



Respuesta hidrológica
de un suelo forestal
Mediterráneo sometido
a diferentes manejos
post-incendio.

Pablo Arnáiz Montiel

Tutores:
Jorge Mataix Solera
Vicky Arcenegui Baldó

GRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES
(FACULTAD DE CIENCIAS EXPERIMENTALES)
Departamento de Agroquímica y Medio ambiente.

AGRADECIMIENTOS

Al Ministerio de Economía y Competitividad y al Ayuntamiento de Alcoy por apoyar al “proyecto POSTFIRE (CGL2013-47862-C2-1-R)”, razón por la cual este y tantos otros estudios no se hubiesen podido realizar.

A mis compañeros de laboratorio por los consejos y todo lo que me han enseñado durante los análisis realizados para este estudio.

Y en especial, a mis tutores Jorge Mataix Solera y Vicky Arcenegui Baldó, por el apoyo en el trabajo de campo y por su paciencia y dedicación desde que comenzó este estudio hasta el día de su presentación.





RESUMEN

En las últimas décadas, uno de los manejos post-incendio más utilizado es la extracción de la madera quemada, método conocido como “Saca”. Este proceso, y el método por el cual se suele llevar a cabo (arrastre de troncos y empleo de maquinaria pesada) se ha comprobado que afecta a las propiedades del suelo y a la recuperación de la vegetación. En este estudio analizamos la respuesta hidrológica del suelo tres años después de la extracción de madera quemada y la comparamos con una zona de referencia en la que no se extrajo, así como en qué medida una aplicación de acolchado (mulch) puede facilitar la reducción de la escorrentía y la erosión del suelo. Los resultados muestran diferencias significativas y que la aplicación de acolchado ayudaría a frenar la erosión y los procesos degradativos de las zonas donde se extrajo la madera quemada.

Palabras clave: incendio forestal, tratamiento post-incendio, extracción de madera, erosión del suelo.



ABSTRACT

In recent decades one of the most used post-fire management is the extraction of the burned wood, this method is known as “Salvage logging”. This process and the method by which it is usually carried out, (dragging logs on the surface of the ground and use of heavy machinery) has been proven to affect the soil properties and the recovery of the vegetation. In this study we analyzed the hydrological response of the soil three years after the extraction of burned wood comparing it with a control area in which it was not extracted as well as to what extent an application of mulch can facilitate the reduction of runoff and soil erosion. The results showed significant differences and that the application of mulch would help to restrain the erosion and the degradation processes of the areas where the burned wood was extracted.

Keywords: forest fire, post-fire treatment, salvage logging, soil erosion.

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN	6
2.	ANTECEDENTES	9
3.	OBJETIVOS	10
4.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	11
4.1.	DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	11
4.1.1.	Localización	11
4.1.2.	Clima.....	12
4.1.3.	Relieve, litología y edafología.....	13
4.1.4.	Vegetación.....	15
4.1.5.	Extracción de madera quemada	15
4.2.	DISEÑO EXPERIMENTAL	17
4.2.1.	Simulaciones de lluvia en campo	17
4.2.2.	Carbono Orgánico del Suelo.....	20
4.2.3.	Contenido total de agregados (CTA) y Estabilidad de agregados (EA).....	20
4.2.4.	Análisis estadístico	21
5.	RESULTADOS	22
5.1.	CARBONO ORGÁNICO	22
5.2.	CONTENIDO TOTAL DE AGREGADOS (CTA) Y ESTABILIDAD DE AGREGADOS (EA).....	23
5.3.	SIMULACIONES DE LLUVIA EN CAMPO	24
5.3.1.	Tiempo en aparecer la escorrentía	24
5.3.2.	Escorrentía total	25
5.3.3.	Infiltración	26
5.3.4.	Erosión (pérdida de suelo)	27
6.	DISCUSIÓN.....	28
7.	CONCLUSIONES	31
8.	PROYECCIÓN FUTURA	32
9.	BIBLIOGRAFÍA.....	33
10.	PÁGINAS WEB.....	36

1. INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas mediterráneos siempre han estado muy influenciados, incluso ligados al fuego, de tal forma que gran parte de la dinámica ecosistémica y paisajística depende de la frecuencia e intensidad con la que ocurran los incendios (Naveh, 1974). De hecho, la exposición al fuego de estos ecosistemas ha facilitado que sus especies evolucionen para ser capaces de recuperarse después de un incendio, incluso algunas especies vegetales lo utilizan para distribuir sus semillas encontrando en el fuego una forma de ampliar o variar la organización de sus poblaciones a largo plazo.

Desde hace miles de años el ser humano ha utilizado el fuego como herramienta para su propio beneficio, ordenando bosques, pastos y zonas de cultivo para su mayor aprovechamiento (McNeil, 1992). Esta distribución ha originado una heterogeneidad espacial que influye directamente en la intensidad y distribución de posteriores incendios forestales (Prosser, 1990), de origen natural o antrópico.

Siempre hemos mantenido un contacto directo con las zonas forestales; actividad agrícola/ganadera, extracción de madera, caza, etc., y ya sea por intereses puntuales o por accidentes, en las últimas décadas el porcentaje de incendios de origen antrópico es casi total y en la mayoría de los casos alcanzan unas intensidades y frecuencias mucho mayores que si hubiesen aparecido de forma natural (Mataix-Solera y Guerrero, 2008).

Junto al clima, el suelo ha sido siempre la base fundamental que sostiene la estructura de un ecosistema, por tanto, las características de este determinan la salud del entorno, la flora, la fauna y la capacidad de adaptación de la zona en cuestión. Uno o varios incendios, dependiendo de su intensidad y recurrencia, pueden afectar de muchas maneras a las características del suelo y comprender esta interacción es de vital importancia para poder llegar a conocer cómo será la recuperación del ecosistema afectado (Mataix-Solera y Cerdà, 2009).

Una parte fundamental en la conservación del ecosistema que pretende evaluar este estudio es la erosión hídrica, que está directamente relacionada con la degradación de los ecosistemas ya que es clave en el proceso de desertificación, un problema que afecta a más del 60% de los suelos del litoral Mediterráneo.

Esta situación se presenta en el Mapa Mundial de Desertificación elaborado por organizaciones como la FAO, UNESCO y OMM en 1977 señalando la vertiente Mediterránea como la única zona de Europa con “muy alto riesgo de desertificación” (Sanroque et al., 1998).

Los suelos mediterráneos, donde se lleva a cabo este estudio, presentan predominantemente un régimen hídrico xérico en la mayor parte del territorio o árido en algunas zonas. La poca profundidad que suelen tener estos suelos, poca cantidad de materia orgánica, y la propensión al sellado y al encostramiento (*Vallejo et al., 2000*) conforman suelos vulnerables a los episodios de lluvias torrenciales tan característicos de estas zonas, sobre todo tras un incendio.

El grupo de investigación *Soil Erosion and Degradation Research Group* (SEDER) ha demostrado en varios estudios realizados durante 20 años que los incendios provocan que los niveles de erosión en el suelo sean muy altos durante los años posteriores al fuego, y que gracias a la recuperación de la cubierta vegetal estos valores se normalizan acercándose a las características presentes antes de los incendios tras unos años (*Cerdà et al., 2009*).

Es importante conocer cómo afecta cualquier actuación antrópica posterior al incendio en el proceso de recuperación de un ecosistema ya que puede llegar a tener un impacto negativo incluso mayor que el del fuego en sí.

Una de las actuaciones más habituales de manejo post-incendio es la extracción de la madera quemada, este proceso se conoce comúnmente como “Saca” y los motivos por los cuales suele actuarse de esta manera son los siguientes (*Castro et al., 2009, 2010*):

- Evitar que la madera debilitada por el fuego pueda caer sobre personas o bienes.
- Reducir el riesgo de enfermedades y plagas que pueden estar asociadas a la madera quemada.
- Facilitar la posterior repoblación forestal si se decide actuar de esta manera.
- Reducir el riesgo de nuevos incendios forestales eliminando el combustible que supone la madera quemada.
- Reducir el efecto visual que provoca el incendio a su paso.

El fuego puede afectar de diversas formas a la permeabilidad de la capa superficial del suelo, y por tanto a su comportamiento hidrológico. Teniendo en cuenta que la saca de madera que se llevó a cabo en esta zona también afecta a ciertas propiedades del suelo de manera negativa sería interesante evaluar el efecto conjunto de estos dos procesos sobre el suelo frente a zonas donde no se realizó la saca, y

evaluar si un acolchado podría corregir y en qué medida los efectos negativos provocados.

De hecho, estudios realizados en esta misma zona aseguran que la extracción temprana de madera quemada sobre este tipo de suelo y lo que conlleva dicho proceso (maquinaria pesada y arrastre de troncos y ramas) afecta de forma negativa a distintas propiedades del suelo (*García-Orenes et al., 2017; Pereg et al., 2018*) y, en consecuencia, perjudica a la recuperación de la cubierta vegetal (*Jara-Navarro, 2015*).

En este estudio queremos comprobar cuál es la respuesta hidrológica de un suelo afectado por un incendio forestal dada la importancia que tiene el agua en ambientes Mediterráneos. Para ello se ha elegido el método de la lluvia simulada en campo ya que con este tipo de equipos podemos replicar la misma lluvia y de características conocidas, cuantificar infiltración, escorrentía y erosión del suelo. Como complemento se tomaron muestras para analizar en laboratorio el contenido de materia orgánica y la agregación, ya que son parámetros muy relacionados con el comportamiento hidrológico del suelo y la erosión.



2. ANTECEDENTES

El 12 de junio de 2012 se produjo un incendio en la Sierra de Mariola, a la altura de Serelles, que se mantuvo activo durante 4 días. El incendio afectó a 545,93 has de parque natural, por esta razón, al superar las 500 has se considera un gran incendio forestal (*GIF*), seis meses después se realizó una extracción de madera quemada de la zona afectada.

La zona que más se vio afectada fue la definida como Zona Especial de Conservación (ZEC), dentro de la cual entra la Zona de Especial Protección de Aves (ZEPA) y algunos parajes naturales y microrreservas botánicas de Alcoy y Cocentaina. Desde la declaración del parque natural el 8 de enero de 2002 no se había registrado un incendio de tales dimensiones.

El ayuntamiento de Alcoy contactó con el Grupo de Edafología Ambiental (GEA) de la Universidad Miguel Hernández (UMH) a través del profesor Jorge Mataix-Solera. El consistorio, y en primer término su alcalde estaban muy interesados en tener el asesoramiento de este grupo de científicos para evaluar la situación. Después de llevar a cabo varias reuniones se llegó al acuerdo de que se realizarían varios trabajos de investigación, así como actividades divulgativas. Puesto que la Consellería quería realizar un tratamiento de extracción de madera quemada en algunas áreas de la zona afectada, se consideró muy interesante estudiar qué impacto tenía dicho tratamiento en el ecosistema. Desde diciembre de 2012 hasta la fecha se han venido realizando estudios que han dado lugar a varios Trabajos de Fin de Grado ya leídos (*Jara-Navarro, 2015, Sansano, 2016, López-Caravaca, 2017*) y otros en proceso de finalización, además un trabajo de Fin de Master en curso, varias publicaciones científicas (*García-Orenes et al., 2017, Pereg et al., 2018*) y numerosas contribuciones a congresos y reuniones. También se han venido anualmente realizando actividades de divulgación con grupos de voluntariado y escolares. Todos estos trabajos se enmarcan en dos proyectos de investigación (POSTFIRE CGL2013- 47862-C2-1-R Y POSTFIRE_CARE CGL2016-75178-C2-1-R, proyectos de convocatorias de plan Nacional de I+D+I, así como varios contratos de asesoramiento y asistencia técnica entre el Ayuntamiento de Alcoy y el GEA de la UMH. Este TFG forma también parte de todos estos estudios, en este caso centrado en la respuesta hidrológica del suelo afectado.

3. OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo es sacar conclusiones sobre los efectos que puede tener el tratamiento post-incendio de Saca de madera frente a la recuperación natural del suelo atendiendo a su comportamiento hidrológico.

Para ello se recogieron muestras de suelo de ambas zonas, zonas donde se extrajo la madera quemada y zonas donde se dejó recuperar el suelo de forma natural y se llevaron al laboratorio para realizar análisis del contenido de materia orgánica del suelo y medidas de estabilidad de agregados. Por otro lado se realizaron experimentos de lluvia simulada en campo en las que se obtenían los siguientes datos: tiempo que tarda en aparecer la escorrentía, tasa de escorrentía, tasa de infiltración, y pérdida de suelo.



4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

4.1.1. Localización

La zona de estudio está situada en la Sierra de Mariola, Alcoy (38° 44' 01" N); (0° 29' 17" O), a una altitud $z = 883$ m s.n.m.

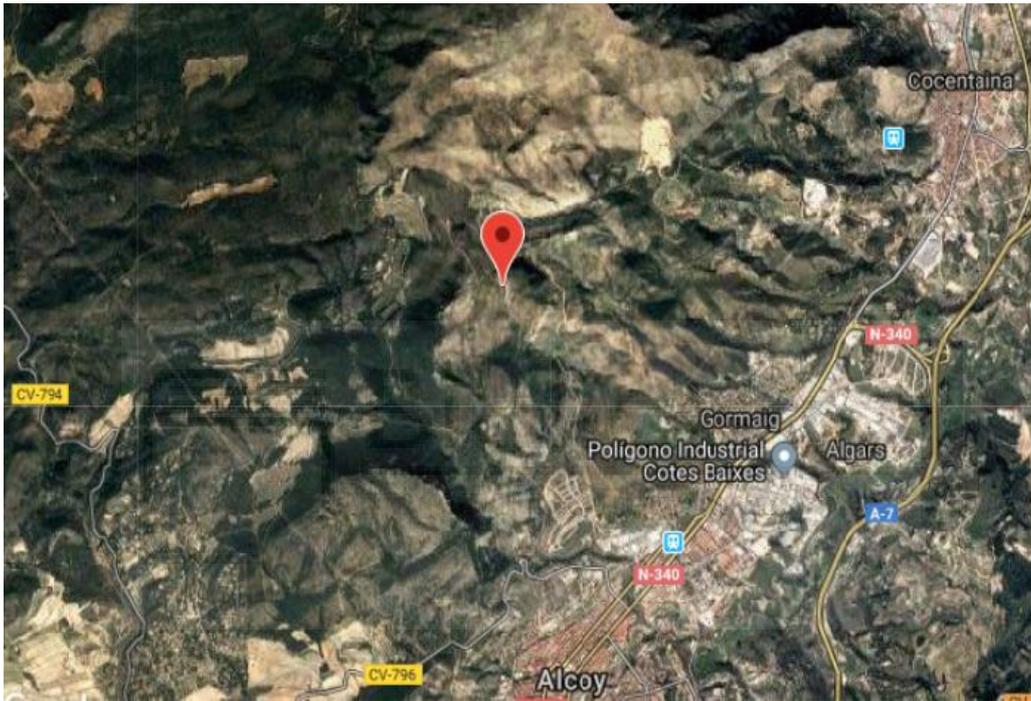


Figura 1: Zona de estudio situada en la Sierra de Mariola. (www.google.es/maps/).

Esta sierra se sitúa en la frontera de Alicante con Valencia, entre las comarcas de L'Alcoià, El Comtat y la Vall d'Albaida, siendo el final de la prolongación del Sistema Bético en la Comunidad Valenciana.

La Sierra de Mariola fue declarada parque natural por el decreto 3/2002 del 8 de enero, del Gobierno Valenciano, [2002/280] (DOGV nº 4167 de fecha 14.01.2002) englobando 17000 hectáreas.

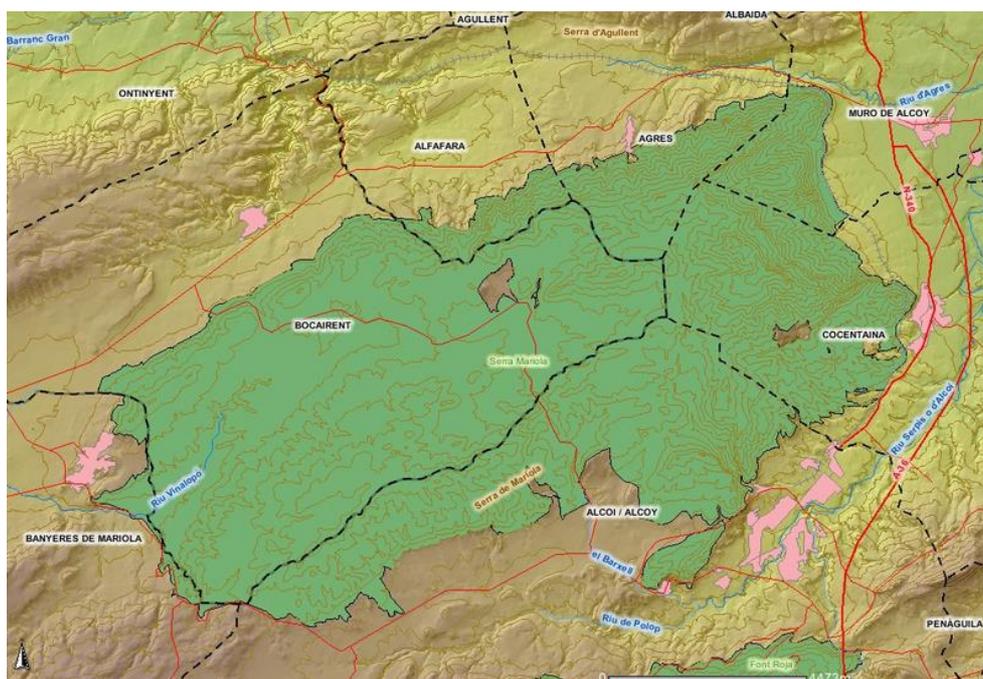


Figura 2: Mapa del parque natural de Sierra de Mariola. Fuente: <https://vaigapeu.blogspot.com>



4.1.2. Clima

En cuanto a la climatología predomina el termotipo supramediterráneo inferior, aunque se pueden encontrar zonas de supramediterráneo superior en el Montcabrer y mesomediterráneo en el barranco del Cinc.

Es una zona de contrastes muy fuertes en cuanto a la temperatura con veranos muy calurosos y secos, pudiendo alcanzar hasta los 40°C grados y bajando incluso a -15°C en invierno por encima de los 1000 m s.n.m.

En cuanto a las precipitaciones podemos clasificarlo como un ombrotipo semiseco-subhúmedo bastante irregular, 400-900 mm anuales (Figura 2).

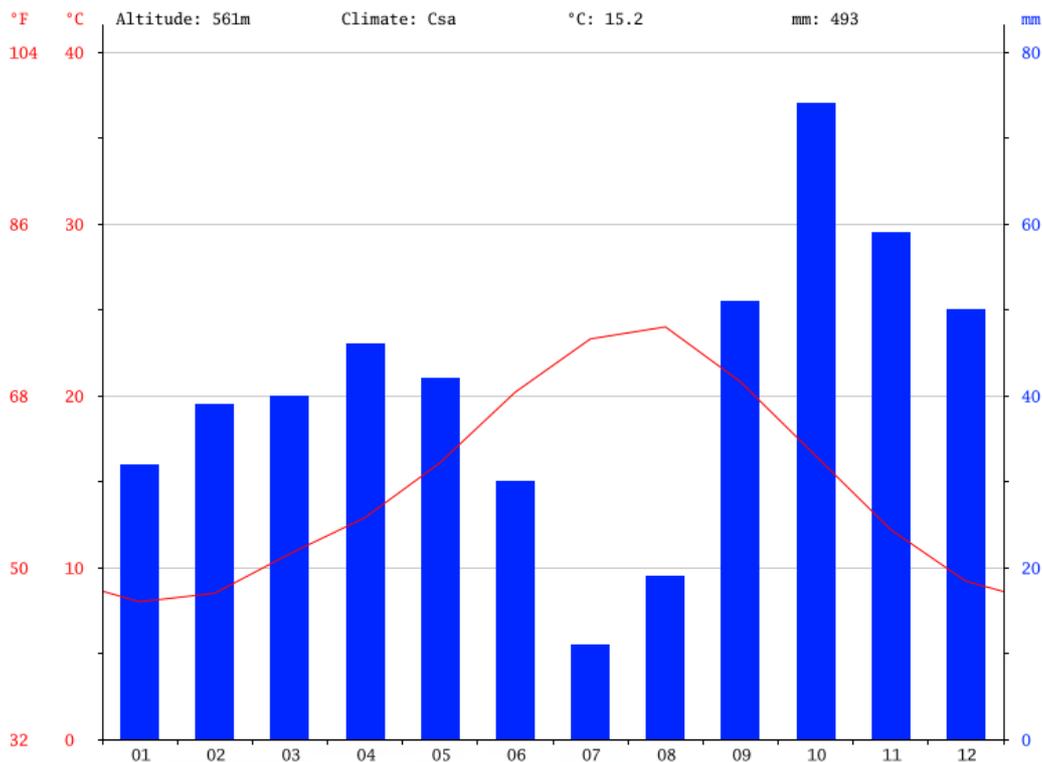


Figura 3: Climograma de Alcoi. Fuente: <https://es.climate-data.org>

4.1.3. Relieve, litología y edafología

El territorio que comprende el parque natural está formado por un mosaico de formaciones naturales y campos de cultivo, algunos de ellos abandonados hace décadas y recolonizados por vegetación con una topografía de montaña aterrazada (Jara-Navarro, 2015). Los materiales predominantes en esta zona son calcáreos, con suelos poco desarrollados sobre arenas, margas y arcillas. La unidad litológica pertenece del Cenozoico al sistema Neogeno y a la serie Mioceno (Instituto Geológico y Minero de España, <http://igme.maps.arcgis.com>).

En la zona donde se sitúan las parcelas de estudio el suelo se clasifica como Xerorthent típico (Soil Survey Staff, 2014), su perfil se muestra en la Figura 4, y está desarrollado sobre margas, tanto el material parental como el suelo presentan unas características propensas a la erosión y degradación.



Figura 4: Perfil del suelo de la zona de estudio (Xerorthent típico según la Soil Taxonomy) Autor: Jorge Mataix Solera, 2014.

Una caracterización del suelo en la zona no afectada por el fuego nos indica que este suelo tiene un 4,6% de contenido en materia orgánica en los primeros 5 cm y un 44% de carbonatos. La composición granulométrica del suelo es de 45% arena, 39% limo y 17% arcilla. Según los criterios de la USDA (United States Department of Agriculture) se clasificaría como suelo con textura franca. El pH es ligeramente alcalino (8,4) y la conductividad eléctrica baja (115,9 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

Tabla 1: Características del suelo no afectado por el incendio. Análisis de los primeros 5 cm de suelo mineral.

Materia orgánica (%)	4,60
Carbonatos (%)	44
Arena (%)	45
Limo (%)	39
Arcilla (%)	17
pH	8,4
Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	115,9

4.1.4. Vegetación

La vegetación potencial por el tipo de clima es el carrascal y el bosque mixto mediterráneo, teniendo presentes especies como el Tejo (*Taxus baccata*), la Sabina negral (*Juniperus phoenicea*), el Fresno (*Fraxinus ornus*), el Arce (*Acer opalus subsp. Granatense*), el Mostajo (*Sorbus aria*) el Quejigo (*Quercus faginea*) y el Guillomo (*Amelachier ovalis*) (Jara-Navarro, 2015).

Sin embargo, en la zona de estudio las especies predominantes son el pino carrasco (*Pinus halepensis*) y varias especies arbustivas como *Quercus coccifera*, *Rosmarinus officinalis* y *Thymus vulgaris* (más información en: Jara-Navarro, A.B. (2015). *Estudio del Impacto del Fuego y Manejo Post-Incendio sobre la Cubierta Vegetal en Serelles, Sierra de Mariola*. Trabajo fin de Grado. Elche: Universidad Miguel Hernández de Elche).

4.1.5. Extracción de madera quemada

Para la extracción de madera quemada que se realizó seis meses después del incendio en parte de la zona afectada se utilizó maquinaria pesada (Figura 5), que junto con el arrastre de troncos y ramas produjo una degradación tanto directa como indirecta de las propiedades físicas (estabilidad de agregados, densidad aparente), químicas (reducción del contenido en materia orgánica del suelo, pérdida de nutrientes) y microbiológicas (disminución de la actividad y biomasa microbiana) (García-Orenes et al., 2017; Pereg et al., 2018).



Figura 5: Maquinaria pesada utilizada para la extracción de madera quemada. Autor: Jorge Mataix-Solera, 2013.

Podemos apreciar el proceso de saca y la erosión directa del arrastre de los troncos en las Figuras 6 y 7.



Figura 6: Proceso de extracción de la madera quemada en la zona de estudio. Autor: Jorge Mataix-Solera.



Figura 7: Suelo tras la extracción de madera quemada. Autor: Jorge Mataix-Solera.

Tres años después la cobertura vegetal de las zonas donde se produjo la saca está por debajo del 50%, (*Jara-Navarro, 2015*) y las previsiones eran que el suelo seguiría degradándose por erosión y lavado de nutrientes.

Al año aproximadamente del incendio un episodio de lluvias de 50 mm en pocas horas generó altas tasas de erosión como se puede observar en las cárcavas

formadas por las zonas donde concentraba el arrastre de troncos hacia los caminos (Figura 8).



Figura 8: Cárcava producida por una lluvia torrencial pocos meses después de la extracción de madera. Autor: Jorge Mataix-Solera

4.2. DISEÑO EXPERIMENTAL

Tanto las simulaciones de lluvia como la recogida de muestras de suelo que más tarde se analizaron en el laboratorio se realizaron 3 años y medio después del incendio y 3 años después de la saca de madera, el 22 de diciembre de 2015.

4.2.1. Simulaciones de lluvia en campo

Para la simulación de lluvia en campo se seleccionaron UN total de 15 zonas: 5 parcelas Control (quemadas, donde no se realizó actuación de extracción de madera quemada), 5 parcelas Saca (donde se retiró toda la madera quemada) y 5 parcelas Mulch (parcelas en la zona de Saca en las cuales se realizó un recubrimiento superficial con acículas de pino). Este último tipo de parcela se añadió al estudio para comprobar en qué medida un tratamiento de este tipo realizado en este momento podría modificar la respuesta hidrológica del suelo.



Figura 9: Simulador de lluvia utilizado en la zona de estudio, diseñado por *Kamphorst (1987)*.

El simulador es un instrumento que nos permite evaluar los efectos que produce una lluvia idéntica y de características conocidas (cantidad de agua, intensidad, tamaño de gotas, etc..) en varias parcelas distintas, esto lo conseguimos descargando el mismo volumen de agua en cada parcela y recogiendo posteriormente el agua de escorrentía a través de un canalón.

Para intentar reproducir una lluvia natural en campo es necesario conseguir mantener ciertos parámetros en la simulación para que los resultados sean válidos.

Necesitamos reproducir una distribución por tamaño de las gotas, la velocidad de estas y, por tanto la fuerza con la que impactan en el suelo, su distribución uniforme sobre la parcela y la intensidad de la lluvia simulada.

Estos parámetros se deben reproducir siempre iguales en las distintas parcelas para poder comparar los resultados obtenidos posteriormente. En la Tabla 2 se muestran los parámetros utilizados para este estudio.

Tabla 2: Características de las simulaciones de lluvia.

Precipitación (mm)	17,68
Diámetro de las gotas (mm)	5,9
Altura de caída (cm)	40-48
Duración de la lluvia (min)	3,5
Intensidad (mm/h)	303
Energía cinética (J/m ² /mm)	4

Los parámetros que registramos al realizar las simulaciones de lluvia en el campo son los siguientes:

- **El tiempo en aparecer escorrentía:**

Consiste en medir el tiempo que tardan en salir de la parcela las primeras aguas de escorrentía a través de canalón desde el inicio de la simulación.

El suelo se encuentra seco, cuando la lluvia empieza a caer sobre él comienza a infiltrar pero dependiendo de las condiciones es posible que no a velocidad suficiente como para infiltrar toda el agua que va cayendo y comienza la escorrentía.

- **Volumen de escorrentía:**

Volumen total de agua que no ha sido infiltrada por el suelo, es el volumen recogido directamente en el recipiente que se sitúa al final del canalón.

- **Infiltración:**

Diferencia entre el volumen total de agua utilizada para la simulación de lluvia y el agua recogida en el recipiente al finalizar el proceso.

- **Peso de sólidos arrastrados por la escorrentía:**

Peso de todo el material arrastrado por la escorrentía tras la simulación. Esto se determina en el laboratorio mediante la evaporación del agua de escorrentía en la estufa a 105°C que deja el suelo seco en el recipiente. Por diferencia de peso entre Suelo + recipiente y recipiente sacamos el peso exacto del material arrastrado por la escorrentía.

Por otro lado, se recogieron 18 muestras de suelo, 9 de la zona control y 9 de la zona de saca para posteriormente analizarlas en el laboratorio. En ellas se determinó el contenido de carbono orgánico del suelo, un parámetro que influye de manera decisiva en multitud de propiedades del suelo incluida la estructura del suelo, y otro directamente relacionado con ésta última que es la estabilidad de los agregados

4.2.2. Carbono Orgánico del Suelo

Determinaremos el carbono orgánico del suelo por el método de *Walkley y Black (1934)*. El método consiste en hacer reaccionar el carbono orgánico de la muestra de suelo con un oxidante ($K_2Cr_2O_7$). Valorando la cantidad de dicromato de potasio que no ha reaccionado con Sal de Mohr ($(SO_4)_2Fe(NH)_2 \cdot 6H_2O$) y teniendo en cuenta cuánto oxidante utilizamos podremos saber directamente cuanto ha reaccionado, y por tanto la cantidad de carbono orgánico que contenía el suelo.

4.2.3. Contenido total de agregados (CTA) y Estabilidad de agregados (EA)

La determinación de la estabilidad de agregados se midió siguiendo el método de Roldán et al. (1994), basado en el método de Benito y Díaz-Fierros (1989). Este método analiza la proporción de agregados que permanecen estables después de someter la muestra de suelo (tamizada entre 4-0,25 mm) a una lluvia artificial de energía conocida (270 J m⁻²) en laboratorio. Además de la estabilidad, esta determinación nos permite conocer qué porcentaje de muestra de suelo son agregados, obteniendo el Contenido total de agregados (CTA).

4.2.4. Análisis estadístico

Los análisis estadísticos se realizaron con el programa SPSS 23 (C SPSS Inc., 1989), donde se ajustó los datos a una distribución normal para todos los parámetros que se han estudiado, verificado con el test Kolmogorov-Smirnov. Para comparar los valores de los análisis de laboratorio entre control y saca se realizó una prueba T (Student's T-Test). Las diferencias entre tratamientos para las simulaciones de lluvias en campo fueron analizadas con un test ANOVA. Para la separación de las medias fue realizado un test Post-Hoc de Tukey ($p < 0,05$) asumiendo varianzas iguales.



5. RESULTADOS

A continuación, presentamos los resultados de los datos recogidos tanto en la simulación de lluvia en campo como los análisis de laboratorio.

5.1. CARBONO ORGÁNICO

El porcentaje de carbono orgánico obtenido en los suelos control es mayor al que presentan zonas donde se actuó sacando la madera quemada, la diferencia es significativa ($P < 0,05$).

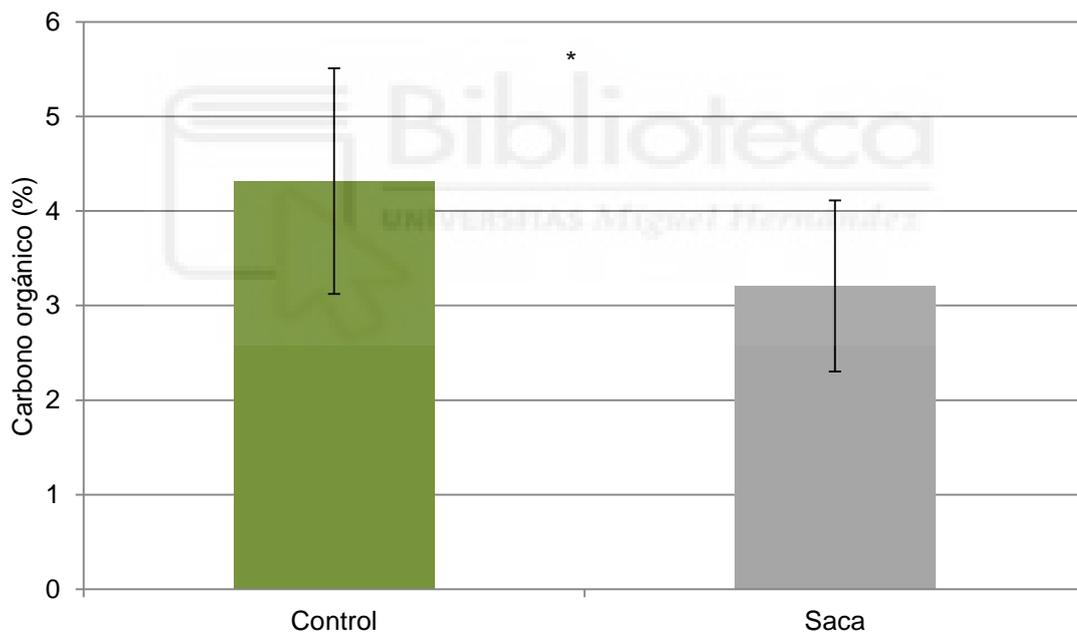


Figura 10: Porcentaje carbono orgánico del suelo. Los asteriscos indican diferencias significativas entre los valores de control y saca (* $P < 0,05$; ** $P < 0,005$; *** $P < 0,001$), ns: no significativa.

5.2. CONTENIDO TOTAL DE AGREGADOS (CTA) Y ESTABILIDAD DE AGREGADOS (EA)

En las figuras 11 y 12 mostramos los resultados del CTA y la EA.

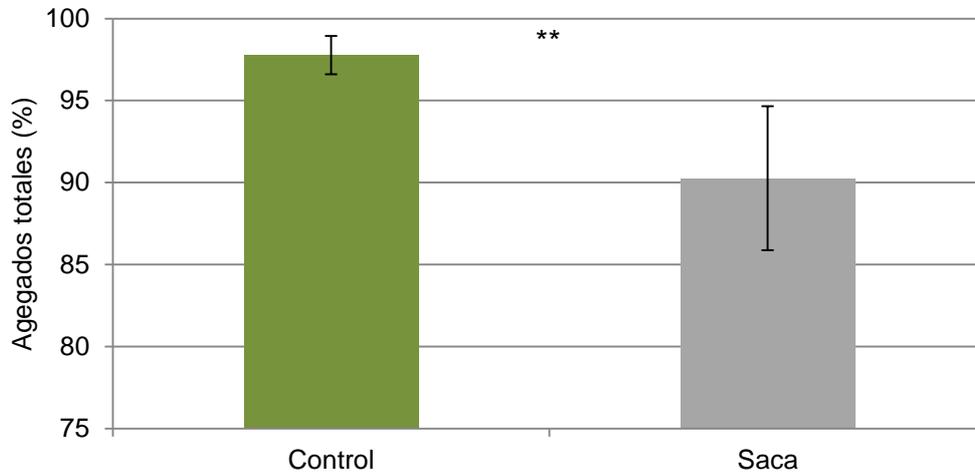


Figura 11: Contenido Total de Agregados (CTA), en porcentaje sobre muestra de suelo. Los asteriscos indican diferencias significativas entre los valores de control y saca (* $P < 0,05$; ** $P < 0,005$; *** $P < 0,001$), ns: no significativa.

En la Figura 11 se aprecia la pérdida de agregados totales que ha sufrido la zona donde se extrajo la madera en comparación los que mantiene el suelo que se recuperó de forma natural.

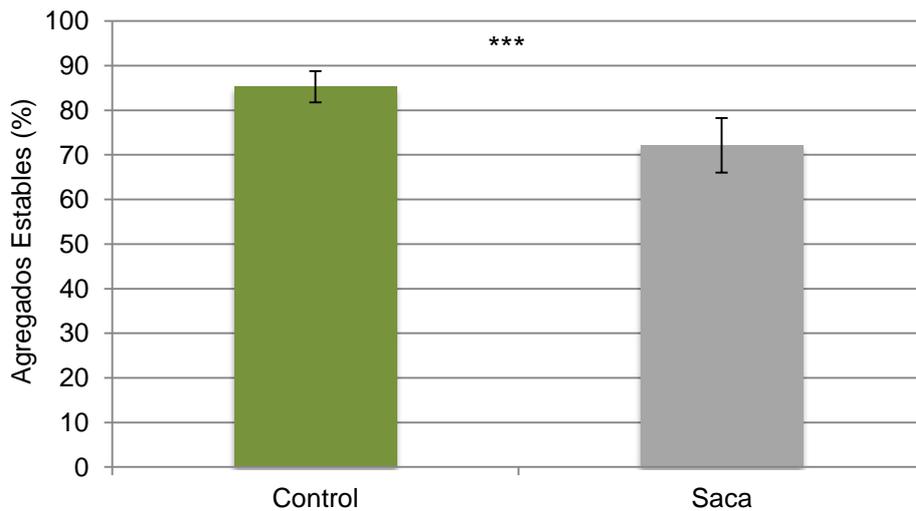


Figura 12: Porcentaje de agregados estables respecto a los agregados totales Los asteriscos indican diferencias significativas entre los valores de control y saca (* $P < 0,05$; ** $P < 0,005$; *** $P < 0,001$), ns: no significativa.

Podemos observar que las zonas que experimentaron una recuperación natural después del incendio presentan un mayor porcentaje de agregados estables frente a las zonas donde se extrajo la madera quemada. Independientemente de la diferencia entre ambos suelos, el porcentaje obtenido donde se extrajo la madera es más alto de lo que cabría esperar.

5.3. SIMULACIONES DE LLUVIA EN CAMPO

Los resultados aportados por las simulaciones de lluvia en el campo son los siguientes:

5.3.1. Tiempo en aparecer la escorrentía

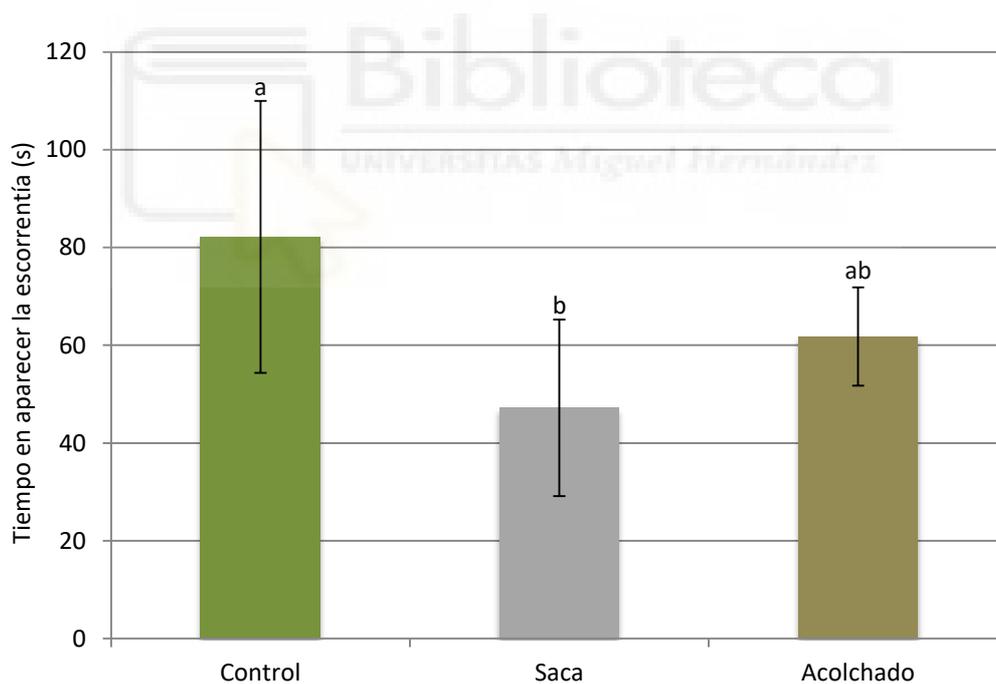


Figura 13: Tiempo que tarda en aparecer la escorrentía desde el comienzo de la simulación lluvia (s). Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos ($P < 0,05$)

En la Figura 13 se puede observar que la zona donde se genera más rápidamente un flujo de agua superficial durante la lluvia es donde se produjo la extracción de madera (Saca), mientras que la parcela Control es con diferencia la que más agua retiene en los primeros instantes de lluvia tardando casi el doble de tiempo en aparecer la escorrentía. En la parcela del Acolchado se aprecia una mejora en los valores medios frente a la parcela de suelo desnudo, aunque las diferencias con la saca no son estadísticamente significativas debido a la variabilidad de los datos registrados (Figura 13).

5.3.2. Escorrentía total

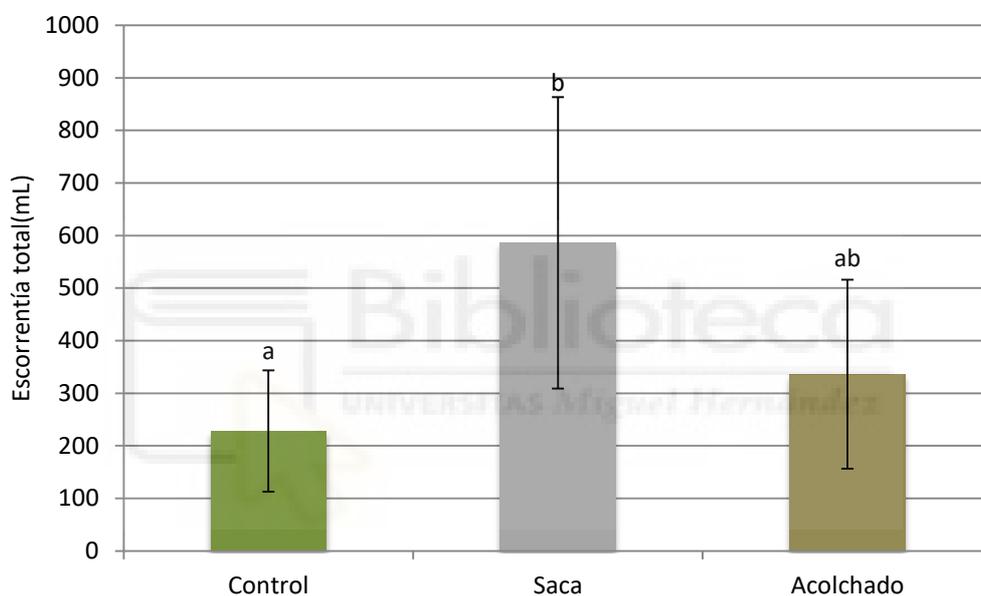


Figura 14: Escorrentía total recogida durante la simulación de lluvia (mL). Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos ($P < 0,05$)

La escorrentía total recogida durante las simulaciones de lluvia en campo se muestra en la gráfica de la Figura 14. Se puede apreciar una clara diferencia en los valores medios entre las parcelas. En las parcelas Control superan tímidamente los 200 mL mientras que en las parcelas Saca el valor roza los 600 mL. Las acículas de pino reducen esta cantidad en zonas donde se extrajo la madera quemada, aunque al igual que en el tiempo en aparecer escorrentía los valores son muy variables.

5.3.3. Infiltración

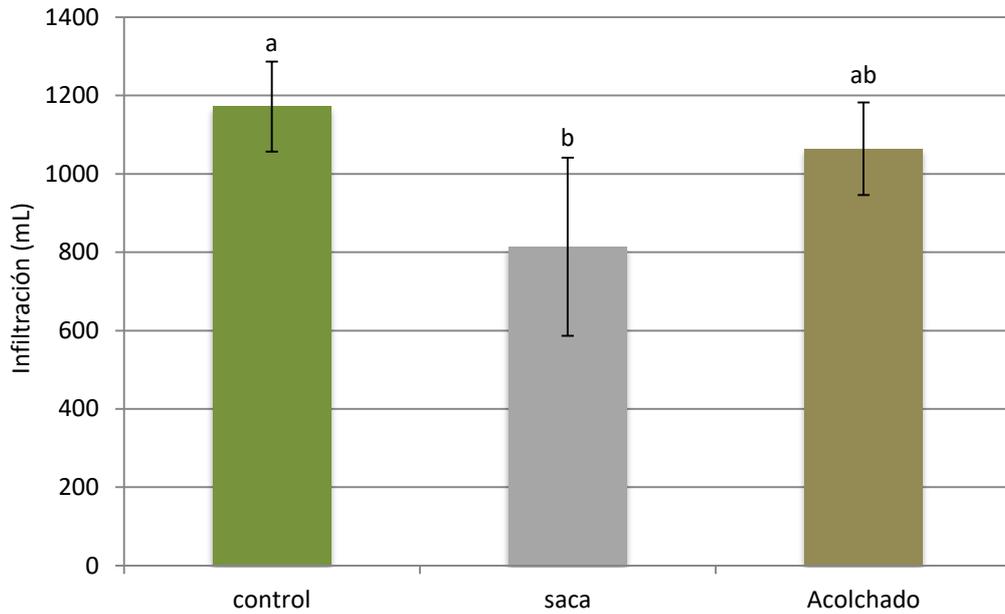
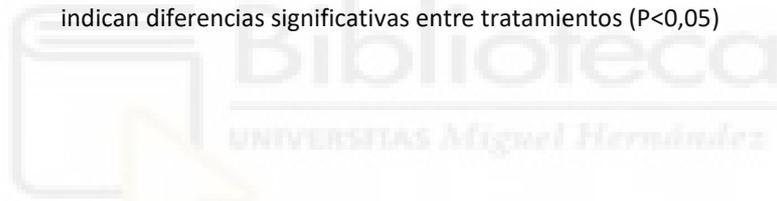


Figura 15: Cantidad de agua infiltrada en el suelo durante la simulación de lluvia (mL). Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos ($P < 0,05$)



En la Figura 15 exponemos los resultados de la infiltración del agua en el suelo. De los 1400 mL utilizados en la simulación de lluvia, las parcelas que representan una recuperación natural del entorno después de un incendio (control) recogen casi 1200 mL frente a los 800 mL escasos que se infiltran en zonas donde se extrajo la madera, una vez más observamos que las parcelas Saca cubiertas por un Mulch de acículas de pino (Acolchado) palian un poco los efectos de la saca de madera.

5.3.4. Erosión (pérdida de suelo)

En la gráfica de la Figura 16 presentamos los resultados de la erosión producida por la simulación de lluvia, kg de suelo arrastrados por m². Una vez más podemos comprobar la gran diferencia entre las parcelas, la pérdida de suelo en las parcelas de Saca se acerca a los 100 g, mientras que en las parcelas de Control y Acolchado no llega a 10 g. Hay que destacar también la alta variabilidad encontrada en las parcelas de saca.

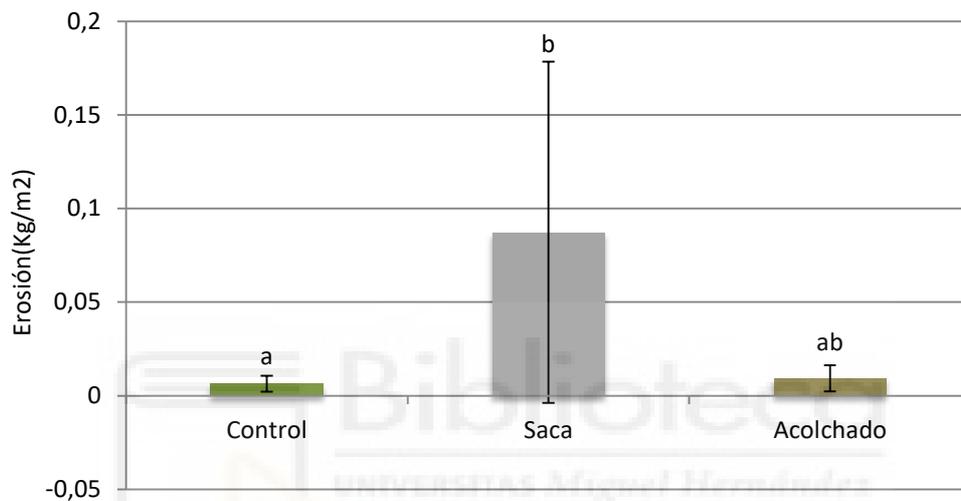


Figura 16: Erosión provocada por la simulación de lluvia (Kg/m²). Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos ($P < 0,05$)



Figura 17: Simulaciones de lluvia en las parcelas de la zona de estudio, Serelles, Alcoi.

6. DISCUSIÓN

El tema que aborda este estudio lleva generando debate bastante tiempo sobre cómo se debería gestionar un área forestal afectada por un incendio reciente para garantizar, en la medida de lo posible la recuperación de las propiedades edáficas perturbadas por este (*Beschta et al., 2004*). En concreto este estudio pretende abordar la controversia sobre este tipo de actuación, muy utilizada a la hora de gestionar una zona afectada por un incendio, la saca de madera quemada.

En las últimas décadas varios estudios han manifestado en sus resultados y conclusiones las consecuencias negativas que puede llegar a producir este método en la recuperación del ecosistema, empezando por las propiedades edáficas (*Castro et al., 2010, 2011*).

En este estudio los resultados siguen apoyando esta posición sobre el manejo de la madera quemada como tratamiento post-incendio. Es indiscutible, viendo los resultados, que en cuanto a la estabilidad de agregados y la erosión, la extracción de madera después del incendio era una mala elección en la gestión de esta zona, las consecuencias son claramente negativas si comparamos estas parcelas con las establecidas en zonas donde el suelo se recuperó de manera natural.

Cabe destacar, después de ver los resultados la función positiva del acolchado de acículas de pino que se propuso en 5 de las 15 parcelas que se expusieron a una simulación de lluvia.

La idea principal de esta propuesta era la de comprobar si un Mulch podría paliar los efectos de la erosión y la limitada infiltración que se intuía que podría tener las zonas donde se extrajo la madera quemada, y los resultados han sido los esperados. Se aprecia claramente que, sin llegar a las condiciones que tiene el suelo en las parcelas Control, mejoran bastante estos parámetros en la simulación de lluvia, incluso en el análisis de la erosión, prácticamente igualan a las parcelas Control. Hace algunos años las pocas desventajas que se encontraban en el Mulching como tratamiento post-incendio eran su coste y la posibilidad de que en el material utilizado como Mulch pudiese contener semillas de plantas invasoras (*Bautista et al., 2009*), pero en este estudio se utilizaros acículas de pino, especie presente en la zona, y de un coste económico bastante reducido.

Estudiando los resultados, y centrándonos en los efectos de cubrir el suelo desnudo con un Mulch de acículas de pino, podemos incluso sacar más conclusiones sobre por qué no es una buena gestión retirar la vegetación quemada tras un incendio. Las estructuras de madera o vegetación quemada por el incendio protegen de una pérdida de suelo directa; cubren la superficie del suelo protegiéndola del impacto de

las gotas de agua, causa directa de la rotura de agregados, también reduce la velocidad del agua cuando se produce la escorrentía y esto reduce su poder erosivo, y por último, puede reducir el impacto del viento en la superficie del suelo, reduciendo así otro tipo de pérdida de suelo que no se evaluó en este estudio (Úbeda y Sola, 1996).

Los resultados del estudio sobre los agregados nos muestran que donde se produjo la saca el contenido total de agregados es menor, lo cual ya nos indica que durante estos años ha habido procesos erosivos que han removilizado parte del suelo. Por otro lado la estabilidad de los que hay es también menor, por ende la cantidad de agregados que pueden separarse por el impacto de la lluvia (agregados inestables) asciende considerablemente si lo comparamos con el suelo recuperado de forma natural. Al colocar una capa de acículas de pino sobre el suelo pobre en agregados estables se reduce el impacto directo de la mayoría de las gotas de la lluvia, como ocurriría con los restos de vegetación quemados si no se hubiesen extraído, eliminando de esta manera la causa más directa de la rotura de agregados, y en consecuencia reduciendo también la pérdida de suelo arrastrado posteriormente por la escorrentía.

La estabilidad de agregados es uno de los parámetros que más correlacionado está con la pérdida de suelo por erosión y la capacidad de infiltración (Guerrero, 2003). Tras un incendio suele desaparecer gran parte de la cubierta vegetal que es la mayor fuente de materia orgánica que recibe el suelo y una de las bases fundamentales para poder conformar la estabilidad de los agregados.

Por estas razones cabría esperar, después de un incendio y de analizar los resultados de la simulación de lluvia en campo, que el porcentaje de agregados estables fuese menor en las zonas de saca frente a las de recuperación natural, y efectivamente así lo muestran los resultados.

El porcentaje de agregados estables frente a los agregados totales que encontramos en zonas donde se extrajo la madera es algo más de un 13% por debajo del que encontramos en áreas de regeneración natural. Por tanto es lógico que encontremos más erosión en la zona de saca de madera, ya que además de haber menos protección por parte de la vegetación, al haber menos cobertura vegetal, el suelo de por sí se encuentra en peores condiciones para resistir el impacto de las gotas de lluvia sin fragmentarse en agregados más pequeños.

A pesar de que el estudio estaba enfocado a valorar la diferencia de los resultados entre ambos tratamientos conviene destacar que los valores de estabilidad de agregados que encontramos en zonas donde se intervino con la extracción de madera, son más elevados de lo que esperábamos.

Una posible explicación coherente sobre el elevado porcentaje de agregados estables que presenta el suelo donde se sacó la madera es la pérdida de agregados

inestables en lluvias previas, vientos o cualquier interacción erosiva del suelo con su entorno desde que se produjo el incendio y la saca hasta el día que se recogieron las muestras (Guerrero, 2003).

Otra posible explicación podría ser la presencia de sustancias hidrófobas, que suele aumentar en suelos quemados y aumentan la estabilidad de los mismos (Mataix-Solera y Doerr, 2004). Sin embargo en la zona de Mariola, los estudios que se han llevado a cabo mostraron que no había repelencia al agua en el suelo en esta zona (García-Orenes et al., 2017).

Debemos tener en cuenta también que la materia orgánica no es el único factor que puede favorecer la formación y estabilización de agregados, hay sustancias presentes en determinados suelos que pueden actuar también como agentes cementantes (carbonatos, arcilla, óxidos de hierro y aluminio, etc.) evitando de esta manera la ruptura de los agregados ante el impacto de las gotas (Mataix-Solera et al., 2011). En cualquier caso el efecto de la materia orgánica se observa ya que hay mayor agregación en la zona donde hay más materia.



7. CONCLUSIONES

Haciendo un balance de todos los resultados obtenidos podemos afirmar que 3 años después del incendio, las diferencias en las características del suelo en el que se intervino extrayendo la madera y del que se dejó recuperar sin intervención antrópica son importantes. Existen diferencias en la agregación del suelo y el contenido de materia orgánica, siendo estos más bajos en la zona donde se extrajo la madera quemada.

Las simulaciones de lluvia en campo, que puede ser de los test realizados el más directo y el más práctico a la hora de determinar el comportamiento del suelo frente al factor ambiental que más puede afectar al suelo (la lluvia), nos da una clara visión de las diferencias todavía presentes entre los dos tipos de recuperación del suelo. En parámetros como la escorrentía y la erosión la diferencia es importante, mientras que en el tiempo que tarda en aparecer la escorrentía, aun existiendo diferencias no son tan significativas.

Las parcelas con mulch que se propusieron (cubriendo el suelo desnudo por la saca con acículas de pino) han demostrado que uno de los problemas más evidentes en la zona por la extracción de madera es la falta de vegetación o restos de esta, muerta o viva, que amortigüe el impacto de las gotas, y retenga el agua caiga por la lluvia, tanto para mejorar la tasa de infiltración como para evitar que la escorrentía alcance más velocidad y fuerza y pueda incrementar la erosión a su paso. En todos los parámetros medidos, las parcelas con mulch han acercado los resultados del suelo desnudo al de las parcelas control, en especial en la cantidad de suelo arrastrado por la escorrentía, dando también a entender que la rotura de agregados por impacto de la lluvia es uno de los motivos más importantes que provocan la pérdida directa de suelo.

En conclusión, casi 3 años después de la extracción de madera quemada todavía se aprecian las consecuencias negativas en cuanto a pérdida de suelo y agua como consecuencia de haber actuado de esta manera. La aplicación de un acolchado ayudaría a paliar estos procesos degradativos que todavía persisten.

8. PROYECCIÓN FUTURA

Dados los resultados de este, y otros tantos estudios realizados en esta misma zona sobre las consecuencias que tiene la extracción temprana de madera quemada, debería estudiarse más cada caso antes de actuar así. Tener en cuenta el tipo de suelo y la climatología de la zona afectada por el incendio es clave para poder determinar el mejor método de actuación (muchas veces es mejor no actuar) ya que las consecuencias puede ser peores que las que provoca el propio fuego.

En referencia a la zona de estudio en concreto, consideramos que las condiciones climáticas, la relativa cercanía a una población, la situación concreta de haberse realizado la extracción de madera solo en una parte de la zona quemada, y la cantidad de estudios que se han realizado y se están realizando en ella es un buen recurso para seguir investigando sobre este tema, probar nuevos tratamientos de mejora de las condiciones del suelo y sacar nuevas conclusiones y poder entender mejor nuevos episodios similares en otros lugares.

Los resultados aportados por la idea de cubrir las zonas más desprotegidas con un mulch nos recuerdan la buena herramienta que esto supone como freno a la degradación para evitar la pérdida de suelo en un caso similar tras un incendio. Esta estrategia podría ser más útil si se realizase inmediatamente después de realizar la extracción de madera quemada, pero se necesitan más estudios para comprobar su efectividad.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Aguilera-García, G.F. (2017). *Estudio de la evolución temporal a corto plazo del manejo post-incendio sobre las propiedades biológicas del suelo*. Trabajo fin de Grado. Elche: Universidad Miguel Hernández de Elche.
- Bautista, S., Robichaud, P.R., Bladé, C. (2009). Fire effects on soils and restoration strategies. *Post-Fire Mulching*, Capítulo 13, 353-372.
- Beschta, R. L., Rhodes, J. J., Kauffman, J. B., Gresswell, R. E., Minshall, G. W., Karr, J. R., Frissell, C. A. (2004). *Postfire management on forested public lands of the western united states*. *Conservation Biology*, 18(4), 957-967.
- Castro, J., Leverkus, A.B., Marañón-Jiménez, S., Serrano-Ortiz, P., Sánchez-Cañete, E.P., Reverter, R., Guzmán-Álvarez, J.R. y Kowalsky, A.S. (2013). *Efecto del manejo de la madera quemada sobre la restauración y regeneración post-incendio: implicaciones para la gestión y para el conjunto del ecosistema*.
- Castro, J., Marañón-Jiménez, S., Sánchez-Miranda, A., Lorite, J. (2010). *Efecto del manejo de la madera quemada sobre la regeneración forestal post-incendio: desarrollo de técnicas blandas de restauración ecológica*. Pp. 139-157 en Ramírez, L. y Asensio, B. (eds.) *Proyectos de investigación en parques nacionales 2006-2009*. Organismo Autónomo de Parques Nacionales.
- Castro, J., Navarro, R., Guzmán, J.R., Zamora, R., Bautista, S. (2009). *¿Es conveniente retirar la madera tras un incendio forestal? Una práctica forestal poco estudiada*. *Revista Quercus* 281, 34-41.
- Castro, J., Sánchez-Miranda, A., Lorite, J., Zamora, R. (2008). *Efectos de los tratamientos silvícolas post-incendio relacionados con la madera quemada sobre el establecimiento de plantones de Juniperus communis L. en la alta montaña mediterránea*. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales* 28, 31-36.
- Cerdà, A., Mataix-Solera, J. (2009). *Efectos de los incendios forestales sobre los suelos en España. El estado de la cuestión visto por los científicos españoles*. Càtedra de Divulgació de la Ciència. Universitat de València, 529pp.
- Foggin, G. T., III, Debano, L. F. (1971). *Some geographic implications of water-repellent soils*. *Professional Geographer*, 23(4), 347-350
- Francos, M., Pereira, P., Alcañiz, M., Mataix-Solera, J. and Úbeda, X. (2016). *Impact of an intense rainfall event following a wildfire in a Mediterranean environment (North-East Spain)*. *Science of The Total Environment*, 572, 1353-1362.
- Francos, M., Pereira, P., Alcañiz, M., Úbeda, X. (2018). *Post-wildfire management effects on short-term evolution of soil properties (Catalonia, Spain, SW-Europe)*. *Science of the Total Environment*, 633, 285-292.
- García-Orenes F., Arcenegui V., Chrenková K., Mataix-Solera J., Moltó J., Jara-Navarro A.B., Torres M.P., (2017). *Effects of salvage logging on soil properties and*

- vegetation recovery in a fire-affected Mediterranean forest: A two years monitoring research. *Science of the Total Environment* 586, 1057-1065.
- Giovannini, G., Lucchesi, S., & Cervelli, S. (1983). *Water-repellent substances and aggregate stability in hydrophobic soil*. *Soil Science*, 135(2), 110-113.
- Giovannini, G., Lucchesi, S. (1983). *Effect of fire on hydrophobic and cementing substances of soil aggregates*. *Soil Science*, 136(4), 231-236.
- Gomez-Rey, M.X., Couto-Vasquez, A., Garcia-Marco, S., Gonzalez-Prieto, S.J., (2013). Impact of fire and post-fire management on soil chemical properties. *Geoderma*, 195-196, 155–164.
- Guerrero Lucendo, A. (2003) *Erosión potencial en suelos quemados*. Prácticum. Elche. Universidad Miguel Hernández de Elche.
- Jara-Navarro, A.B. (2015). *Estudio del Impacto del Fuego y Manejo Post-Incendio sobre la Cubierta Vegetal en Serelles, Sierra de Mariola*. Trabajo fin de Grado. Elche: Universidad Miguel Hernández de Elche.
- Lindenmayer, D.B.; Burton, P.J.; Franklin, J.F. (2008). *Salvage logging and its ecological consequences*. Island Press, Washington.
- MacDonald, L.H., Larsen, I.J. (2009). Effects of forest fires and post-fire rehabilitation: a Colorado case study. En: *Restoration strategies after forest fires*. (A. Cerdá P. Robichaud, eds.). Science Publishers, p. 423 -452.
- López-Caravaca A. (2017). Evaluación y evolución de las propiedades del suelo por el efecto de la saca de madera en un bosque mediterráneo tras sufrir un incendio. Trabajo de fin de grado (Ciencias Ambientales), Universidad Miguel Hernández.
- Mataix-Solera, J., Arcenegui V., Cerdà, A., García-Orenes, F., Moltó, J., Chernková, K., Torres P., Lozano, E., Jimenez-Pinilla, P., Jara Navarro, A.B. (2015). *Estudio del impacto del fuego y tratamientos post-incendio. Zona de Serelles (Sierra de Mariola)*. Grupo de Edafología Ambiental. Departamento de Agroquímica y Medio Ambiente, Universidad Miguel Hernández (UMH). EGU2015-2111-2, 2015.
- Mataix-Solera, J., Cerdà, A., Arcenegui, V., Jordán, A., Zavala, L.M., 2011. Fire effects on soil aggregation: A review. *Earth-Science Reviews* 109.
- Mataix-Solera, J., & Doerr, S. H. (2004). *Hydrophobicity and aggregate stability in calcareous topsoils from fire-affected pine forests in southeastern Spain*. *Geoderma*, 118 (1-2), 77-88.
- Mataix-Solera, J., Guerrero, C., Úbeda, X., Outeiro, L., Torres, M.P., Cerdà, A., Bodí, M.B., Arcenegui, V., Zornoza, R., Gómez, I., Mataix-Beneyto, J., (2007). *Incendios forestales, suelos y erosión hídrica*. Caja Mediterráneo CEMACAM Font Roja-Alcoi © 2007. Jorge Mataix-Solera © 2007. ISBN: 978-84-7599-194-8. A-1095-2007.
- Mataix-Solera, J., Guerrero, C., García-Orenes, F., Bárcenas, G.M. y Torres, M.P. (2009). *Forest fire effects on soil microbiology*. En: Cerdà, A. y Robichaud, P.R. (Eds.)

- Fire effects on soils and restoration strategies. Science Publishers, Enfield, 133 – 176.
- Mclver, J.D., Starr, L., (2000). *Environmental effects of post-fire logging: literature review and annotated bibliography*. USDA Technical Report PNW-GTR-486.
- Mclver, J. D., & Starr, L., (2000). *Environmental effects of postfire logging: Literature review and annotated bibliography*. USDA Forest Service - General Technical Report PNW, (PNW-GTR-486), 1-72.
- McNeil, J. (1992). *The mountains of the Mediterranean world. An environmental history*. Cambridge University Press, 423pp.
- Naveh, Z. (1974). *Effects of fire in the Mediterranean region*. En T.T. Kozlowski y C.E. Ahlgren (Eds.), *Fire and ecosystems*, 401 – 434, Academic Press, New York.
- Pereg, L., Mataix-Solera, J., McMillan, M., García-Orenes, F. (2018). The impact of post-fire salvage logging on microbial nitrogen cyclers in Mediterranean forest soil. *Science of the Total Environment*, 619-620, 1079-1087.
- Prosser, I. (1990). *Fire, humans and denudation at wangrah creek, southern tablelands, N.S.W.* Australian Geographical Studies, 28, 77-95.
- Robichaud, P.R., Ashmun, L.E., (2013). Tools to aid post-wildfire assessment and erosion-mitigation treatment decisions. *Int. J. Wildland Fire* 22, 95 – 105.
- Sansano Anaya, M., (2016). Evaluación del uso de la glomalina como indicador del impacto del fuego y el manejo post-incendio. Trabajo de Fin de Grado (Ciencias Ambientales). Universidad Miguel Hernández
- Sanroque, P., Rubio, J.L., Izquierdo, L. (1998). Estudio mediante un simulador de lluvia del comportamiento de suelos de Valencia (España) frente a los procesos de erosión por escorrentía y salpicadura. C.S.I.C.-Generalitat Valenciana. 1257-1267.
- Úbeda, X., & Mataix-Solera, J. (2008). *Fire effects on soil properties: A key issue in forest ecosystems*. *Catena*, 74(3), 175-176.
- Ubeda, X., & Sala, M. (1996). *Changes in the soil physics and increase of runoff and erosion after forest fires*.
- Vallejo, V.R., Bautista, S., Cortina, J. (2000). Restoration for soil protection alter disturbances. En: Trabaud, L. (Ed.) *Life and environment in mediterranean*, capítulo 9. With Press, Southampton, 301-343.

10. PÁGINAS WEB

Agrupación Contra Incendios Forestales Alcoy
www.acifalcoi.com/meteorologia/meteoclimatic

Generalitat Valenciana: Conselleria de Agricultura, Medio Ambiente, Cambio Climático y Desarrollo Rural. Sierra de Mariola.

<http://www.agroambient.gva.es/es/web/espacios-protegidos/parque-natural-de-la-serra-mariola>

Instituto Geológico y Minero de España, <http://igme.maps.arcgis.com>

Memorias de Gestión “*Parc Natural de la Serra de Mariola*”. 2008, 2009, 2010, 2011, 2012. Conselleria d’ Infraestructures, Territori y MediAmbient
www.citma.gva.es

Parque Natural de la Sierra de Mariola. Información y Normativa. Resumen de PRUG y PORN y Estudio del Medio.

<http://parquenaturalsierrademariola.blogspot.com/p/características.html>

Red de Estaciones Meteorológicas Automáticas No Profesionales
www.meteoclimatic.net

Banyeres de Mariola - www.meteoclimatic.net/perfil/ESPVA0300000003450A

Alcoy - www.meteoclimatic.net/perfil/ESPVA0300000003801B

Alcoy - www.meteoclimatic.net/perfil/ESPVA0300000003802C

Cocentaina – Penella - www.meteoclimatic.net/perfil/ESPVA0300000003870A

Worldwide Bioclimatic Classification System. Phytosociological Research Center.
www.globalbioclimatics.org

Alcoy (N3842–W00028/562) - www.globalbioclimatics.org/station/es-alcoy.htm

Cocentaina (N3845–W00026/434) - www.globalbioclimatics.org/station/es-cocen.htm

