del fuego) como un factor relevante en el estudio de este fenómeno (León *et al.*, 2014).

Mediante este ejemplo se pretende ilustrar la complejidad de la materia de estudio debido a la intervención de múltiples variables, que pueden condicionar el comportamiento hidrogeomorfológico del suelo tras sufrir el paso de un incendio.

8. Conclusiones

La severidad del fuego, entendida como la magnitud del cambio ecológico que este produce sobre el medio, es considerada como un elemento central por la comunidad científica a la hora de evaluar la regeneración edáfica de los suelos tras el paso de un incendio en el ámbito mediterráneo.

El concepto severidad ha sufrido diferentes variaciones en su significado desde que apareciese en la bibliografía por primera vez en los años setenta del pasado siglo. En la actualidad, pese a existir algunas publicaciones que parecen confusas al respecto, la definición de la severidad como característica cualitativa del fuego, que mide el grado de impacto que éste tiene sobre el ecosistema, está bastante arraigada en la bibliografía.

Asimismo, existe un importante consenso en torno a la consideración de la severidad como un agente capaz de modificar, en un sentido o en otro, los diversos procesos ambientales que tienen lugar tras un incendio. Es decir, encontramos una clara influencia de la severidad del fuego en torno a la respuesta de la regeneración vegetal, de los procesos hidrológicos y, por lo tanto, de los procesos erosivos y la regeneración edáfica postfuego.

En cuanto a la afección de la severidad sobre los suelos, la bibliografía indica, a través de diferentes estudios experimentales, las diferentes alteraciones que sufren las principales propiedades y componentes del suelo como la hidrofobicidad, la materia orgánica, la estabilidad de los agregados, la porosidad y el pH. Así, se han tratado de establecer relaciones directas entre el grado de severidad y el comportamiento de cada componente o calidad edáfica, de manera que, para un alto nivel de severidad, la hidrofobicidad es mayor hasta un cierto umbral en el que desaparece; la materia orgánica se ve consumida; la estabilidad de los agregados aumenta, aunque la mayoría de ellos se ha destruido; la porosidad se reduce; y, el pH aumenta considerablemente.

Estas alteraciones en el suelo, son las que condicionan la respuesta hidrogeomorfológica del mismo ante las precipitaciones que tienen lugar tras el incendio. Esta respuesta, está muy ligada al papel de la ceniza, que actúa en primera instancia como capa protectora del suelo, impidiendo el *splash* y favoreciendo la infiltración, tal y como

apuntan los expertos en la materia. Sin embargo, al ser lavadas las cenizas, el agua de lluvia impactará de forma directa contra el suelo alterado por el fuego. Si este ha sido de gran severidad, se desencadenará la escorrentía superficial con mayor facilidad que si ha sido de baja severidad.

No obstante, y tal y como se ha constatado en el presente trabajo, el proceso no es simple, pues muchas más variables intervienen en él y hacen difícil establecer leyes acerca del comportamiento hidrogeomorfológico de los suelos tras el fuego en función de su severidad.

Pese a ello, el aumento de la erosión con una mayor severidad del fuego, está reconocido como un hecho por una gran parte de la comunidad científica, debido a que las cenizas blancas (producidas por fuegos de mayor severidad) son lavadas más rápida y fácilmente, dejando al descubierto un suelo generalmente más impermeable por la destrucción de los agregados y el aumento de la hidrofobicidad. Sin embargo, de nuevo existen estudios que matizan este comportamiento, atendiendo a la influencia de otras variables como la litología, la pendiente, la orientación o la cubierta vegetal existente antes del fuego.

En conclusión, pese a que grandes grupos de investigaciones extraigan conclusiones similares, la complejidad de la materia hace imprudente emitir juicios definitivos y establecer dogmas inamovibles respecto al desarrollo de los distintos procesos hidrológicos tras el fuego. Por tanto, la investigación en este campo, debe ir encaminada a, de alguna forma, a corroborar o a refutar esta hipótesis de partida que refleja la bibliografía hasta el momento.

9. Bibliografía

9.1. Bibliografía referenciada en el texto

Arcenegui, V., Mataix-Solera, J., Morugán-Coronado, A., Pérez-Bejarano, A., Jimenez-Pinilla, P., Lozano, E. y García-Orenes, F. (2013) “¿Es real o aparente el aumento de la estabilidad de agregados encontrado en ocasiones en suelos quemados?”. *Geoderma*, 191, pp. 3-13.

Bento-Gonçalves, A., Vieira, A., Úbeda, X., y Martin, D. (2012). “Fire and soils: key concepts and recent advances”. *Geoderma*, 191, pp. 3-13.

Bodí, M. B., Mataix-Solera, J., Doerr, S. H., y Cerdà, A. (2011). “The wettability of ash from burned vegetation and its relationship to Mediterranean plant species type, burn severity and total organic carbon content”. *Geoderma*, 160(3), pp. 599-607.

Bodí, M. B., Cerdà, A., Mataix-Solera, J., y Doerr, S. H. (2012). “Efectos de los incendios forestales en la vegetación y el suelo en la cuenca mediterránea: revisión bibliográfica”. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 58, pp. 33-56.

Bodí, M. B., Doerr, S. H., Cerdà, A., y Mataix-Solera, J. (2012). “Hydrological effects of a layer of vegetation ash on underlying wettable and water repellent soil”. *Geoderma*, 191, pp. 14-23.

Bodí, M. B., Cerdà, A., Solera, J. M., y Doerr, S. H. (2012). “Repelencia al agua en suelos forestales afectados por incendios y en suelos agrícolas bajo distintos manejos y abandono”. *Cuadernos de investigación geográfica*, (38), pp 53-74.

Bodí, M. B., Muñoz-Santa, I., Armero, C., Doerr, S. H., Mataix-Solera, J., y Cerdà, A. (2013). “Spatial and temporal variations of water repellency and probability of its occurrence in calcareous Mediterranean rangeland soils affected by fires”. *Catena*, 108, pp. 14-25.

Cerdà, A. (1998). “Soil aggregate stability under different Mediterranean vegetation types”. *Catena*, 32(2), pp. 73-86.

Cerdà, A., y Doerr, S. H. (2008). “The effect of ash and needle cover on surface runoff and erosion in the immediate post-fire period”. *Catena*, 74(3), pp. 256-263.

De la Rosa, J.M., Almendro,s G., Knicker, H., Hernández, Z., Arias, E., y González-Vila, F.J. (2013). "Investigaciones recientes sobre el impacto del fuego en la materia orgánica del suelo". En Jordán, A., Zavala, L.M., Cerdà, A., Mataix-Solera, J., González-Pérez, J.A. (Editores) *Fichas técnicas FUEGORED*, 2013/09.

Debano, L. F., y Krammes, J. S. (1966). "Water repellent soils and their relation to wildfire temperatures". *Hydrological Sciences Journal*, 11(2), pp.14-19.

Doerr, S. H., Shakesby, R. A., Blake, W. H., Chafer, C. J., Humphreys, G. S., y Wallbrink, P. J. (2006). "Effects of differing wildfire severities on soil wettability and implications for hydrological response". *Journal of Hydrology*, 319(1), pp. 295-311.

Doerr, S. H., y Thomas, A. D. (2000). "The role of soil moisture in controlling water repellency: new evidence from forest soils in Portugal". *Journal of Hydrology*, 231, pp. 134-147.

National Wildfire Coordinating Group (2006) *Glosary of Wildland Fire Terminology*

Jiménez-Pinilla, P., Lozano, E., Mataix-Solera, J., Arcenegui, V., Jordán, A., y Zavala, L. M. (2016). "Temporal changes in soil water repellency after a forest fire in a Mediterranean calcareous soil: Influence of ash and different vegetation type". *Science of the Total Environment*, 572, pp. 1252-1260.

Kasischke, E. S., Hoy, E. E., French, N. H. F., y Turetsky, M. R. (2007). "Post-fire evaluation of the effects of fire on the environment using remotely-sensed data". En Gitas, I.Z.y Carmona-Moreno (Editores) *Towards an operational use of remote sensing in forest fire management*, pp 38-57.

Keeley, J. E. (2009). "Fire intensity, fire severity and burn severity: a brief review and suggested usage". *International Journal of Wildland Fire*, 18(1), pp. 116-126.

Kinner, D. A., y Moody, J. A. (2010). "Spatial variability of steady-state infiltration into a two-layer soil system on burned hillslopes". *Journal of Hydrology*, 381(3), pp. 322-332.

Larsen, I. J., MacDonald, L. H., Brown, E., Rough, D., Welsh, M. J., Pietraszek, J. H., y Schaffrath, K. (2009). "Causes of post-fire runoff and

erosion: water repellency, cover, or soil sealing?". *Soil Science Society of America Journal*, 73(4), pp. 1393-1407.

Lentile, L. B., Holden, Z. A., Smith, A. M., Falkowski, M. J., Hudak, A. T., Morgan, P., y Benson, N. C. (2006). "Remote sensing techniques to assess active fire characteristics and post-fire effects". *International Journal of Wildland Fire*, 15(3), pp. 319-345.

León, J., Seeger, M., Badía, D., Peters, P., Echeverría, M.T. (2014). "Thermal shock and splash effects on burned gypseous soils from the Ebro basin (NE Spain)". *Solid Earth*, 5, pp 131-140.

León, J., Echeverría, M. T., Martí, C., y Badía, D. (2015). "Can ash control infiltration rate after burning? An example in burned calcareous and gypseous soils in the Ebro Basin (NE Spain)". *Catena*, 135, pp. 377-382.

Lyon, L. J., y Stickney, P. F. (1976). "Early vegetal succession following large northern Rocky Mountain wildfires". *Proceedings of the Montana tall timbers fire ecology conference and fire and land management symposium 14*, pp. 355-375).

Mallik, A. U., Gimingham, C. H., y Rahman, A. A. (1984). "Ecological effects of heather burning: I. Water infiltration, moisture retention and porosity of surface soil". *The Journal of Ecology*, pp. 767-776.

Martin, D. A., y Moody, J. A. (2001). "Comparison of soil infiltration rates in burned and unburned mountainous watersheds". *Hydrological Processes*, 15(15), pp. 2893-2903.

Mataix-Solera, J., Cerdà, A., Arcenegui, V., Jordán, A., y Zavala, L. M. (2011)." Fire effects on soil aggregation: a review". *Earth-Science Reviews*, 109(1), pp. 44-60.

Mataix-Solera, J., y Guerrero, C. (2007). "Efectos de los incendios forestales en las propiedades edáficas. Incendios Forestales, Suelos y Erosión Hídrica". *Caja Mediterráneo CEMACAM Font Roja-Alcoi*, pp. 5-40.

Montorio, R., Pérez-Cabello, F., Martín, A. G., Vlassova, L., y de la Riva, J. R. (2014). "La severidad del fuego: revisión de conceptos, métodos y efectos ambientales". En Vadillo, J.A. (Editor) *Geoecología, cambio ambiental y paisaje: homenaje al profesor José María García Ruiz* pp. 427-440.

- Moody, J. A., Martin, D. A., Haire, S. L., y Kinner, D. A. (2008). "Linking runoff response to burn severity after a wildfire". *Hydrological Processes*, 22(13), pp. 2063-2074.
- Moody, J. A., Shakesby, R. A., Robichaud, P. R., Cannon, S. H., y Martin, D. A. (2013). "Current research issues related to post-wildfire runoff and erosion processes". *Earth-Science Reviews*, 122, pp. 10-37.
- Moody, J. A., y Martin, D. A. (2009). "Synthesis of sediment yields after wildland fire in different rainfall regimes in the western United States". *International Journal of Wildland Fire*, 18(1), pp. 96-115.
- Notario del Pino, J. (2013). "Efectos del fuego sobre las propiedades químicas del suelo". En Jordán, A., Zavala, L.M., Cerdà, A., Mataix-Solera, J., González-Pérez, J.A. (Editores) *Fichas técnicas FUEGORED*, 2013/03.
- Onda, Y., Dietrich, W. E., y Booker, F. (2008). "Evolution of overland flow after a severe forest fire, Point Reyes, California". *Catena*, 72(1), pp. 13-20.
- Pausas, J. G., y Fernández-Muñoz, S. (2012). "Fire regime changes in the Western Mediterranean Basin: from fuel-limited to drought-driven fire regime". *Climatic change*, 110(1), pp. 215-226.
- Pereira, P., Úbeda, X., Martin, D., Mataix-Solera, J., y Guerrero, C. (2011). "Effects of a low severity prescribed fire on water-soluble elements in ash from a cork oak (*Quercus suber*) forest located in the northeast of the Iberian Peninsula". *Environmental Research*, 111(2), pp. 237-247.
- Pereira, P., Úbeda, X., y Martin, D. A. (2012). "Fire severity effects on ash chemical composition and water-extractable elements". *Geoderma*, 191, pp. 105-114.
- Pérez-Cabello 2009
- Pérez-Cabello, F., Echeverría, M.T.; Ibarra, P. y de la Riva, J. (2009). "Effects of fire on vegetation, soil and hydrogeomorphological behaviour in Mediterranean Ecosystems". En Chuvieco (Editor) *Earth Observation of Wildland Fires in Mediterranean Ecosystems*, pp. 111-129.
- Ryan, K. C., y Noste, N. V. (1985). "Evaluating prescribed fires". En Lotan *et al.* (Editor) *Proceedings, symposium and workshop on wilderness Fire*, pp. 230-238.

- Shakesby, R. A. (2011). "Post-wildfire soil erosion in the Mediterranean: review and future research directions". *Earth-Science Reviews*, 105(3), 71-100.
- Úbeda, X., Pereira, P., Outeiro, L., y Martin, D. A. (2009). "Effects of fire temperature on the physical and chemical characteristics of the ash from two plots of cork oak (*Quercus suber*)". *Land degradation & development*, 20(6), pp. 589-608.
- Wagner, C. V. (1973). "Height of crown scorch in forest fires". *Canadian Journal of Forest Research*, 3(3), pp. 373-378.
- Varela, M. E. y Benito, E. (2013). "Repelencia al agua en suelos afectados por el fuego". En Jordán, A., Zavala, L.M., Cerdà, A., Mataix-Solera, J., González-Pérez, J.A. (Editores) Fichas técnicas FUEGORED, 2013/08.
- Vega, J. A., Fernández, C., Pérez-Gorostiaga, P., y Fonturbel, T. (2008). "The influence of fire severity, serotiny, and post-fire management on *Pinus pinaster* Ait. Recruitment in three burnt areas in Galicia (NW Spain)". *Forest Ecology and Management*, 256(9), pp. 1596-1603.
- Woods, S. W., y Balfour, V. N. (2010). "The effects of soil texture and ash thickness on the post-fire hydrological response from ash-covered soils". *Journal of Hydrology*, 393(3), pp. 274-286.
- Zavala, L. M., González, F. A., y Jordán, A. (2009). "Fire-induced soil water repellency under different vegetation types along the Atlantic dune coast-line in SW Spain". *Catena*, 79(2), pp. 153-162.
- Zavala, L. M., García-Moreno, J., Gordillo-Rivero, Á. J., Jordán, A., y Mataix-Solera, J. (2014). "Natural soil water repellency in different types of Mediterranean woodlands". *Geoderma*, 226, 170-178.

9.2. Bibliografía consultada

Bodí, M.B. (2012). *Efectos de las cenizas y la repelencia al agua en la hidrología de suelos afectados por suelos forestales en ecosistemas mediterráneos*. Tesis Doctoral. Departament de Geografia, Universitat de València.

Cerdà, A. y Mataix-Solera, J. (Editores) (2009). *Efectos de los incendios forestales sobre los suelos en España: El estado de la cuestión visto por los científicos españoles*. València: Cátedra Divulgación de la Ciencia.

Chuvieco, E. (Editor) (2009). *Earth Observation of Wildland Fires in Mediterranean Ecosystems*. Alcalá de Henares: Springer.

Efe (2015). "El incendio de Luna, el segundo con más superficie arrasada en Aragón con 14.146 hectáreas". *Heraldo de Aragón*, 14 de Julio. Disponible on-line en:

http://www.heraldo.es/noticias/aragon/zaragoza_provincia/2015/07/14/incendio_luna_segundo_con_mas_superficie_arrasada_aragon_con_146_hectareas_390639_1101025.html

Jordán, A., Zavala, L.M., Cerdà, A., Mataix-Solera, J., González-Pérez, J.A. (Editores) (2013). *Fichas técnicas FUEGORED*.

León, J. (2014). *Comportamiento hidrogeomorfológico tras incendios forestales en escenarios semiáridos*. Tesis Doctoral. Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza.

Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (1968-2016). *Los Incendios Forestales en España: informes anuales*.