



**Universidad**  
Zaragoza

# Trabajo Fin de Grado

Erosión laminar post-incendio en Fornillos de  
Apiés (Huesca): riesgo teórico versus erosión actual.

Post Fire Interrill Erosion in Fornillos de Apiés:

Estimated Risk Versus Real Erosion.

Autor

Alejandro Gracia Benito

Director/es

Oriol Ortíz Perpiñá

Antonio Girona García

Grado en Ciencias Ambientales

Escuela Politécnica Superior de Huesca

2017



## Agradecimientos

Estas líneas van dedicadas a todas aquellas personas que en mayor o menor medida han contribuido, directa o indirectamente, a la realización del presente Trabajo Fin de Grado.

Me gustaría dar las gracias a mi familia, en especial a mis padres José Luis y María Pilar, por su dedicación y constante apoyo.

A mis directores, Oriol Ortiz y Antonio Girona, por su esfuerzo y dedicación.

A Pilar y David, por su imprescindible ayuda durante la realización del muestreo de campo.

A todos los profesores y compañeros que me han acompañado a lo largo del Grado en Ciencias Ambientales.

Gracias.



## Resumen

El 10 de agosto de 2016 se produjo un incendio en el término municipal de Fornillos de Apiés, Huesca, donde más de 400 hectáreas fueron calcinadas. El presente estudio se centra en medir la tasa de erosión en una de las laderas afectadas por el incendio, caracterizando los materiales sujetos a erosión y evaluar las tasas de erosión laminar real y potencial, estimadas a partir de modelos de uso frecuente (USLE y ERMiT). Para evaluar la tasa de erosión, se delimitaron 6 microparcelas, de 1,5 x 0,5 m, instalando una trampa Gerlach en cada una de ellas, que permitía recoger los sedimentos arrastrados en cada episodio de lluvia. Se obtuvieron así las tasas de erosión y, posteriormente, mediante calcinación, el porcentaje contenido de materia orgánica arrastrada. A su vez, se llevó a cabo una monitorización de la regeneración natural post-incendio en la zona de estudio. La tasa real de erosión en la zona de estudio ha sido de 20,81 Mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, más del doble que lo estimado por las tasas de los modelos U.S.L.E. (8,11 Mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>) y ERMiT (9,39 Mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>). Se ha determinado que el régimen de lluvias durante el periodo de estudio, con elevada tormentosidad, es un factor muy condicionante en la erosión. A su vez, la abundancia de la vegetación regenerada limita el poder erosivo de las lluvias al final del periodo.

### Palabras clave:

Erosión laminar, Gerlach, regeneración vegetal, riesgo teórico.

## Abstract

On August 10, 2016, a fire broke out in the municipality of Fornillos de Apiés, Huesca, where more than 400 hectares were burnt. The present study focuses on measuring the erosion rate in one of the hillsides affected by the fire, by characterizing the materials subject to erosion and evaluating the actual and potential interrill erosion rates, estimated by frequently used models (USLE and ERMiT). In order to quantify the erosion rates, 6 microplots of 1.5 x 0.5 m were delimited, installing a Gerlach trap in each of them, to collect the sediments carried away by each rain event. Thus, the erosion rates were obtained and, subsequently, by calcination, the proportion of eroded organic matter was measured. In turn, post-fire vegetation natural regeneration monitoring was carried out in the study area. The actual erosion rate in the study area has been 20.81 Mg ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>, more than double that estimated by the U.S.L.E. (8.11 Mg ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>) and ERMiT (9.39 Mg ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>) models. It has been proposed that the rainfall regime along the monitoring period, as well as the intense storms are a very important factor in erosion. Furthermore, vegetation recovery limits the erosive power of rainfall at the end of the study period.

### Key words:

Interrill erosion, Gerlach, plant regeneration, estimated risk

## INDICE DE CONTENIDOS

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>12</b>
1.1 Los incendios como parte de la historia .....	12
1.2 El fuego, de regenerador a destructor.....	12
1.3 Impacto medioambiental de los incendios forestales .....	14
1.4 Erosión laminar.....	17
1.5. Modelos para el cálculo de las tasas teóricas de erosión.....	18
1.5.1. Modelo U.S.L.E.....	18
1.5.2. Modelo ERMiT .....	19
1.6 Objetivos .....	20
1.6.1 Objetivo general.....	20
1.6.2 Objetivos específicos .....	20
<b>2. MATERIAL Y METODOS.....</b>	<b>22</b>
2.1. Descripción del área de estudio .....	22
2.1.1. Localización .....	22
2.1.2. Geología y geomorfología.....	23
2.1.3 Características de los suelos .....	23
2.1.4. Clima .....	25
2.1.5. Vegetación.....	27
2.1.6. Incendio forestal de Fornillos de Apiés.....	28
2.2. Diseño experimental .....	28
2.2.1. Selección del área de estudio .....	28
2.2.2. Medición de la erosión .....	29
2.2.3 Colocación de los Gerlach .....	30
2.3. Recogida y preparación de las muestras. ....	31
2.3.1 Recogida de muestras en campo.....	31
2.3.2 Preparación de las muestras en el laboratorio .....	31
2.3.3. Monitorización de la vegetación .....	32
2.3.3 Organización del set de datos.....	32
2.4. Análisis estadístico .....	33
2.5. Modelos de estimación de las tasas teóricas de erosión.....	34
2.5.1. Modelo ERMiT .....	34
2.5.2. Modelo U.S.L.E.....	35

<b>3. RESULTADOS</b> .....	<b>36</b>
3.1. Cuantificación de la pérdida de suelo por erosión laminar anual y por episodio de lluvias.....	36
3.1.1. Correlaciones entre variables .....	37
3.1.2. Tasa de erosión anual en cada trampa Gerlach.....	37
3.1.3. Diferencias entre tratamiento .....	39
3.1.4. Tasa de erosión por cada episodio de lluvia por tratamiento.....	41
3.2. Cuantificación de la cantidad de materia orgánica arrastrada en los sedimentos.....	42
3.2.1. Materia orgánica total arrastrada .....	42
3.2.2. Diferencias según fracción fina o gruesa por episodio de lluvias.....	44
3.3. Monitorización de la regeneración natural post-incendio en la zona de estudio y su efecto sobre la estabilización de la erosión.....	46
3.3.1. Efecto de la vegetación sobre la estabilización de la erosión.....	48
3.4. Comparación de las tasas de erosión obtenidas con modelos de erosión. ...	50
3.4.1. Modelo ERMiT .....	50
3.4.2. Modelo U.S.L.E.....	51
3.4.3. Comparación entre las tasas teóricas de erosión frente a las reales.	51
<b>4. DISCUSIÓN</b> .....	<b>54</b>
4.1 Perdida de suelo por erosión laminar.....	54
4.2 Erosión del suelo y pérdida de materia orgánica.....	55
4.3 Regeneración de la vegetación y erosión .....	56
4.4 Tasas estimadas según los modelos USLE y ERMiT .....	58
<b>5. CONCLUSIONES</b> .....	<b>60</b>
<b>6. RECOMENDACIONES PRÁCTICAS</b> .....	<b>61</b>
<b>7. BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>62</b>
<b>ANEXO I: Tabla general de datos</b> .....	<b>66</b>
<b>ANEXO II. Localización geográfica de cada Gerlach</b> .....	<b>72</b>
<b>ANEXO III: Fotografías</b> .....	<b>73</b>
<b>ANEXO IV: Tablas resumen del porcentaje de materia orgánica total, fina y gruesa, en cada tratamiento (abierto y cerrado)</b> .....	<b>76</b>
<b>ANEXO V: Tabla resumen de las tasas de erosión registradas en cada episodio de lluvias, Mg ha<sup>-1</sup>, así como de la intensidad de precipitación, mm h<sup>-1</sup> y precipitación total, mm.</b> .....	<b>78</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Superficie anual afectada por incendios forestales y proporción de población rural en España entre 1960 y 2012. Fuente: MAGRAMA 2012.....	13
Figura 2: Localización de la zona de estudio. Detallada la ubicación de las 6 trampas Gerlach. Redondeado, núcleo de Fornillos de Apiés. ....	22
Figura 3: Climograma de la estación meteorológica Embalse de Montearagón entre los años 1985 y 2015 (Aemet. 2015).....	26
Figura 4: Climograma de la estación meteorológica Embalse de Montearagón correspondiente al año hidrológico 2016 - 2017 (Aemet. 2015).....	27
Figura 5: Detalle de la delimitación superior (chapa metálica) de la parcela. Fuente: elaboración propia.....	29
Figura 6: Trampa Gerlach formado con un tubo de PVC (canalón para recogida de agua de los tejados) y lamina de fibra de vidrio para mejorar el anclaje y la recogida de suelo y escorrentía. ....	29
Figura 7: Colocación de las trampas Gerlach. Fuente: elaboración propia.....	30
Figura 8: Esquema general de una trampa Gerlach. Fuente: elaboración propia .....	30
Figura 9: Ejemplo de la monitorización, por medio de una cuadrícula, del porcentaje de suelo desnudo, pedregosidad y vegetación de cada Gerlach. Monitorización correspondiente al Gerlach Abierto 1, del día 22 de mayo de 2017.....	32
Figura 10: Detalle aplicación ERMiT. El acceso al servidor se realiza a través del Moscow Forestry Sciences Laboratory ( <a href="https://forest.moscowfsl.wsu.edu/">https://forest.moscowfsl.wsu.edu/</a> ), aunque la aplicación web se puede localizar en <a href="https://forest.moscowfsl.wsu.edu/cgi-bin/fswepp/ermit/ermit">https://forest.moscowfsl.wsu.edu/cgi-bin/fswepp/ermit/ermit</a> .....	35
Figura 11: Tasas de erosión por episodio de lluvias, intensidades de precipitación en mm/h y precipitación total, en mm., por cada episodio de lluvias.....	36
Figura 12: Comparación entre las tasas de erosión totales anuales en las diferentes Trampas Gerlachs, en Mg/ha/año. ....	38
Figura 13: Comparación entre las tasas de erosión totales y anuales en las diferentes Trampas Gerlachs, en Mg/ha/año, sin contar el dato referido al Gerlach Abierto 1 del día 23 de noviembre de 2016. ....	39
Figura 14: Tasas de erosión por episodio de lluvias en cada tratamiento. ....	41

Figura 15: Relación entre la cantidad total de sedimentos (g) y el contenido de materia orgánica presente (%).	42
Figura 16: Relación entre los sedimentos totales (g) y el porcentaje de materia orgánica presente (%) de la fracción fina (azul) y gruesa (naranja).	43
Figura 17: Media del porcentaje de materia orgánica total, fina y gruesa, por cada episodio de lluvias e intensidad de precipitación.	44
Figura 18: Porcentaje de vegetación, por trampa Gerlach, por cada episodio de lluvia.	46
Figura 19: Gráfico de dispersión para las tasas de erosión (Mg/ha). en relación al porcentaje de recubrimiento de vegetación.	49
Figura 20: Prueba de dispersión para las variables de sedimentos erosionados en relación al porcentaje de vegetación.	49
Figura 21: Resultados modelo ERMIT.	50
Figura 22: Comparación de las tasas de erosión según los modelos U.S.L.E. y ERMIT frente a la erosión real, en Mg/ha/año.	52
Figura 23: Ilustración. Gracia, A. (2016). Área de estudio después del incendio, antes de la primera lluvia. Septiembre 2016.	73
Figura 24: Ilustración. Gracia, A. (2016). Recogida de muestras de la zona control (no quemada) para el estudio del suelo. Septiembre 2016.	73
Figura 25: Ilustración. Gracia, A. (2016). Detalle de los pluviómetros utilizados para la medición de la cantidad de lluvia recogida. Septiembre 2016.	74
Figura 26: Ilustración. Gracia, A. (2016). Detalle de la localización de la zona de estudio, redondeada en rojo. Septiembre 2016.	74
Figura 27: Ilustración. Gracia, A. (2017). Área de estudio un año después del incendio. Septiembre 2017.	75
Figura 28: Ilustración. Gracia, A. (2017). Detalle de la parcela C2 (cerrado 2). Febrero 2017.	75
Figura 29: Ilustración. Gracia, A. (2017). Detalle de la parcela C2 (cerrado 2). Octubre 2017.	75

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Pendiente (%) en cada Gerlach. ....	23
Tabla 2: Comparación de las propiedades descritas entre los suelos control y quemado .....	25
Tabla 3: Prueba de coeficientes de correlación de Spearman. Tasas de erosión. ....	37
Tabla 4: Tasas de erosión, en Mg/ha. y en porcentaje (%) en cada trampa Gerlach...	38
Tabla 5: Prueba U de Mann-Whitney para las variables referidas al tratamiento. ....	40
Tabla 6: Media, en porcentaje, de materia orgánica total, fina y gruesa en función del tratamiento (abierto o cerrado). ....	43
Tabla 7: Prueba de coeficientes de correlación de Spearman. Relación entre materia orgánica e intensidad de precipitación.....	45
Tabla 8: Criterios para interpretar los valores de la prueba de correlaciones. ....	45
Tabla 9: Prueba de coeficientes de correlación de Spearman. Relación entre variables generales y porcentaje de vegetación. ....	47
Tabla 10: Valores nominales de la variable Vegetación. ....	48
Tabla 11: Prueba Kruskal - Wallis para las variables según el porcentaje de vegetación .....	48
Tabla 12: Comparación de las tasas de erosión según los modelos U.S.L.E. y ERMIT frente a la erosión real, en Mg/ha. ....	51
Tabla 13: Distribución de los eventos de lluvia registrados durante el periodo de estudio. Se indica la frecuencia de cada tipo de episodios de lluvia según la categorización AEMET en número de eventos y volumen de precipitación de cada categoría de evento. ....	59
Tabla 14: Tabla general de datos. (1/6) .....	66
Tabla 15: Latitud y Longitud de cada Gerlach. ....	72
Tabla 16: Coordenadas X e Y de la posición de cada Gerlach. ....	72
Tabla 17: Porcentaje de materia orgánica total, fina y gruesa, con su desviación estándar, en el tratamiento Abierto.....	76
Tabla 18: Porcentaje de materia orgánica total, fina y gruesa, con su desviación estándar, en el tratamiento Cerrado. ....	77

Tabla 19: Comparación de las tasas de erosión (Mg/ha), intensidad de precipitación (mm/h) y precipitación total (mm) por cada episodio de lluvias..... 78

## 1. INTRODUCCIÓN.

### 1.1 Los incendios como parte de la historia

Los incendios forestales, juegan un importante papel en los procesos que han configurado el aspecto actual de amplias zonas del planeta Tierra, en aspectos tan diversos como la geomorfología, la hidrología superficial, el aspecto y el paisaje, así como las distribuciones de especies, poblaciones y comunidades. La abundancia de carbón en los sedimentos demuestra que el fuego ha actuado desde hace 400 millones de años (principios del Devónico), cambiando su frecuencia e intensidad según los diferentes niveles de oxígeno atmosférico y el clima a lo largo de la historia (Cerdá *et al.* 2012).

Antes de la revolución industrial, casi el 50% de las tierras del mundo estaban cubiertas por bosques; en 1955 ya habían desaparecido la mitad; en 1980 la superficie forestal mundial se estimó en 2,5 billones de ha, es decir, 1/5 de la superficie de la tierra (Chandler *et al.*, 1983). Para el año 2000, la cifra aumentó en 0,5 billones más. Aunque no puede situarse a los incendios forestales como la causa única de estos cambios, el fuego, accidental o provocado, ha actuado en muchos de ellos.

Actualmente, los incendios forestales están entre los principales determinantes de los bosques mediterráneos. Sus paisajes son el resultado de muchos siglos de presión humana basados en la tala, quema y pastoreo de las zonas marginales, y en la tala, abanclado, cultivo y después, eventualmente, el abandono de zonas apropiadas para el cultivo (Pausas, 2004).

### 1.2 El fuego, de regenerador a destructor.

Actualmente se aduce al fuego como un enemigo debido al elevado poder destructor que posee. Sin embargo, histórica y prehistóricamente el fuego ha sido un aliado del ser humano, una herramienta para facilitar su control sobre el medio y permitir la extensión de las actividades agrarias y ganaderas (Pausas, 2010).

Antiguamente, nuestros antepasados modificaron el entorno en el que vivían con el fin de autoabastecerse, aprovechando los recursos que les daba la naturaleza. Es por ello que se produjeron fenómenos antrópicos como la fragmentación del paisaje o

la reducción de las masas forestales debido a la extracción de leña y el paso del ganado, entre otras. La escasa acumulación de combustible en esas masas forestales conllevó a que los incendios declarados fueran de superficie, de baja intensidad y con una fácil regeneración vegetal posterior (Hormazábal, 2006).

Sin embargo, durante las décadas de 1960 y 1970, el paisaje mediterráneo comenzó a cambiar drásticamente debido al abandono del medio rural que se produjo, ya que su mantenimiento precisaba de una elevada influencia humana. Así pues, con la regeneración de amplias zonas forestales se incrementó notablemente el combustible disponible (vegetación entre otros) y su continuidad (Martínez, 2017), tanto horizontal como vertical.

Como todo fenómeno dependiente de la meteorología, tanto el número de siniestros como las superficies afectadas (Figura 1) presentan años con picos que desestabilizan las tendencias. El mayor número de incendios se produjo en 1995 con un total de 25.557 y el año de mayor superficie forestal afectada fue 1985 con 484.475,20 hectáreas (MAGRAMA, 2012). Aunque existe una gran variabilidad interanual, tanto en el número de incendios como en la superficie afectada, en la figura 1 se observa claramente que las mayores superficies afectadas corresponden al periodo en el que la población rural cae por debajo del 20-25% del total.

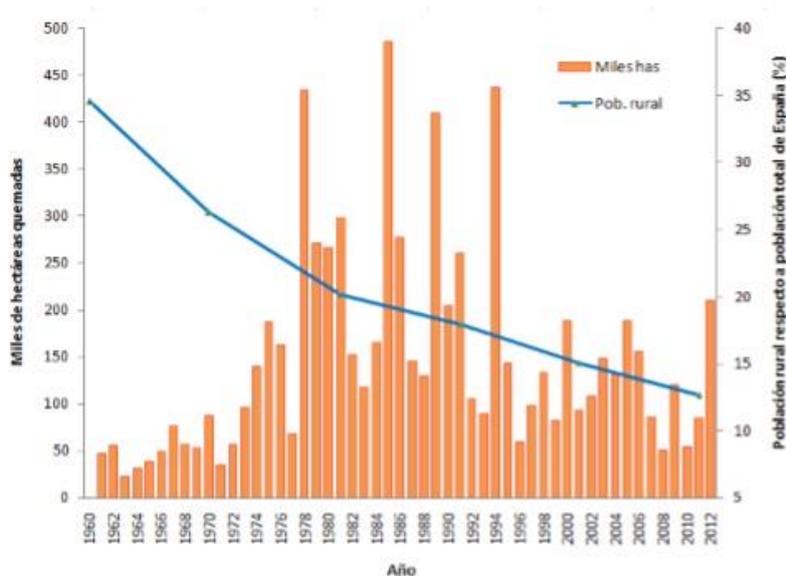


Figura 1: Superficie anual afectada por incendios forestales y proporción de población rural en España entre 1960 y 2012. Fuente: MAGRAMA 2012.

### 1.3 Impacto medioambiental de los incendios forestales

El impacto ambiental que produce un incendio forestal es mucho más profundo de lo que se ve a simple vista y sobrepasa, en muchas ocasiones, la superficie propiamente calcinada. La destrucción de biodiversidad, el aumento de la desertificación o la disminución de la calidad de las aguas y de la atmósfera son algunas de las numerosas consecuencias negativas posteriores a cualquier incendio. (Castillo, 2013)

No obstante, no todos los efectos del fuego pueden tacharse tan claramente de negativos. El desarrollo de la vegetación ha estado muy unido a los incendios, ya que, a pesar de su papel destructor, el fuego constituye un factor ecológico fundamental en la dinámica de muchos ecosistemas terrestres (Aznar, 2012).

Por lo que respecta al suelo, el choque térmico producido por el fuego produce variaciones en muchas de sus propiedades físicas, químicas y biológicas. Como componente básico de los ecosistemas terrestres, su sostenibilidad y capacidad de recuperación dependen de que dichas funciones y procesos ocurran debajo de la capa de hojarasca (Neary *et al.*, 1999; Mataix-Solera y Guerrero, 2007).

El pH y la conductividad eléctrica normalmente aumentan después del fuego, debido al aporte de cenizas, cationes básicos y óxidos. El tiempo de recuperación del pH inicial es variado y se considera que es más o menos rápido según el tiempo en que las cenizas permanecen en el suelo, su posible reincorporación a través de la superficie o su eliminación por arrastre en la escorrentía superficial (Mataix-Solera y Guerrero, 2007). Este aporte de cenizas también enriquece el suelo con un aumento de nutrientes (Ca, Mg, K, Na, P) y según Kutiel y Naveh (1987) es considerado el mayor factor de crecimiento de la vegetación en los ecosistemas mediterráneos. Sin embargo, hay algunos nutrientes esenciales como el N que se pierden por volatilización con el humo del fuego (Raison *et al.*, 1984). Ni tan solo los nutrientes que quedan depositados con las cenizas tienen asegurada su reincorporación al suelo, ya que éstas pueden ser eliminadas por la acción del viento, la erosión hídrica o el lavado y pérdida por lixiviación, sobre todo cuando no hay vegetación (Arianoutsou *et al.*, 1993; Neary *et al.*, 1999; Cerdà y Bodí, 2007).

Por otra parte, respecto a los cambios en el carbono orgánico del suelo, los resultados reportados por la bibliografía son complejos y variados según, entre otros, la severidad del incendio. En incendios de baja intensidad puede haber incrementos de carbono orgánico procedente de la vegetación parcialmente calcinada, en cambio, a

intensidades elevadas la cantidad de materia orgánica de la superficie del suelo suele disminuir (Mataix-Solera *et al.*, 2002). Según Knoepp *et al.* (2005) el calentamiento del suelo a 450 °C durante dos horas o a 500 °C solamente media hora, es suficiente para destruir el 99% de la materia orgánica. Estos resultados revelan un factor tan o más importante que la magnitud del pico térmico, que es el tiempo en el que el suelo se ve sometido a elevadas temperaturas.

Pero el fuego no sólo modifica la cantidad de materia orgánica, sino que también puede alterar su calidad. Actúa como un agente que puede acelerar las tasas de mineralización del carbono orgánico y modificar de esta forma las tasas de descomposición post-incendio. Ello se produce por el efecto pirolítico del fuego sobre compuestos complejos, facilitando su posterior ataque microbiano (Mataix-Solera y Cerdà, 2009). Sin embargo, también se pueden dar procesos opuestos, ya que a medida que se incrementa la temperatura, la materia orgánica puede experimentar modificaciones por condensación y aromatización que la hacen más resistente a la degradación microbiana, generando lo que, comúnmente, la bibliografía denomina materia orgánica piromórfica (González-Vila *et al.*, 2009; Knoepp *et al.*, 2005).

Por otra parte, la vegetación y los horizontes orgánicos desaparecen total o parcialmente, modificándose la incidencia de la lluvia sobre la superficie del suelo y la capacidad de la hojarasca para proteger a la superficie del suelo del impacto de las gotas de lluvia. Su incidencia sobre la superficie desprotegida del suelo puede desencadenar, por mecanismos de splash y slaking, la desagregación y el encostramiento de la superficie del suelo, que pueden traducirse en cambios en la producción de escorrentía y el arrastre de sedimentos (Llovet *et al.*, 2016).

Estas modificaciones suponen cambios microclimáticos en la humedad edáfica, temperatura y radiación solar (Raison *et al.*, 2009) que afectarán a la recuperación del sistema tanto en aspectos que pueden considerarse beneficiosos para el desarrollo vegetal (menos competencia, más luz, más nutrientes) como en aspectos adversos (mayor erosión, menos infiltración, y por lo tanto menor disponibilidad hídrica) del ecosistema (Neary *et al.*, 1999).

Las magnitudes tanto de las tasas de escorrentía como de erosión post incendio son muy heterogéneas (Cerdà y Bodí, 2007) y en algunos casos las tasas de erosión no suelen ser superiores a 1 Mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, por lo que se encuentran dentro del rango de sostenibilidad y tolerancia (Cerdà y Bodí, 2007). Por el contrario, en determinadas ocasiones, dichas tasas se disparan a valores de más de 100 Mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, siendo estas ocasiones extraordinarias (Martínez, 2012).

Las tormentas individuales de gran intensidad son las que desencadenan estos episodios extraordinarios de arroyada post-incendio. Durante estas tormentas, las cuencas quemadas generalmente responden más rápido a la lluvia que antes del incendio o que cuencas no quemadas, produciendo más escorrentía y de manera más rápida (Martínez-Mena, 2001).

En las zonas mediterráneas como en la que nos encontramos, tras los incendios de verano, el suelo desprovisto de vegetación queda más expuesto al poder erosivo de las lluvias torrenciales otoñales (Marqués y Mora, 1992; Shakesby y Doerr, 2006; Mayor, 2007). Los incendios forestales afectan la relación entre la vegetación y la erosión a distintos niveles. Al perderse la parte aérea de la vegetación, el papel de interceptación disminuye enormemente y aunque la capacidad de regeneración de la vegetación mediterránea es elevada y relativamente rápida, los primeros meses tras el fuego el suelo queda completamente desprotegido, produciéndose así un golpe directo por parte de las gotas de lluvia sobre el suelo (Alexander y Calvo. 1990).

Aunque las tasas de erosión que se incrementan tras los incendios vuelven a sus valores previos tras unos años (Mataix-Solera y Cerdá, 2009), ello depende en gran medida de la regeneración de las zonas afectadas. La recuperación de los suelos afectados por el fuego, así como la de los ecosistemas damnificados o del funcionamiento hidrológico previos al incendio, si es que se produce, puede llevar décadas alcanzarla (Castro, 2013).

Los distintos estudios realizados sobre el efecto de los incendios en la erosión indican que en incendios de baja intensidad no se producen alteraciones muy relevantes, y la recuperación del suelo es rápida. Cuando el incendio es de intensidad moderada o elevada, la degradación de la estructura del suelo es importante y las tasas de erosión se disparan durante unos años, aunque luego se reducen con la recuperación de la vegetación (Valladares 2004).

El período de tiempo que tarda el suelo en recuperarse y el grado de recuperación del mismo varía de unos estudios a otros y dependerá de las características de la zona –orientación, pendiente–, de las propiedades iniciales del suelo, de las características de los incendios, de la intensidad y patrón temporal de las precipitaciones que ocurran después y del manejo de esas áreas, tanto previo como posterior (Abad *et al.*, 1997; Llovet *et al.*, 1994). Durante este período, la fragilidad del suelo es máxima, de manera que lluvias de extraordinaria intensidad pueden desencadenar graves procesos erosivos (De Luís *et al.*, 2003). A veces, aunque no medien episodios de lluvia extraordinarios, las elevadas tasas de erosión persisten

durante años, aumentando la degradación del suelo e impidiendo su recuperación hasta los niveles previos al incendio (Fayos, 2004).

Dada la fragilidad de estos sistemas afectados por incendios, cualquier actuación que suponga remoción o compactación del suelo incendiado durante el período de recuperación del mismo contribuirá a aumentar las tasas de erosión y por tanto a alargar el tiempo necesario para que dicha recuperación se produzca o incluso que sea posible alcanzar los niveles previos al incendio. Por ello, es de vital importancia disponer de herramientas que permitan evaluar el riesgo de erosión, y actuar de acuerdo a estas evaluaciones en estadíos tempranos después del fuego. Actuaciones desarrolladas de forma tardía o en situaciones en las que eran innecesarias pueden incluso llegar a agravar procesos de degradación por erosión.

#### 1.4 Erosión laminar

Una de las formas más comunes de erosión hídrica, por lo menos en zonas de cabecera de pendiente, es la denominada erosión laminar. Ésta se produce cuando el agua de lluvia o la acumulada por escorrentía supera la capacidad de infiltración de agua en el suelo (probablemente reducida a consecuencia del fuego, tal y como hemos explicado con anterioridad). Así, se produce un flujo laminar de pocos milímetros de espesor que puede arrastrar la capa más superficial del suelo y/o de los horizontes orgánicos, lo que tiene notables efectos, ya que es precisamente en la capa más superficial del suelo donde se almacenan grandes cantidades de nutrientes y la mayor parte de la materia orgánica, componente estrechamente relacionado con la fertilidad edáfica. Por ello, la pérdida de materia orgánica puede dificultar la regeneración natural de las zonas afectadas, y es pues de especial interés monitorizar la pérdida de este componente por erosión (Martínez, 2017).

El uso de canales Gerlach es particularmente común en la cuantificación de la erosión laminar (Novara *et al.*, 2011). Consiste en la instalación, enterrados en el suelo de forma perpendicular a la pendiente, de canales de recogida de la escorrentía superficial y de los sedimentos que ésta arrastra. Una vez instalados, es necesario acudir a la zona de estudio después de cada episodio de lluvia, para la recogida de los sedimentos. Este método presenta algunos inconvenientes, pues su capacidad de recogida de sedimentos es limitada, mas su facilidad a la hora de realizar los muestreos la sitúan como una opción muy viable a la hora de llevar a cabo estudios de este tipo.

Más adelante veremos la puesta en marcha de este método empleada en la realización del presente trabajo.

## 1.5. Modelos para el cálculo de las tasas teóricas de erosión

Dada la gravedad potencial de los problemas que puede ocasionar el incremento de la actividad erosiva en zonas afectadas por incendios, al tiempo necesario para efectuar su monitorización y a la urgencia de la necesidad de adoptar medidas de prevención y control de la erosión, en muchas ocasiones no se opta por una medición real de las tasas de erosión sino en el uso de modelos que permitan predecirlas y valorar, a partir de la información obtenida, las opciones de manejo más adecuadas (Rodrigues, 2012; Clérici, 2001).

Durante la realización de este estudio, realizaremos dos estimaciones diferentes por medio de dos modelos: el modelo U.S.L.E. (Universal Soil Loss Equation) y el modelo ERMiT (Erosion Risk Management Tool) (Robichaud *et al.*, 2014).

### 1.5.1. Modelo U.S.L.E.

La USLE (Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo) estima el promedio de las pérdidas anuales de suelo a largo plazo ( $\text{Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ), y por tanto no es válida para un año concreto ni para un evento particular.

La USLE de Wischmeier y Smith (1978) procede de numerosas experiencias y formulaciones anteriores como la de Zingg (1940), quien relacionó la erosión con el grado de pendiente y longitud del declive, la de Musgrave (1947), el cual añadió un factor de clima basado en la precipitación máxima en treinta minutos con un período de retorno de dos años; o la de Smith (1958), en la que se consideraron factores de cultivo que tuviera en cuenta el diferente grado de protección del suelo suministrado por la cubierta vegetal.

Este modelo está especialmente adaptado para evaluar las pérdidas de suelo por erosión laminar y surcos de pequeño tamaño. Su bondad depende del rigor con que los cinco multiplicandos que componen la ecuación, representen las condiciones del

medio al interpretar los mecanismos erosivos por sus causas y efectos (Almorox *et al.*, 1994). La elección del USLE en este trabajo se debe a su alta fidelidad y a su relativa aplicabilidad universal, producto de la gran cantidad de trabajos realizados en todo el mundo con fines científicos y de planificación.

### 1.5.2. Modelo ERMiT

El modelo ERMiT (Erosion Risk Management Tool), una herramienta de gestión de riesgo de erosión, utiliza la tecnología Water Erosion Prediction Project (WEPP) como el motor de cálculo de la escorrentía y la erosión. WEPP incorpora los procesos de evapotranspiración, infiltración, la escorrentía, el arranque del suelo, el transporte de sedimentos, y la deposición de sedimentos para predecir la escorrentía y la erosión a escala de laderas (Flanagan y Livingston, 1995).

El modelo ERMiT integra información sobre indicadores de clima, suelo (textura), topografía (pendiente y longitud de la pendiente), además del tipo de vegetación afectada y el nivel de severidad del incendio, lo que permite realizar simulaciones para evaluar la variación en las tasas de erosión. El modelo utiliza un método probabilístico que incorpora la variabilidad temporal y espacial en el clima, las propiedades del suelo y la severidad de la quema según distintos tipos estructurales de vegetación (bosque, pasto y matorral de montaña) (Rodrigues *et al.*, 2012).

Con los datos nombrados, específicos de nuestra ladera de estudio, junto a las estimaciones climáticas de La Sotonera (punto de la aplicación más cercano a nuestra área de estudio con datos incluidos en la aplicación web del modelo ERMiT), calcularemos, tal y como mostraremos en el apartado de material y métodos, la tasa anual de erosión estimada.

Estos dos modelos calculan una tasa de erosión estimada. No obstante, los modelos están sujetos a error, debido a que se basan en datos climáticos estándar, en series largas, mientras que la erosión real se produce en un año concreto, con unas condiciones climáticas específicas.

Además, los modelos tienen en cuenta unas características del suelo muy limitadas, por lo tanto, la variabilidad del suelo puede generar imprecisión en las estimaciones. Es por ello que existe la necesidad de comparar las predicciones que dan con valores reales medidos en campo (Clérici, 2001).

## 1.6 Objetivos

Por todo lo expuesto en los párrafos anteriores, este trabajo pretende dar cumplimiento a los siguientes objetivos:

### 1.6.1 Objetivo general

Medir la tasa de erosión en una ladera afectada por un incendio forestal, caracterizando los materiales sujetos a erosión y evaluar las tasas de erosión laminar real y potencial, estimadas a partir de modelos de uso frecuente (USLE y ERMiT).

### 1.6.2 Objetivos específicos

- Cuantificar la pérdida de suelo por erosión laminar en cada episodio de lluvia y el total anual.
- Comparar las tasas de erosión obtenidas con los modelos de erosión ERMiT y la USLE.
- Cuantificar la cantidad de materia orgánica arrastrada por cada episodio de lluvia y en el conjunto del año.
- Monitorizar la regeneración natural post-incendio en la zona de estudio y su efecto sobre la estabilización de la erosión.



## 2. MATERIAL Y METODOS

### 2.1. Descripción del área de estudio

#### 2.1.1. Localización

El área de estudio en la que se ha desarrollado el presente trabajo está ubicada en el término municipal de Fornillos de Apiés (Huesca), más concretamente, la ladera Oeste de la sierra que separa las cuencas hidrográficas de los ríos Flumen e Isuela, conocido popularmente como Corona Figueras. Dicha sierra, situada a una altitud que se encuentra entre los 650 y 660 metros sobre el nivel del mar, se encuentra al Suroeste del núcleo de población de Fornillos de Apiés. Desde un punto de vista geográfico, el área de estudio se encuentra en la cuenca del río Isuela, afluente del Cinca. En la Figura 2 se detalla la localización del área de estudio respecto al núcleo de población de Fornillos de Apiés.

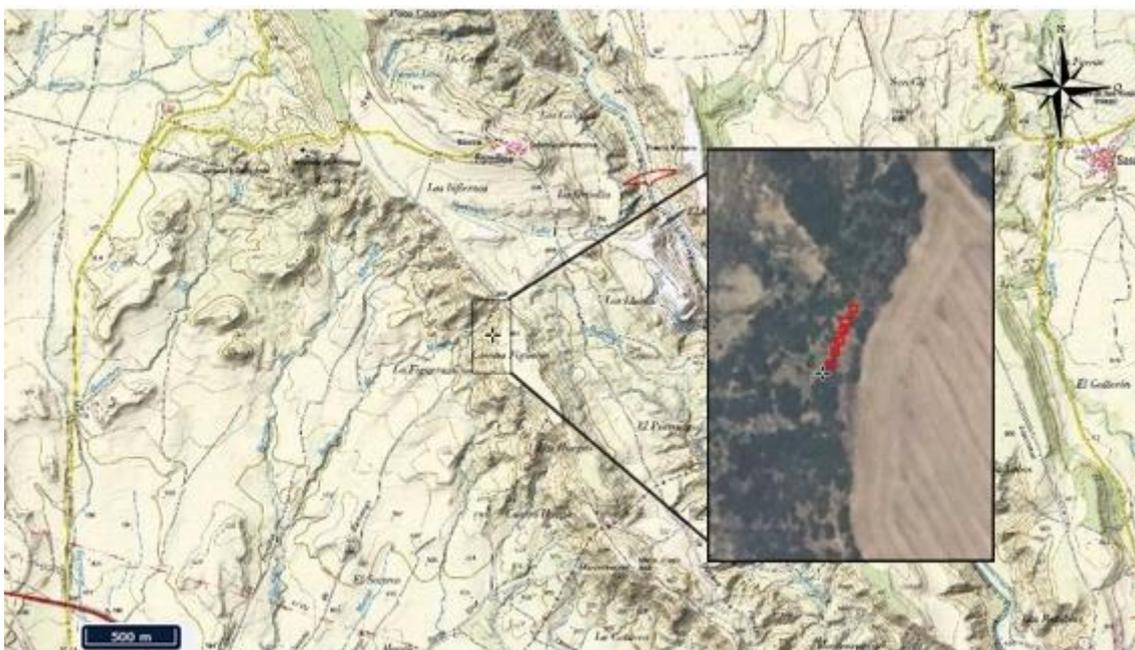


Figura 2: Localización de la zona de estudio. Detallada la ubicación de las 6 trampas Gerlach. Redondeado, núcleo de Fornillos de Apiés.

### 2.1.2. Geología y geomorfología

Según el Mapa Geológico de España del IGN (Canerot *et al.*, 1976), la totalidad de la ladera del área de estudio está asentada sobre lutitas y paleocanales de arenisca, en la que predominan los suelos pedregosos, determinados por su material de origen. La ladera comienza desde una terraza elevada situada en la parte superior, conformada principalmente por conglomerados cementados, brechas y lutitas. Las pendientes de las parcelas seleccionadas en dicha ladera se midieron con un inclinómetro. Los resultados se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Pendiente (%) en cada Gerlach.

	<b>Pendiente (%)</b>
<b>Gerlach Abierto 1</b>	35
<b>Gerlach Abierto 2</b>	35
<b>Gerlach Abierto 3</b>	27
<b>Gerlach Cerrado 1</b>	30
<b>Gerlach Cerrado 2</b>	28
<b>Gerlach Cerrado 3</b>	28

### 2.1.3 Características de los suelos

Se han analizado un total de 4 muestras del suelo de la zona de estudio quemada, así como otras 4 de zonas no afectadas por el fuego pero que se encontraban a escasos metros del incendio. Dichas muestras se trataban de monolitos inalterados que fueron obtenidos mediante un cilindro de aluminio, para mantener la estructura original del suelo. Cada muestra de suelo se separó atendiendo a la profundidad, en dos, siendo 0-3 cm y 3-6 cm de profundidad, respectivamente. Posteriormente, atendiendo al volumen que ocupaba cada muestra, se determinó la densidad aparente del conjunto de la muestra.

En los bloques de suelo forestal no quemado encontramos horizontes O, los cuáles fueron separados del horizonte mineral Ah, pudiendo estimar así la pérdida de carbono, mediante calcinación, de esa parte superior del suelo en Mg/ha.

Los bloques fueron decapados, separando así las dos profundidades, con la ayuda de palillos reglados centimétricamente que se empleaban como guías. La

muestra de suelo obtenida de cada profundidad se pasó a recipientes de aluminio previamente tarados, para secarse y pesarse, determinando así la densidad aparente, previo cálculo del diámetro y espesor. Posteriormente, las muestras fueron tamizadas para separar la fracción fina de la gruesa.

A continuación, se explican, en términos generales, las propiedades del suelo determinadas, indicando la comparación de los valores en la zona control frente a la zona quemada, junto a las desviaciones típicas. La tabla 2 recopila los principales resultados de la caracterización del suelo afectado por el incendio y del control no quemado.

- **Repelencia al agua (WDPT(s)):** Con una pequeña fracción de suelo, medimos el tiempo que tardaba en infiltrarse completamente una gota de agua destilada (0.05 ml). Se aplicaron 4 gotas por muestra, anotando los 4 tiempos, a modo de réplica.
- **Densidad aparente (Dap):** Estimada mediante la expresión  $Da = m / V$ , donde  $m$  es la masa del suelo seco a 105 °C (24h, hasta peso constante) y  $V$  el volumen original de la muestra inalterada del suelo.

**pH y conductividad eléctrica (pH y CE):** Se pesaron 10 gramos de suelo, que fueron mezclados con 25 ml de agua destilada, obteniendo una relación 1:2.5 en masa. Del mismo modo se midió la conductividad eléctrica mediante un conductímetro, con una relación 1:5 en masa. Los resultados fueron expresados en deciSiemens/m (dS/m).

- **Estabilidad estructural de agregados (EE):** mediante el método propuesto por Kemper y Koch (1966) y cuyo protocolo se actualiza en Schinner *et al.* (1996). Se valoró la proporción de agregados resistentes al ser sometidos a la acción de fuerzas mecánicas por tamizado en un medio húmedo.
- **Contenido en carbonatos (Carbonatos):** Mediante el calcímetro de Bernard, con una cantidad pequeña de suelo (0,2 – 1 gramo) seco y triturado.
- **Carbono oxidable (Cox):** Por oxidación en vía húmeda mediante  $K_2Cr_2O_7$  en mezcla biácida de  $H_2SO_4$  y  $H_3PO_4$ , oxidando a 150°C y valorando posteriormente con Sal de Mohr ( $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2$ ).

- **Materia orgánica por calcinación (MO)** en una mufla a 550°C y expresada como LOI<sub>550</sub>

*Tabla 2: Comparación de las propiedades descritas entre los suelos control y quemado*

	<b>Profundidad (cm)</b>	<b>C (control)</b>	<b>Q (Quemado)</b>
<b>EG</b>	<b>0-3</b>	57,7 ± 23,0	56,9 ± 18,8
	<b>3-6</b>	56,9 ± 20,0	48,3 ± 15,7
<b>WDPT(s)</b>	<b>0-3</b>	9,7 ± 13,5	0,7 ± 0,8
	<b>3-6</b>	1,1 ± 0,6	0,2 ± 0,5
<b>EE (%)</b>	<b>0-3</b>	84,0 ± 4,7	88,3 ± 5,2
	<b>3-6</b>	86,3 ± 3,7	88,1 ± 4,8
<b>pH</b>	<b>0-3</b>	174,7 ± 62,1	178,7 ± 40,5
	<b>3-6</b>	134,8 ± 57,8	161,8 ± 60,1
<b>CE</b>	<b>0-3</b>	151,0 ± 15,3	145,0 ± 15,0
	<b>3-6</b>	130,0 ± 10,9	139,2 ± 14,2
<b>Carbonatos</b>	<b>0-3</b>	359,5 ± 13,9	224,0 ± 30,1
	<b>3-6</b>	370,5 ± 58,1	251,0 ± 62,0
<b>Cox</b>	<b>0-3</b>	27,2 ± 4,5	27,1 ± 1,1
	<b>3-6</b>	23,5 ± 1,0	24,8 ± 1,5
<b>MO</b>	<b>0-3</b>	174,7 ± 62,1	178,7 ± 40,5
	<b>3-6</b>	134,8 ± 57,8	161,8 ± 60,1

#### 2.1.4. Clima

El clima del área de estudio es submediterráneo continental cálido, y presenta una precipitación media anual de unos 480,3 mm (Estación meteorológica Embalse de Montearagón).

Según los datos (1985-2015) recogidos por la estación meteorológica de Montearagón, estación más próxima al área de estudio, la temperatura media anual es de 14,0°C, la máxima absoluta de 42,6°C y la mínima absoluta de -12,6°C.

En ocasiones el máximo de precipitación del otoño es más acusado que el primaveral, marcando así la mayor influencia de las depresiones otoñales mediterráneas, presentando una importante sequía veraniega que queda mitigada en parte por las tormentas, escasas pero intensas en los meses estivales.

En la Figura 3 se representa la temperatura y las precipitaciones por meses en la estación meteorológica del embalse de Montearagón desde el año 1985 al 2015, dividido por el reparto mensual de un año hidrológico.

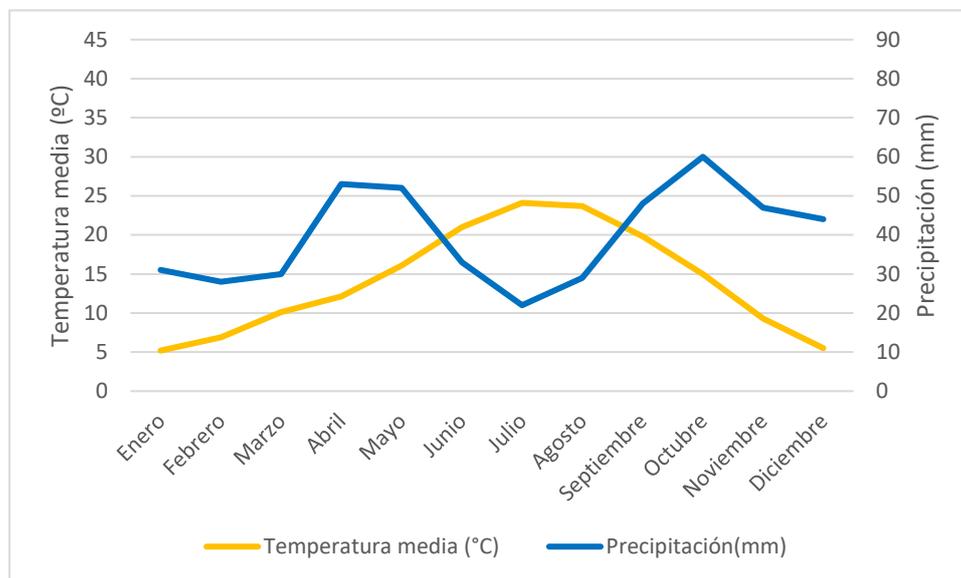


Figura 3: Climograma de la estación meteorológica Embalse de Montearagón entre los años 1985 y 2015 (Aemet. 2015).

Centrándonos en el periodo durante el cual se realizó el trabajo, es decir, desde septiembre de 2016 hasta octubre de 2017, se recogieron un total de 372,4 litros en el embalse de Montearagón.

Considerando un año hidrológico completo, desde el 1 de septiembre 2016 hasta el 1 de septiembre de 2017, con el fin de comparar los datos con las referencias históricas arriba representadas, se recogieron un total de 300,9 litros, lo que supone tan solo un 62,68% de lo normal.

El periodo durante el cual se han realizado los muestreos se corresponde con la figura 4, abajo representada, donde se muestran las temperaturas (°C) medias y las precipitaciones (mm) por mes, sin especificar valores máximos ni mínimos absolutos.

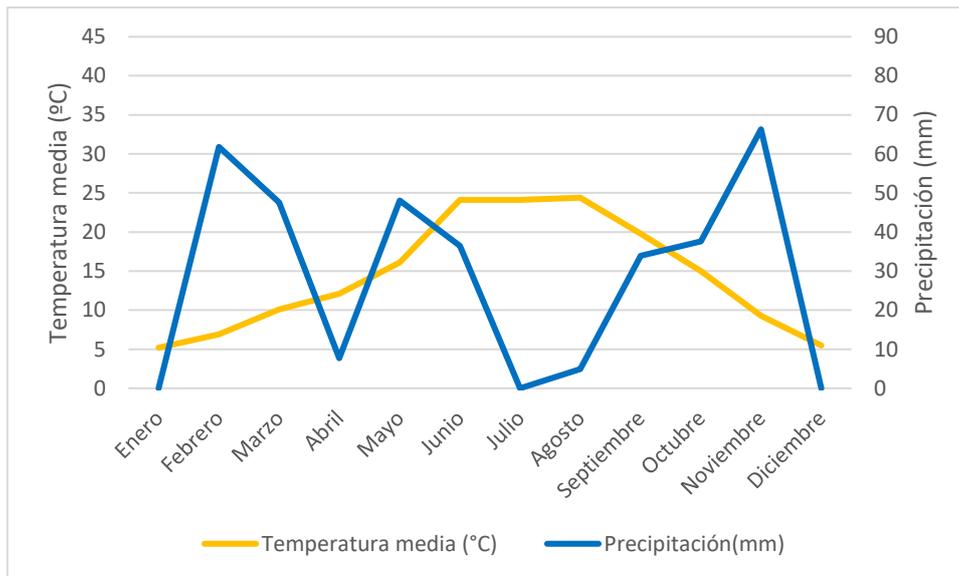


Figura 4: Climograma de la estación meteorológica Embalse de Montearagón correspondiente al año hidrológico 2016 - 2017 (Aemet. 2015).

Como podemos observar, las temperaturas no han sufrido grandes variaciones con respecto a la media de los años anteriores. Por el contrario, las precipitaciones se han repartido de manera muy heterogénea, desviándose de manera significativa respecto de la media de los últimos 34 años, llegando incluso a tener meses en los que no se llegó a recoger ni 0,1 mm.

#### 2.1.5. Vegetación

Conforme a la Memoria del Mapa de Series de Vegetación (Rivas-Martínez, 1987), la zona estudiada pertenece al piso mesomontano superior y la vegetación potencial pertenece a la serie de los carrascales mesomontanos.

La serie montana y supramediterránea pirenaico-aragonesa de la carrasca (*Quercus rotundifolia*) corresponde en su etapa madura a un bosque denso de encinas de pequeña talla (*Helleboro joetidi-Quercetum rotundifoliae*), que puede albergar en ocasiones alguna sabina (*Juniperus phoenicea*) o enebro (*Juniperus oxycedrus*).

En concreto, nuestra zona de estudio se asienta sobre una ladera que, antes del incendio, estaba compuesta por carrascales y matorral bajo.

### 2.1.6. Incendio forestal de Fornillos de Apiés

El día 10 de agosto de 2016 se declaró un incendio en un pajar situado cerca de la ciudad de Huesca. Las llamas pronto se propagaron a los campos colindantes, ayudadas de unas altas temperaturas ( $>30^{\circ}\text{C}$ ), una humedad relativa bastante baja ( $<30\%$ ) y un fuerte viento (rachas de hasta 70 km/h) que soplaba ese día en dirección Este - Noreste.

La unión de estas tres condiciones, popularmente conocida como la regla de los tres treintas (temperatura por encima de  $30^{\circ}\text{C}$ , humedad por debajo del 30% y vientos superiores a los 30 km/h), propició que el fuego rápidamente alcanzara los montes que separan la cuenca del Flumen de la cuenca del Isuela, zona que finalmente se estableció como área experimental.

El incendio estuvo activo durante dos días, en los cuales se calcinaron un total de 400 hectáreas, tanto de superficie forestal, mayoritariamente carrascal, como agrícolas, llegando a rodear el pueblo de Fornillos de Apiés, y siendo extinguido en la orilla Oeste del embalse de Montearagón.

## 2.2. Diseño experimental

### 2.2.1. Selección del área de estudio

Para la selección del área de estudio se procedió a realizar varias visitas a las zonas más afectadas por el fuego durante el incendio. Sobre el terreno, se observaron las laderas con un elevado potencial para poder realizar el estudio, debido a su relativa homogeneidad, a una pendiente constante a lo largo de toda la ladera y a los visibles efectos del fuego.

Decidimos realizar los muestreos en la ladera Oeste de Corona Figueras, debido a su pendiente ( $25 - 35^{\circ}$ ), su exposición (Oeste – Suroeste), por su susceptibilidad a la erosión y por la homogeneidad que presentaba, lo cual nos permitió colocar canales Gerlach en 6 parcelas de similares características.

### 2.2.2. Medición de la erosión

Dada la necesidad de recoger el agua de escorrentía y los sedimentos producidos por erosión laminar, se propuso el uso de canales Gerlach (Dunne 1977), recomendado debido a su sencillez y asequibilidad en un trabajo de estas características. Una trampa Gerlach se compone de un recipiente semicircular, a modo de tubería abierta por su mitad longitudinal y cerrada por los laterales. Su función consiste en recoger el agua de escorrentía con los sedimentos que ésta arrastra en cada episodio de lluvias, insertando el canal Gerlach en la tierra. La estructura se muestra en la Figura 5.



*Figura 5: Detalle de la delimitación superior (chapa metálica) de la parcela. Fuente: elaboración propia.*



*Figura 6: Trampa Gerlach formado con un tubo de PVC (canalón para recogida de agua de los tejados) y lamina de fibra de vidrio para mejorar el anclaje y la recogida de suelo y escorrentía.*

Por contrapartida, su principal problema radica en la necesidad de estimar el área que contribuye al flujo recogido en cada Gerlach, siendo ésta usualmente obtenida del producto entre la anchura del receptor y la longitud de la pendiente, para lo cual se hace indispensable en ocasiones, una limitación superior como la que se observa en la (Figura 6) (Sala, 1988).

### 2.2.3 Colocación de los Gerlach

Tal y como se ha comentado anteriormente, se delimitaron un total de 6 microparcels, con unas dimensiones de 1,5 x 0,5 metros (0,75 m<sup>2</sup> de superficie), en cuya parte inferior se colocaron las trampas Gerlach (Figura 8) con el fin de recoger el agua y los sedimentos arrastrados por la erosión laminar producida dentro de los límites de las parcelas después de cada episodio de lluvias. De este modo, se procedió a realizar un pequeño surco en el lugar donde emplazaríamos la trampa Gerlach, en dirección perpendicular a la pendiente, con el fin de evitar que la escorrentía superficial producida por las lluvias moviese las trampas y condicionara los muestreos.

En la Figura 7 se puede observar el momento en que se instalaron las trampas en la ladera y, a continuación, la figura 8 representa el esquema general de nuestras trampas Gerlach:



Figura 7: Colocación de las trampas Gerlach.  
Fuente: elaboración propia.

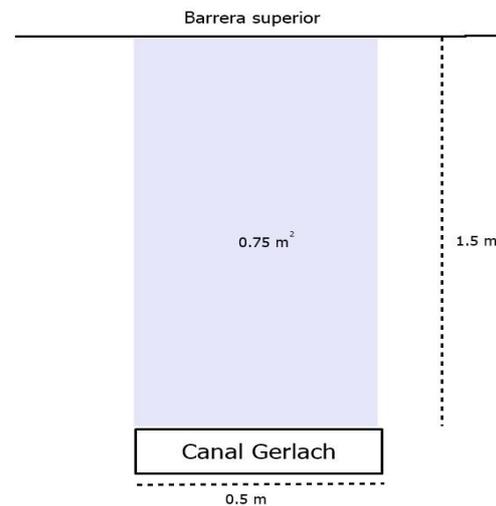


Figura 8: Esquema general de una trampa Gerlach.  
Fuente: elaboración propia

Del total de las 6 trampas Gerlach (una para cada microparcels), 3 estaban en emplazamientos abiertos ("Abiertos"), es decir, se colocaron de manera que no hubiera cubierta de copas encima de ellas, a cielo abierto, evitando así cualquier tipo de interferencia entre la lluvia y el posible efecto "splash" de las gotas. Del mismo modo, los 3 restantes se colocaron debajo del área de proyección vertical de las copas de árboles quemados, lo más próximas posible al tronco del árbol, llamándolos "Cerrados",

para poder determinar si las ramas desnudas de la vegetación afectada por las llamas o el posterior rebrote de los árboles podían influir de manera significativa en la erosión producida.

## 2.3. Recogida y preparación de las muestras.

### 2.3.1 Recogida de muestras en campo

Se procedió, tras cada episodio de lluvia, a recoger el agua de la escorrentía superficial, en botellas y, por otra parte, los sedimentos arrastrados por la lluvia, en bolsas. De este modo, se llevaron las muestras al laboratorio, donde se procedió a realizar los análisis pertinentes, los cuales están descritos más adelante.

### 2.3.2 Preparación de las muestras en el laboratorio

En el laboratorio, los sedimentos recogidos en las trampas Gerlach se dejaron secar a temperatura ambiente hasta peso constante. De este modo, se obtuvieron 6 muestras de cada episodio de lluvia, correspondiendo cada muestra a un Gerlach diferente (del total de 6): 3 gerlachs “Abiertos” y 3 “Cerrados”

Los sedimentos, una vez secos, se pesaron, y se tamizaron a 2 mm de diámetro, con el fin de separar la tierra fina (<2 mm de diámetro) de la gruesa (>2 mm). Una vez separada la muestra, ambas fracciones (fina y gruesa) se guardaron en bolsas independientes. A continuación, se procedió a realizar una calcinación a 500°C con el fin de cuantificar por pérdida de peso toda la materia orgánica, pudiendo así obtener su porcentaje respecto al total de la muestra.

Para ello, se tomó una muestra, realizando una réplica analítica de cada una, para realizar una media posterior, evitando así fallos puntuales a la hora de realizar los análisis, obteniendo de este modo 12 muestras por cada lluvia: 6 Gerlachs, cada uno de ellos divididos en 2 (fracción gruesa y fracción fina), tomando una muestra de cada fracción ( $6 \times 2 = 12$  muestras), realizando una réplica por muestra.

Previamente a la calcinación, cada muestra se introdujo en un crisol de cerámica, tarado previamente, y se secaron en estufa a 105°C, para eliminar la totalidad

de la humedad. Una vez eliminada, se pesaron los crisoles secos, para poder estimar, posteriormente, la cantidad de materia orgánica (MO) presente en la muestra.

A continuación, se procedió a calcinar las muestras: insertamos las muestras, previamente secadas a 105°C, en una mufla a 500°C, para eliminar toda la materia orgánica. El contenido de materia orgánica se calculó como:

$$\% MO = \frac{\text{Cantidad de muestra a } 505^{\circ}\text{C (g)}}{\text{Cantidad de muestra a } 105^{\circ}\text{C (g)}} * 100$$

### 2.3.3. Monitorización de la vegetación

Paralelamente, en cada muestreo se realizaron fotografías perpendiculares a la superficie de cada una de las parcelas, para así determinar, por conteo de contactos al proyectar la imagen sobre una cuadrícula de 75 nodos, tal y como se muestra en la Figura 9, el porcentaje de piedras, de suelo desnudo y de vegetación en los 0,75 m<sup>2</sup> de superficie de parcela, datos que serán utilizados a la hora de representar los resultados.



*Figura 9: Ejemplo de la monitorización, por medio de una cuadrícula, del porcentaje de suelo desnudo, pedregosidad y vegetación de cada Gerlach. Monitorización correspondiente al Gerlach Abierto 1, del día 22 de mayo de 2017.*

### 2.3.3 Organización del set de datos

Para cumplir con los objetivos del estudio, los datos que se recopilaron para cada episodio de lluvia fueron:

- **Tiempo (días)** transcurridos desde el inicio del estudio
- **Precipitación**, en mm totales, de cada episodio de lluvias
- **Precipitación**, en intensidad (mm/h), de cada episodio de lluvias
- **Sedimentos totales** recogidos en cada trampa Gerlach, en g y en g/m<sup>2</sup>.
- **Fracción fina** (<2 mm de diámetro) y **fracción gruesa** (>2 mm diámetro) de los sedimentos totales recogidos, en g y en g/m<sup>2</sup>.
- **Materia orgánica total en sedimentos**, anteriormente explicada, en porcentaje (%) y en g/m<sup>2</sup>.
- **Materia orgánica de la fracción fina** (<2 mm de diámetro) y **materia orgánica de la fracción gruesa** (>2 mm diámetro) de los sedimentos totales recogidos porcentaje y en g/m<sup>2</sup>.
- **% de suelo desnudo, % de pedregosidad y % de vegetación**, todas ellas calculadas por conteo de las imágenes.

#### 2.4. Análisis estadístico

En primer lugar, se calcularon las intensidades de precipitación (mm/h) de cada episodio de lluvia. A su vez, los datos referidos a la cantidad de sedimentos arrastrados (totales, finos y gruesos) y la cantidad de materia orgánica, se refirieron al tamaño de la parcela (0.75 m<sup>2</sup>) para así obtener las pérdidas de suelo por unidad de superficie.

El tratamiento estadístico de los datos se realizó con el programa informático IBM SPSS Statistics 22. Todas las variables introducidas son de tipo numérico salvo las variables nominales referidas al tratamiento (abierto o cerrado) y a la parcela (1, 2 ó 3). A su vez, se creó una nueva variable, también nominal, referida al porcentaje de vegetación (alto, medio, bajo, explicado más adelante), según la cantidad de recubrimiento vegetal de cada microparcela. Por tanto, se calcularon las medias y desviaciones estándar de cada variable y se determinó la cantidad de materia orgánica arrastrada en cada episodio de lluvias.

Para los análisis de correlación entre las variables, se llevó a cabo la prueba de correlación de Spearman, la cual se aplica a variables no paramétricas. De este modo, obtuvimos el coeficiente de correlación entre las variables referidas a los sedimentos arrastrados, la cantidad de materia orgánica, el porcentaje de vegetación y las tasas reales de erosión en cada caso.

Para determinar si existe una diferencia significativa en las variables entre el tratamiento (abierto o cerrado) y el porcentaje de vegetación (alto, medio o bajo) se usó la prueba U de Mann-Whitney para variables independientes, para la variable tratamiento, y la prueba de Kruskal – Wallis para muestras independientes, para la variable vegetación, estableciendo como:

- H0 = La distribución es la misma entre las categorías.
- H1 = La distribución es distinta entre las categorías.

Con un nivel de significancia  $\alpha=0,05$

## **2.5. Modelos de estimación de las tasas teóricas de erosión.**

Para la realización del estudio, se ha estimado la erosión teórica mediante dos métodos distintos: modelo ERMiT y modelo U.S.L.E.

### **2.5.1. Modelo ERMiT**

Para obtener la erosión potencial mediante el modelo ERMiT, se seleccionó el set de datos climáticos correspondiente a La Sotonera, situado a pocos kilómetros de la zona de estudio, con la que comparte condiciones climatológicas a lo largo del año. Se eligieron las opciones de Matorral (chaparral) como tipo de vegetación, una textura de suelo loam (areno arcilloso), una longitud de pendiente de 1,5 metros, y una severidad del fuego baja. A su vez la cobertura vegetal pre-incendio se fijó como un 40% de matorral, un 20% de herbáceas y un 40% de suelo desnudo. En la Figura 10 se muestra la aplicación web a partir de la cual se realizó la estimación, con los datos anteriormente mencionados ya introducidos.

## Erosion Risk Management Tool

(- *) Climate (+)		Soil Texture ?	
FLA SOTONERA HU SP BIRMINGHAM WB AP AL CHARLESTON KAN AP WV DENVER WB AP CO FLAGSTAFF WB AP AZ MOSCOW U OF I ID MOUNT SHASTA CA		clay loam silt loam sandy loam loam	
Custom Climate		Rock content ?	
		40 %	

Vegetation type ?	Hillslope gradient ?	Hillslope horizontal length ?	Soil burn severity class ?
Forest Range Chaparral	Top 0 % Middle 50 % Toe 30 %	5 ft	<input type="radio"/> High <input type="radio"/> Moderate <input checked="" type="radio"/> Low <input type="radio"/> Unburned
Range/chaparral pre-fire community description ?			
40 % shrub	20 % grass	40 % bare	

Running ERMIT...

Figura 10: Detalle aplicación ERMIT. El acceso al servidor se realiza a través del Moscow Forestry Sciences Laboratory (<https://forest.moscowfsi.wsu.edu/>), aunque la aplicación web se puede localizar en <https://forest.moscowfsi.wsu.edu/cgi-bin/fswep/ermit/ermit>.

### 2.5.2. Modelo U.S.L.E.

Tal y como hemos comentado en la introducción, en 1962, Wischmeier y Smith formularon la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo en su forma actual:

$$A = R * K * L * S * C * P$$

- El factor R, erosividad del suelo, fue calculado según las indicaciones de Foster *et al.* (1981). Para calcularlo, se aplicó la fórmula  $R = E * I_{30}$ , donde E representa la energía cinética del aguacero, estimada a su vez por la fórmula  $E = 210,2 + 89 \log I$ , siendo I la intensidad de lluvia (mm/h) y  $I_{30}$  la intensidad máxima en treinta minutos del aguacero (mm/h).
- El factor K, erosibilidad del suelo fue calculada a partir de los datos de la textura, materia orgánica y permeabilidad del agua, datos obtenidos en la caracterización del suelo previa a este estudio.
- Para calcular los factores L y S (factor de relieve) se utilizaron los valores que se obtuvieron en la medida, a pie de muestreo, de la pendiente de cada parcela, así como de su longitud.
- Por último, para calcular el factor C, se hizo uso de las tablas proporcionadas por Wischmeier y Smith (1978).
- A su vez, damos al factor P, prácticas de conservación, el valor 1, ya que no se ha realizado ninguna medida externa para reducir dicha erosión.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Cuantificación de la pérdida de suelo por erosión laminar anual y por episodio de lluvias.

La tasa total de erosión de la ladera es de 20,81 Mg/ha año, dato promedio de las tasas de erosión medidas en cada uno de los Gerlach, del total de los 19 episodios de lluvia en los que hemos registrado erosión a lo largo del estudio. En la Figura 11 se muestran los datos de dichas tasas, en Mg/ha, en relación a la intensidad de precipitación, en mm/h, y la cantidad de lluvia total registrada, en mm, por cada episodio de lluvias.

Las tasas de erosión y la intensidad de precipitación varían de forma similar, pero sin seguir exactamente el mismo patrón. Las mayores intensidades de precipitación, variable estrechamente ligada a la precipitación total por cada episodio de lluvias, se dan durante los meses de otoño y primavera, incluyendo una tormenta de verano, específicamente del 29 de agosto, la cual duró poco, pero fue de elevada intensidad (precipitación en forma de granizo). Se observa que una mayor intensidad conlleva a una mayor tasa de erosión.

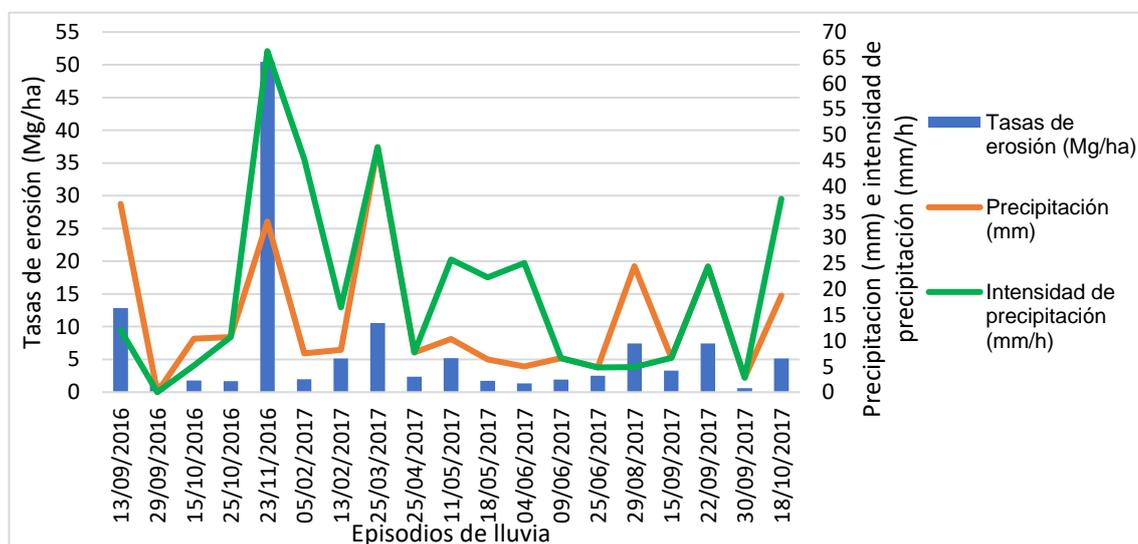


Figura 11: Tasas de erosión por episodio de lluvias, intensidades de precipitación en mm/h y precipitación total, en mm., por cada episodio de lluvias.

El 40,38% del total de la cantidad de sedimentos erosionados por hectárea durante la totalidad del estudio corresponden a un único episodio de lluvias, del 23 de

noviembre de 2016, donde, después de un mes sin lluvias, precipitaron 66,3 mm durante dos horas, obteniendo una intensidad media de 33,2 mm/h.

Posteriormente a esa lluvia, se observa que mayores intensidades de precipitación ya no erosionan la cantidad total del día 23 de noviembre. Sigue existiendo una correlación elevada entre los sedimentos erosionados por hectárea y la intensidad de precipitación, pero en menor proporción.

### 3.1.1. Correlaciones entre variables

Tabla 3: Prueba de coeficientes de correlación de Spearman. Tasas de erosión.

Rho de Spearman		Precipitación total (mm)	Intensidad de precipitación (mm/h)	Tasas de erosión (Mg/ha)
Precipitación total (mm)	Coefficiente de correlación	1,000	0,495	0,402
	Sig. (unilateral)		,000	,000
	N	114	114	114
Intensidad de precipitación (mm/h)	Coefficiente de correlación	0,495	1,000	0,679
	Sig. (unilateral)	,000		,000
	N	114	114	114
Tasas de erosión (Mg/ha)	Coefficiente de correlación	0,402	0,679	1,000
	Sig. (unilateral)	,000	,000	
	N	114	114	114

Los datos obtenidos son significativos en el nivel 0,01 para todas las correlaciones, existiendo una correlación positiva alta entre la intensidad de precipitación y las tasas de erosión.

Destaca que tiene mayor correlación las tasas de erosión con la intensidad de precipitación (0,679) que con la cantidad de lluvia (0,495), lo que explicaremos posteriormente en el apartado de discusión.

### 3.1.2. Tasa de erosión anual en cada trampa Gerlach.

Atendiendo al tratamiento de cada trampa Gerlach (abierto o cerrado), en la Tabla 4 se muestran las tasas de erosión recogidas en cada Gerlach, junto al porcentaje, durante el tiempo que duró el estudio.

Tabla 4: Tasas de erosión, en Mg/ha. y en porcentaje (%) en cada trampa Gerlach.

Parcela	Tratamiento			
	Abierto	Porcentaje	Cerrado	Porcentaje
1	63,58	51,46	15,73	12,73
2	15,23	12,33	11,26	9,11
3	10,21	8,26	7,54	6,10

Como podemos observar en la figura 12, las tasas de erosión son ligeramente superiores en el tratamiento abierto, siendo el Gerlach abierto 1, con una tasa de erosión de 63 Mg/ha, el que recoge más del 50% del total (51,47%), cuadruplicando el porcentaje del segundo Gerlach que mayores tasas recogió (12,73%). Si obviamos el dato del día 23 de noviembre, referido al gerlach abierto 1, apenas observamos diferencias entre tratamientos (Figura 13).

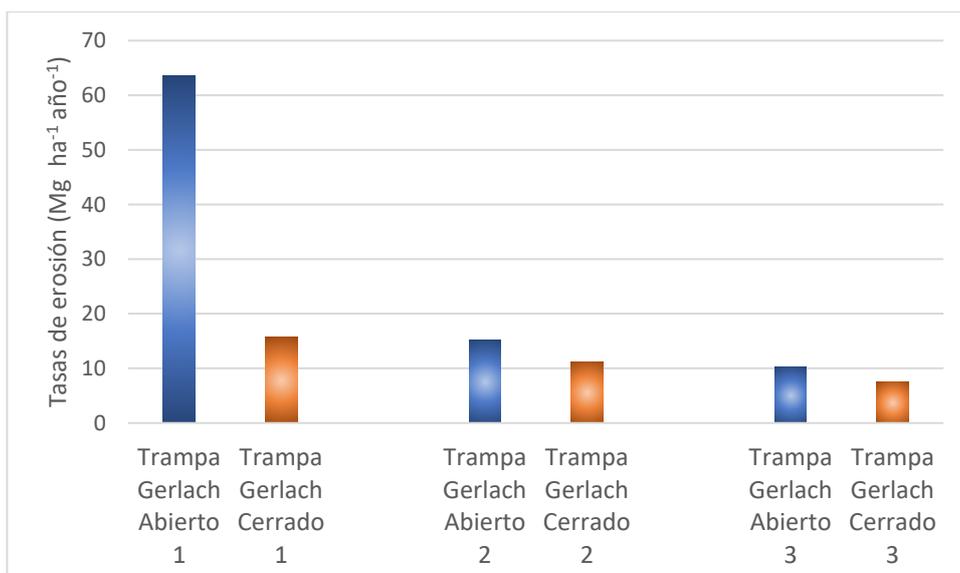


Figura 12: Comparación entre las tasas de erosión totales anuales en las diferentes Trampas Gerlachs, en Mg/ha/año.

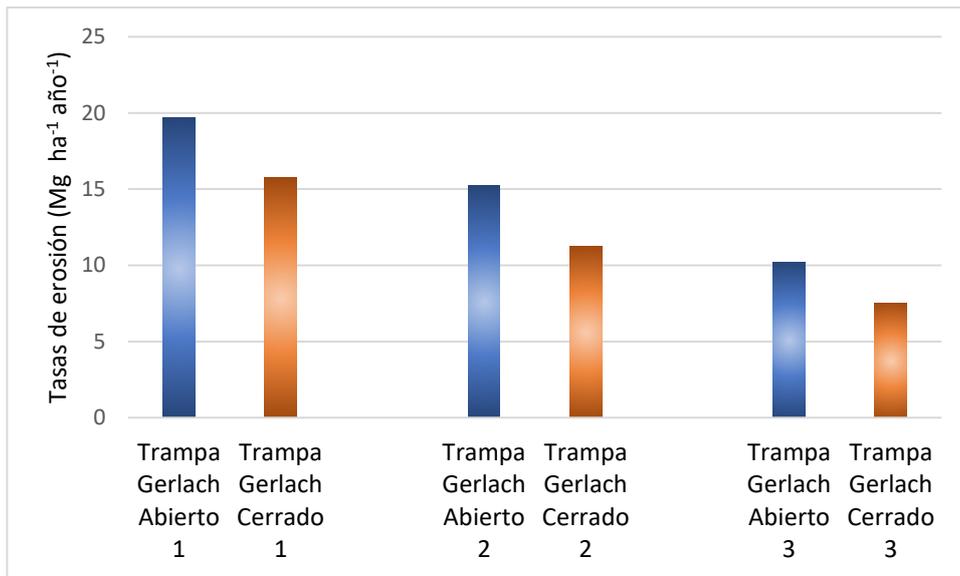


Figura 13: Comparación entre las tasas de erosión totales y anuales en las diferentes Trampas Gerlachs, en Mg/ha/año, sin contar el dato referido al Gerlach Abierto 1 del día 23 de noviembre de 2016.

### 3.1.3. Diferencias entre tratamiento

Para determinar si existen diferencias significativas entre ambos tratamientos (abierto o cerrado), se realizó la prueba U de Mann-Whitney para muestras independientes. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 5:

Tabla 5: Prueba U de Mann-Whitney para las variables referidas al tratamiento.

Diferencias entre Tratamiento – Prueba U de Mann-Whitney para muestras independientes		
Hipótesis nula	Significancia	Decisión
La distribución de sedmientos totales (g) es la misma entre las categorías de Tratamiento	0,159	Conserve la hipótesis nula.
La distribución de sedmientos finos (g) es la misma entre las categorías de Tratamiento	0,52	Conserve la hipótesis nula.
La distribución de sedmientos gruesos (g) es la misma entre las categorías de Tratamiento	0,054	Conserve la hipótesis nula.
La distribución de sedmientos totales (g/m <sup>2</sup> ) es la misma entre las categorías de Tratamiento	0,12	Conserve la hipótesis nula.
La distribución de sedmientos finos (g/m <sup>2</sup> ) es la misma entre las categorías de Tratamiento	0,426	Conserve la hipótesis nula.
La distribución de sedmientos gruesos (g/m <sup>2</sup> ) es la misma entre las categorías de Tratamiento	0,054	Conserve la hipótesis nula.
La distribución de materia orgánica total (g) es la misma entre las categorías de Tratamiento	0,416	Conserve la hipótesis nula.
La distribución de materia orgánica fina (g) es la misma entre las categorías de Tratamiento	0,565	Conserve la hipótesis nula.
La distribución de materia orgánica gruesa (g) es la misma entre las categorías de Tratamiento	0,448	Conserve la hipótesis nula.
La distribución de materia orgánica total (g/m <sup>2</sup> ) es la misma entre las categorías de Tratamiento	0,249	Conserve la hipótesis nula.
La distribución de materia orgánica fina (g/m <sup>2</sup> ) es la misma entre las categorías de Tratamiento	0,569	Conserve la hipótesis nula.
La distribución de materia orgánica gruesa (g/m <sup>2</sup> ) es la misma entre las categorías de Tratamiento	0,112	Conserve la hipótesis nula.
La distribución de porcentaje de suelo desnudo es la misma entre las categorías de Tratamiento	0,007	Rechace la hipótesis nula.
La distribución de porcentaje de vegetación es la misma entre las categorías de Tratamiento	0,983	Conserve la hipótesis nula.
La distribución de porcentaje de pedregosidad es la misma entre las categorías de Tratamiento	0,256	Conserve la hipótesis nula.
La distribución de tasa total de erosión (Mg/ha) es la misma entre las categorías de Tratamiento	0,12	Conserve la hipótesis nula.

Se rechaza la hipótesis nula en el caso del porcentaje de suelo desnudo, ya que la significancia es menor de 0,05, por lo que existe una diferencia significativa entre el porcentaje de superficie que se encuentra desnuda respecto al diferente tratamiento. Sin embargo, para el resto de parámetros medidos o calculados, nuestro análisis demuestra que no existen diferencias significativas entre las parcelas denominadas “abiertas” y las denominadas “cerradas”.

### 3.1.4. Tasa de erosión por cada episodio de lluvia por tratamiento.

En la Figura 14 se representan las tasas erosivas por tratamiento en cada episodio de lluvia. Cada uno (abierto y cerrado) se referirá al promedio de las trampas Gerlach situadas en cada uno de los tratamientos.

En dicha figura, el valor promedio de erosión de los Gerlachs abiertos ha sido cortado en la fecha 23/11/2016, con el fin de poder tener una vista significativa de la gráfica, ya que este valor llega casi a los 64 Mg/ha, por lo que habría sido complicado visualizar de manera correcta el resto de los valores. En la figura se observa que, particularmente en la segunda mitad del año, los Gerlachs situados en una posición abierta tienden a recoger más sedimentos que los que se encuentran en una posición cerrada. Sin embargo, como se ha visto anteriormente, debido a la gran variabilidad entre episodios de lluvia, las diferencias entre canales situados en una u otra posición no muestran diferencias significativas.

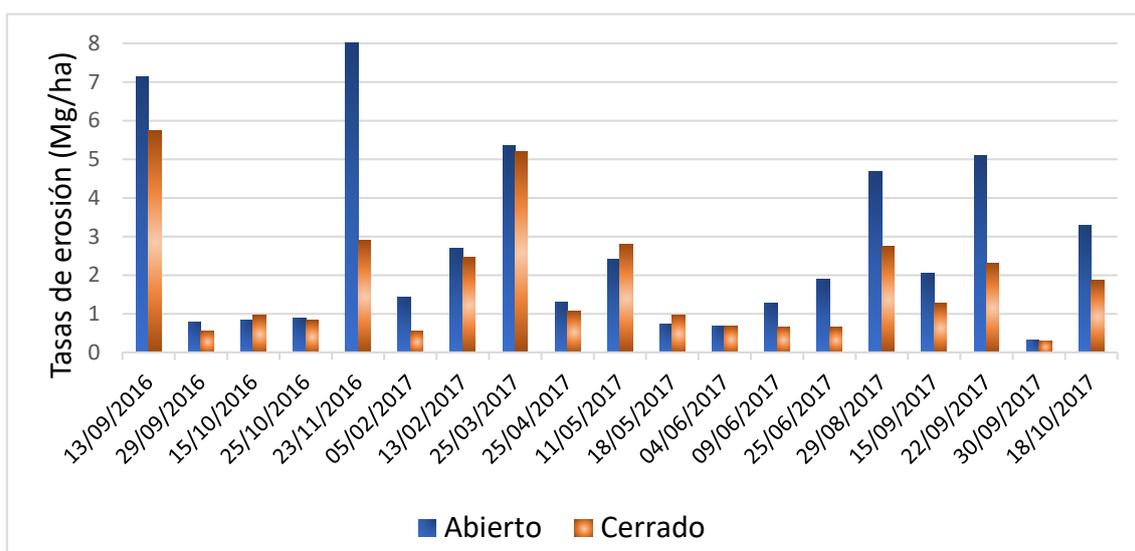


Figura 14: Tasas de erosión por episodio de lluvias en cada tratamiento.

## 3.2. Cuantificación de la cantidad de materia orgánica arrastrada en los sedimentos.

### 3.2.1. Materia orgánica total arrastrada

Se recogieron un total de 19 muestras en cada una de las trampas Gerlach. Con esos datos, se pudo realizar una estimación sobre la cantidad de materia orgánica perdida por erosión respecto del total de materia arrastrada. Esos datos se resumen en la Figura 15, en la que se observa que cuanto mayor es la cantidad total de sedimentos arrastrados, menor contenido en materia orgánica contienen. Dicho de otra forma, las lluvias poco erosivas pueden generar unos sedimentos que, aunque presentan proporciones variables de materia orgánica, en conjunto representan una pérdida pequeña de materia orgánica, ya que la cantidad total de sedimentos es pequeña, y en el caso de las lluvias muy erosivas, los sedimentos que éstas ocasionan son fundamentalmente minerales. Hemos suprimido el valor del día 23 de noviembre, correspondiente a la cifra de 3,3 kg de sedimentos, pues hacía que la figura no pudiera representarse con claridad.

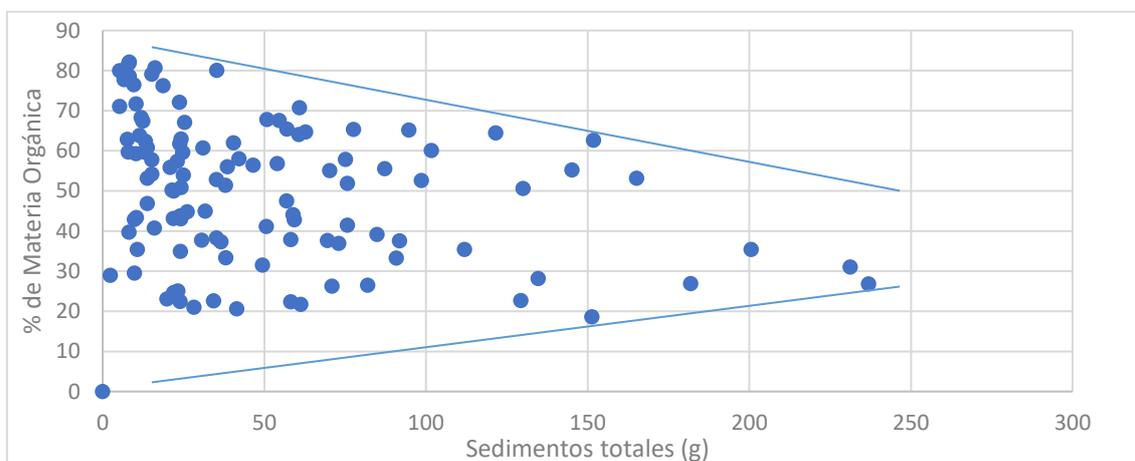


Figura 15: Relación entre la cantidad total de sedimentos (g) y el contenido de materia orgánica presente (%).

La Figura 16 representa los porcentajes de materia orgánica de la fracción fina y de la fracción gruesa. La relación de dichas variables con los sedimentos totales erosionados se asemeja en gran medida a la relación observada anteriormente entre la materia orgánica total con los sedimentos erosionados (Figura 15): encontramos mayor

cantidad de materia orgánica en aquellos episodios de lluvias en los que menor ha sido la cantidad de sedimentos totales arrastrados.

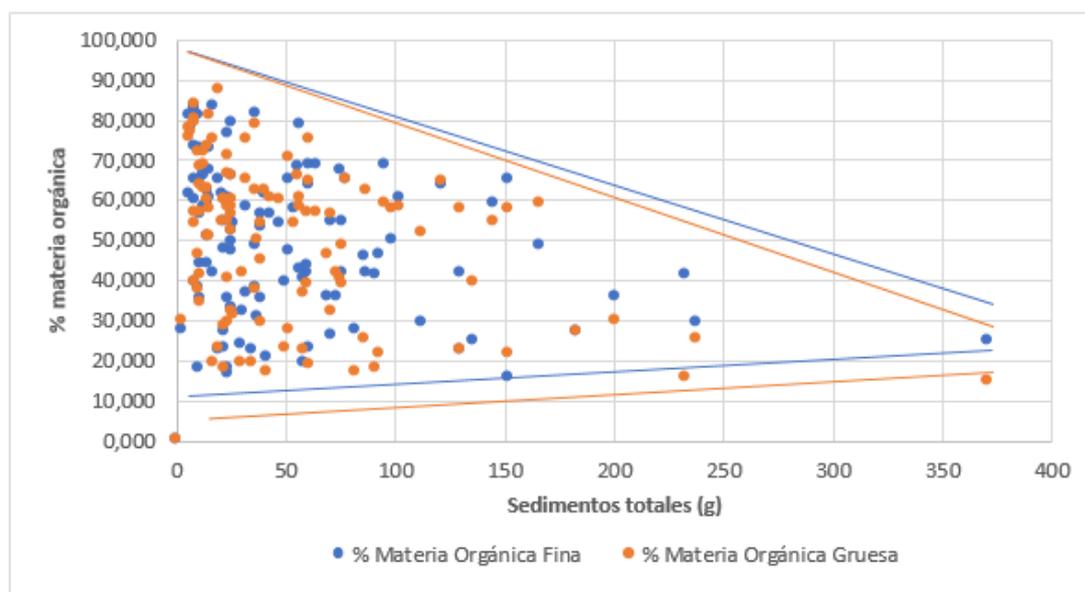


Figura 16: Relación entre los sedimentos totales (g) y el porcentaje de materia orgánica presente (%) de la fracción fina (azul) y gruesa (naranja).

En la Tabla 6 se muestra la comparación entre la media del contenido de materia orgánica en los sedimentos totales, en su fracción fina y en la fracción gruesa, en porcentajes, de las trampas Gerlach Abiertas (1) y Cerradas (2) durante el total del tiempo de estudio.

Tabla 6: Media, en porcentaje, de materia orgánica total, fina y gruesa en función del tratamiento (abierto o cerrado).

Tratamiento		% Materia Orgánica Total	% Materia Orgánica Fina	% Materia Orgánica Gruesa
1 - Abierto	Media	48,30	48,67	48,35
	N	57	57	57
	Desviación estándar	17,82	18,96	19,77
2 - Cerrado	Media	50,52	50,25	51,08
	N	57,00	57,00	57
	Desviación estándar	17,62	18,09	19,23

Observamos que no existen diferencias significativas entre tratamientos, obteniendo resultados similares en todos los casos, con una desviación estándar moderada.

### 3.2.2. Diferencias según fracción fina o gruesa por episodio de lluvias

Los datos presentes en la Figura 17 representan la media, por tratamiento abierto o cerrado respectivamente, del porcentaje de materia orgánica arrastrada total, fina y gruesa, por cada episodio de lluvias. Observamos que no existen diferencias representativas entre fracciones fina y gruesa, y que existe una tendencia opuesta entre la intensidad de precipitación y la cantidad de materia orgánica arrastrada, pues mayores intensidades arrastran menores cantidades de materia orgánica, tanto fina como gruesa.

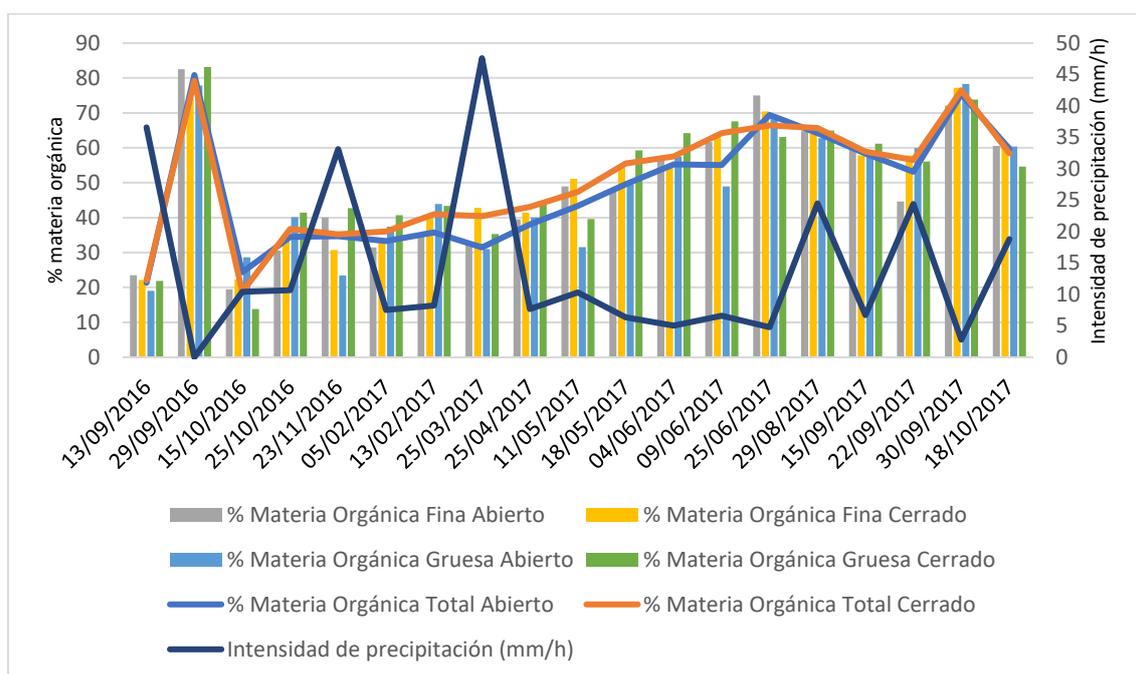


Figura 17: Media del porcentaje de materia orgánica total, fina y gruesa, por cada episodio de lluvias e intensidad de precipitación.

La cantidad de materia orgánica arrastrada aumenta considerablemente en el segundo episodio llovisno, siendo éste una tormenta seca (0 mm/h).

Posteriormente, la cantidad de materia orgánica, tanto fina como gruesa, aumenta paulatinamente con cada lluvia, hasta llegar a un máximo de un 76% de materia orgánica total arrastrada en el penúltimo registro, del 30 de septiembre de 2017, más de un año después de comenzar el estudio.

Para determinar la relación que tenían las variables arriba representadas, se decidió elaborar un estudio de correlación de Spearman. Los resultados se exponen en la Tabla 7:

Tabla 7: Prueba de coeficientes de correlación de Spearman. Relación entre materia orgánica e intensidad de precipitación.

Rho de Spearman		MO gruesa (%)	MO fina (%)	MO total (%)	Intensidad de lluvia (mm/h)
<b>MO gruesa (%)</b>	Coeficiente de correlación	1,000	,762**	,892**	-,557**
	Sig. (bilateral)		,000	,000	,000
	N	114	114	114	114
<b>MO fina (%)</b>	Coeficiente de correlación	,762**	1,000	,957**	-,536**
	Sig. (bilateral)	,000		,000	,000
	N	114	114	114	114
<b>MO total (%)</b>	Coeficiente de correlación	,892**	,957**	1,000	-,561**
	Sig. (bilateral)	,000	,000		,000
	N	114	114	114	114
<b>Intensidad de lluvia (mm/h)</b>	Coeficiente de correlación	-,557**	-,536**	-,561**	1,000
	Sig. (bilateral)	,000	,000	,000	
	N	114	114	114	114

\*\* . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (2 colas).

Correlación  significativa negativa

\* . La correlación es significativa en el nivel 0,05 (2 colas).

 Correlación significativa positiva

En la Tabla 8 se presentan los criterios que se han seguido a la hora de interpretar los resultados obtenidos en las pruebas de correlación. Estos valores se han utilizado tanto para correlaciones positivas como para negativas, pero sólo en caso de significación de la correlación.

Tabla 8: Criterios para interpretar los valores de la prueba de correlaciones.

Valor	Correlación
0,86-1	Muy alta
0,71-0,85	Alta
0,41-0,7	Moderada
0,21-0,4	Baja
0-0,2	Muy baja

La intensidad de precipitación tiene una significancia negativa moderada con las variables relacionadas con el porcentaje de materia orgánica total, fina y gruesa: cuanto mayor es la intensidad de la lluvia, menor cantidad de materia orgánica se arrastra del

total de sedimentos erosionados. A su vez, las variables que representan el porcentaje de materia orgánica total, fina y gruesa presentan correlaciones positivas altas y muy altas, entre sí.

### 3.3. Monitorización de la regeneración natural post-incendio en la zona de estudio y su efecto sobre la estabilización de la erosión.

En la Figura 18 se muestra, por episodios de lluvia, el porcentaje de recubrimiento vegetal en la superficie de cada trampa Gerlach:

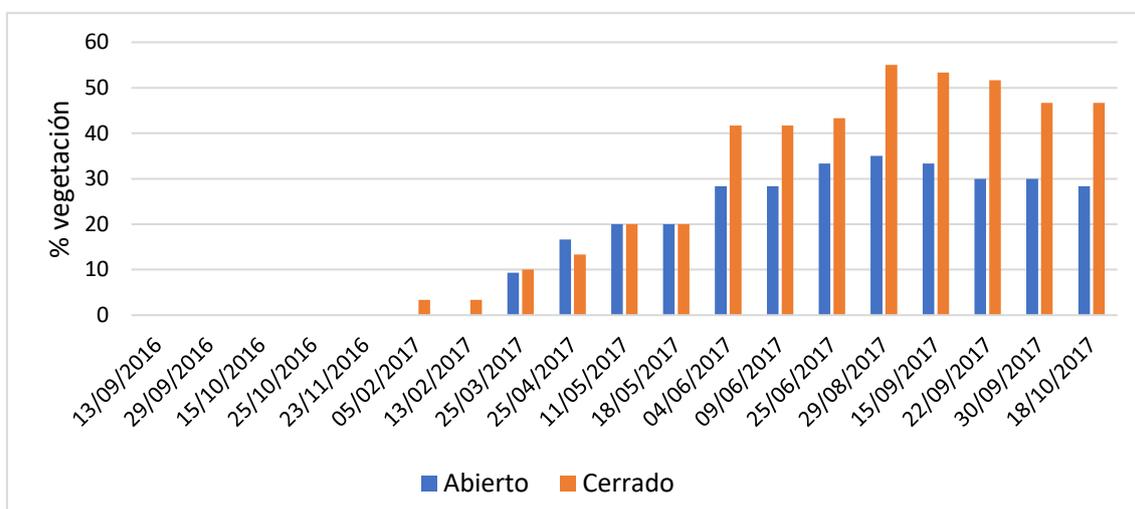


Figura 18: Porcentaje de vegetación, por trampa Gerlach, por cada episodio de lluvia.

La vegetación empezó a desarrollarse en alguna de las parcelas a partir del día 5 de febrero, 6 meses después del incendio. No obstante, fue el día 25 de marzo cuando se pudo observar vegetación ya en todas las parcelas.

El máximo de vegetación se produjo a finales de agosto, llegándose a un porcentaje de recubrimiento de la superficie del 35% en las parcelas abiertas, y del 55% en las cerradas, y descendiendo levemente a partir de dicha fecha.

Para comprobar la posible relación entre el recubrimiento vegetal con el resto de variables, se llevó a cabo un test de correlación de Spearman. Los resultados se pueden observar en la Tabla 9:

Tabla 9: Prueba de coeficientes de correlación de Spearman. Relación entre variables generales y porcentaje de vegetación.

Rho de Spearman		Porcentaje materia orgánica total	Porcentaje materia orgánica fina	Porcentaje materia orgánica gruesa	Porcentaje de vegetación
<b>Porcentaje materia orgánica total</b>	Coefficiente de correlación	1,000	,957**	,892**	,591**
	Sig. (bilateral)		,000	,000	,000
	N	114	114	114	114
<b>Porcentaje materia orgánica fina</b>	Coefficiente de correlación	,957**	1,000	,762**	,608**
	Sig. (bilateral)	,000		,000	,000
	N	114	114	114	114
<b>Porcentaje materia orgánica gruesa</b>	Coefficiente de correlación	,892**	,762**	1,000	,471**
	Sig. (bilateral)	,000	,000		,000
	N	114	114	114	114
<b>Porcentaje de vegetación</b>	Coefficiente de correlación	,591**	,608**	,471**	1,000
	Sig. (bilateral)	,000	,000	,000	
	N	114	114	114	114

\*\* . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (2 colas)  Correlación significativa positiva

\* . La correlación es significativa en el nivel 0,05 (2 colas).

Los criterios que se han seguido a la hora de interpretar los resultados obtenidos en las pruebas de correlación se muestra, al igual que en el apartado 3.2, en la tabla 8.

Resalta la correlación positiva entre el porcentaje de vegetación con el porcentaje de materia orgánica arrastrada. Para determinar si existían diferencias significativas debido al porcentaje de vegetación para las variables mencionadas, se realizó la prueba Kruskal - Wallis para muestras independientes. Para la realización de dicha prueba, se procedió a dar un valor nominal a la variable porcentaje de vegetación, tal y como se muestra en la tabla 10. Este valor nominal ha sido determinado a raíz del estudio de Pérez nieto *et al.* (2015), en el que se diferencia la severidad y probabilidad de erosión por escorrentía en función del porcentaje de cubierta vegetal. Los resultados obtenidos en la prueba se presentan en la tabla 11.

Tabla 10: Valores nominales de la variable Vegetación.

Porcentaje (%)	Valor
0 - 20	1
20 - 80	2
80 - 100	3

Tabla 11: Prueba Kruskal - Wallis para las variables según el porcentaje de vegetación

Diferencias entre porcentajes de vegetación - Prueba de Kruskal - Wallis para muestras independientes			
	Hipótesis nula	Significancia	Decisión
1	La distribución de Porcentaje de Materia orgánica total es la misma entre las categorías de Porcentaje de vegetación.	0,000	Rechace la hipótesis nula.
2	La distribución de Porcentaje de Materia orgánica fina es la misma entre las categorías de Porcentaje de vegetación.	0,000	Rechace la hipótesis nula.
3	La distribución de Porcentaje de Materia orgánica gruesa es la misma entre las categorías de Porcentaje de vegetación.	0,000	Rechace la hipótesis nula.

Se muestran significaciones asintóticas. El nivel de significancia es 0.05

Las tres variables estudiadas presentan diferencias representativas en relación al porcentaje de vegetación.

### 3.3.1. Efecto de la vegetación sobre la estabilización de la erosión.

Observamos un descenso en las tasas de erosión totales a lo largo del tiempo, paralelas al desarrollo del recubrimiento vegetal de las parcelas. En la Figura 19 se muestra en un gráfico de dispersión los valores de las tasas de erosión medidas en cada episodio de lluvia frente al grado de cobertura del suelo por vegetación.

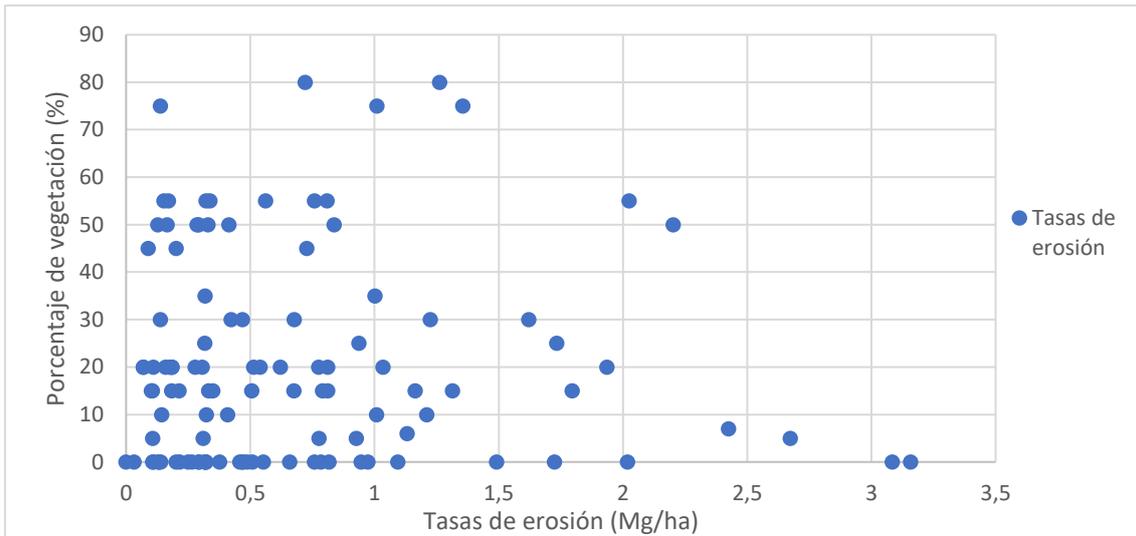


Figura 19: Gráfico de dispersión para las tasas de erosión (Mg/ha). en relación al porcentaje de recubrimiento de vegetación.

Las mayores tasas de erosión se registraron cuando el porcentaje de vegetación en las parcelas era muy bajo o nulo. Por tanto, un mayor recubrimiento de la superficie por la vegetación supone que se registren tasas más bajas de erosión.

En la Figura 20 observamos la relación que guarda el nivel de recubrimiento vegetal en las parcelas de las trampas Gerlach con respecto de las tasas de sedimentos erosionados totales, finos y gruesos respectivamente:

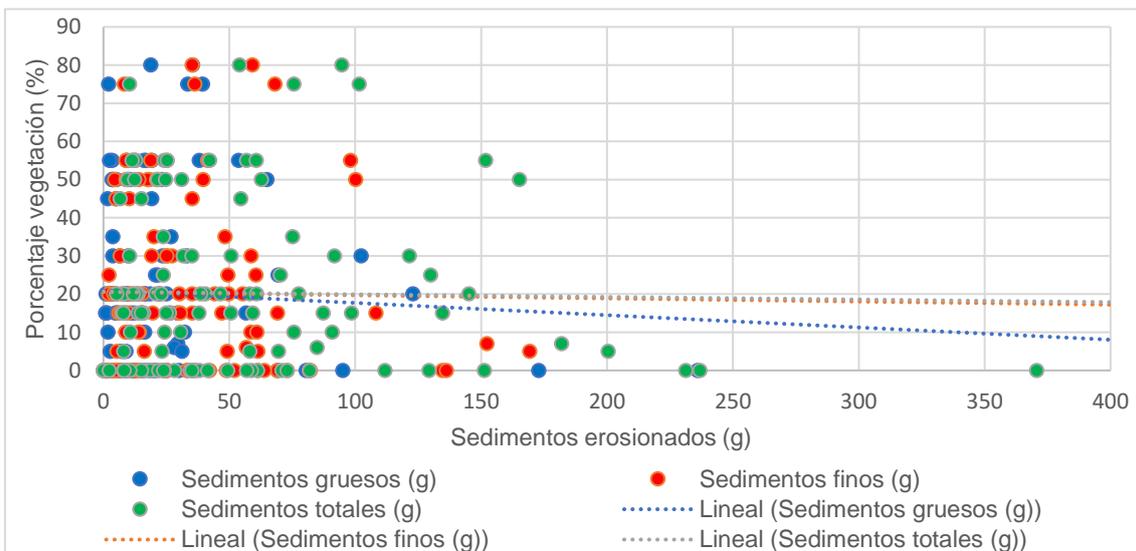


Figura 20: Prueba de dispersión para las variables de sedimentos erosionados en relación al porcentaje de vegetación.

Se observa una tendencia negativa entre los sedimentos arrastrados y el porcentaje de vegetación. Un aumento de la cobertura vegetal reduce la cantidad de sedimentos arrastrados, tanto finos como gruesos, en cada lluvia.

### 3.4. Comparación de las tasas de erosión obtenidas con modelos de erosión.

Los resultados obtenidos han sido comparados con dos modelos diferentes que miden las tasas erosivas potenciales, dependiendo de los factores de cada zona. Esos modelos son el modelo ERMiT (Erosion Risk Management Tool) y modelo U.S.L.E. (Universal Soil Loss Equation).

#### 3.4.1. Modelo ERMiT

Sediment Delivery					
Probability that sediment yield will be exceeded 1 % <input type="button" value="go"/>	Event sediment delivery (ton ac <sup>-1</sup> )				
	Year following fire				
	1st year	2nd year	3rd year	4th year	5th year
Untreated	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8
Seeding	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8
Mulch (0.5 ton ac <sup>-1</sup> )	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8
Mulch (1 ton ac <sup>-1</sup> )	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8
Mulch (1.5 ton ac <sup>-1</sup> )	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8
Mulch (2 ton ac <sup>-1</sup> )	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8
Erosion Barriers: Diameter <input type="text" value="0.15"/> ft Spacing <input type="text" value="5"/> ft <input type="button" value="go"/> <input type="button" value="?"/>					
Logs & Wattles	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8

Figura 21: Resultados modelo ERMiT.

Los resultados obtenidos son los que se representan en la Figura 21. Tomando como 1% la probabilidad de que se exceda el rendimiento de sedimentos, la cantidad de sedimentos que se estiman que deberían erosionarse durante el primer año es de 3,8 Mg/acre, lo que corresponde a 9,39 Mg/ha. (1 acre = 0.404686 ha)

### 3.4.2. Modelo U.S.L.E.

Para la obtención de la tasa de erosión potencial por medio del modelo USLE, se aplicó la ecuación de Pérdida de Suelo, anteriormente explicada. Los valores de las variables se exponen a continuación:

- Índice de erosividad R = 4660,43
- Factor de erosibilidad K = 0,013
- Factor de relieve SL = 3,345
- Factor de cubierta vegetal C = 0,04
- Prácticas de conservación del suelo P = 1 puesto que no se ha aplicado ninguna práctica.

Sustituyendo los valores anteriores en la fórmula descrita en el apartado 2.5.2. Modelo U.S.L.E. , obtendremos la tasa teórica de erosión según el modelo U.S.L.E.:

$$A = 4660,43 * 0,013 * 3,345 * 0,04 * 1 = 8,106 \text{ Mg/ha}$$

### 3.4.3. Comparación entre las tasas teóricas de erosión frente a las reales

La Tabla 12 muestra las tasas de erosión potencial según los modelos U.S.L.E. y ERMiT respectivamente, en comparación a la erosión real obtenida durante la elaboración de este estudio. Cabe destacar que en el cálculo del valor promedio de erosión medido en canales Gerlach no se han diferenciado parcelas abiertas de cerradas, debido a la ausencia de diferencias significativas entre ambas en ninguno de los parámetros relativos a la actividad erosiva.

*Tabla 12: Comparación de las tasas de erosión según los modelos U.S.L.E. y ERMiT frente a la erosión real, en Mg/ha.*

Modelo	Tasa de erosión (Mg/ha/año)
U.S.L.E.	8,11
ERMiT	9,39
Erosión real	20,81

Como se representa en la Figura 22, los resultados obtenidos mediante mediciones reales duplican a las tasas de erosión estimadas en ambos modelos, que arrojan valores muy parecidos entre ellos, aunque el modelo ERMiT estima una mayor cantidad de erosión que el modelo U.S.L.E., pero igualmente, sus valores quedan lejos de las tasas reales obtenidas.

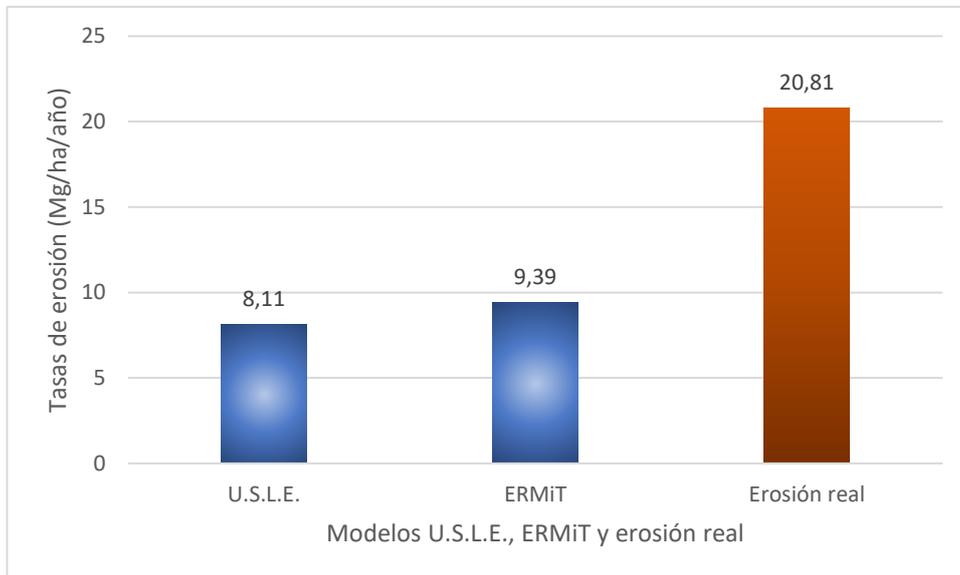


Figura 22: Comparación de las tasas de erosión según los modelos U.S.L.E. y ERMiT frente a la erosión real, en Mg/ha/año.



## 4. DISCUSIÓN

La erosión hídrica se define como el desprendimiento y arrastre de partículas de suelo por la acción del agua. El impacto de las gotas de lluvia (splash) o la rotura de los agregados durante la humectación rápida de la capa más superficial del suelo durante la lluvia (slaking) causan la liberación de partículas individuales o micro agregados del suelo y la escorrentía generada es la encargada de realizar el transporte y la sedimentación (Bermúdez, 1980).

### 4.1 Pérdida de suelo por erosión laminar

Tras los 19 episodios de lluvia registrados, pudimos observar la evolución temporal de la cantidad de sedimentos arrastrados por las lluvias. Un único episodio de lluvias provocó el arrastre del 40,38% de los sedimentos totales recogidos durante el estudio. Hablamos del día 23 de noviembre de 2016, donde la precipitación fue de 66,3 litros durante algo menos de 2 horas, provocando el arrastre de más de 50 Mg/ha de sedimentos. Las lluvias posteriores, de mayor intensidad incluso, apenas superaron los 10 Mg/ha. Esto puede ser debido, por una parte, a que todos los materiales más superficiales y fácilmente erosionables ya se arrastraron en la lluvia del día 23, quedando en superficie los materiales más resistentes a la erosión, y produciéndose así menores tasas de erosión en las lluvias posteriores. Por otra parte, durante los meses finales del estudio (junio – octubre 2017), se redujeron los sedimentos erosionados, debido a que la superficie se encontraba más cubierta de vegetación, lo que constituye una efectiva protección frente a la erosión del suelo (Cawson *et al.*, 2012).

Todos los estudios de medición en parcelas coinciden en que unos pocos, o incluso muy pocos, aguaceros de elevada intensidad y duración pueden ser los responsables de la mayor parte de la actividad erosiva (Bautista, 1999; Regüés, 2002; Fernández, 2005.), en parcelas de erosión instaladas sobre un pinar quemado en Alicante, encontró que un solo evento extraordinario de lluvia acaecido 5 años después del incendio produjo más del doble de sedimentos que el total de sedimentos recogidos desde que se produjo el incendio, demostrando de esta forma la importancia de estos eventos extraordinarios de lluvia.

Este caso coincide muy bien lo ocurrido en nuestra zona de estudio, pues se registraron pocas tormentas durante el periodo de estudio, pero por lo general de elevada intensidad, que descargaron de manera torrencial durante breves periodos de

tiempo, acumulando un elevado volumen de lluvia en cada episodio. Todo ello provocó fuertes escorrentías superficiales, que causaron elevadas tasas de erosión. Por contraposición, hubo periodos de tiempo de más de dos meses en los que la precipitación fue inferior a 0,1 mm.

Comprobamos que la intensidad de precipitación, más que su volumen total, y las tasas de erosión guardan una elevada correlación durante la totalidad del tiempo que duró el estudio. En muchos de los eventos de lluvia, las tasas de erosión fueron mayores, supuestamente, en las trampas situadas en posiciones abiertas que en las situadas en posiciones cerradas. No obstante, el análisis estadístico de los datos no permitió demostrar ningún efecto significativo de la posición, en abierto o cerrado, de los canales Gerlach, debido a la gran variabilidad espacial y temporal de las tasas de erosión obtenidas en los distintos episodios de lluvia. Además, el gerlach abierto 1 recogió en la lluvia del 23 de noviembre de 2016 una cantidad muy elevada y anómala de sedimentos, probablemente por el hecho de que entrase lateralmente en la parcela escorrentía proveniente de fuera, como sugería la formación de pequeños surcos. Sin embargo, esta trampa de erosión no mantuvo este comportamiento anómalo en los siguientes eventos de lluvia.

La ausencia de grandes diferencias entre las tasas de erosión en parcelas abiertas y cerradas confirmó, pues, que no existía interceptación de la lluvia por parte de las ramas de los árboles quemados tras el incendio, o que, si existía tal efecto, su importancia era menor que la propia variabilidad espacial y temporal de los eventos de lluvia y su actividad erosiva asociada.

#### **4.2 Erosión del suelo y pérdida de materia orgánica**

Los contenidos de materia orgánica en los sedimentos presentaron amplias oscilaciones durante el período estudiado. Nuestros resultados coinciden con los de Sánchez *et al.* (1994) que observan un incremento de la materia orgánica en suelos que han sufrido fuegos de baja intensidad. Así, observamos que durante el mes de junio y, posteriormente, durante los meses de septiembre y octubre, la cantidad de materia orgánica en los sedimentos aumentó, descendiendo sin embargo en los meses estivales. Estas variaciones estacionales han sido estudiadas por numerosos autores (Van Veen y Paul, 1981; Parton *et al.*, 1987), que encuentran a menudo un máximo de concentración de materia en primavera, seguido de un descenso durante el verano y de un segundo máximo más pequeño en otoño. Leinweber *et al.* (1994) encuentran también

descensos significativos del contenido en materia orgánica entre los meses de julio y agosto.

Nuestros resultados han permitido demostrar que los eventos de lluvia poco erosivos conllevan la producción de sedimentos más ricos en materia orgánica, mientras que los eventos más erosivos producen unos sedimentos de naturaleza más mineral. Ello sugiere que la materia orgánica que se pierde por erosión es fundamentalmente la que se encuentra en las capas más superficiales del suelo, probablemente los restos orgánicos que se van depositando sobre la superficie del suelo a partir del desfronde de las copas parcialmente calcinadas y que, por su baja densidad, es fácilmente transportable incluso por una escorrentía de baja energía cinética. Este resultado es relevante, ya que demuestra el escaso efecto protector frente a la erosión de esta capa de hojarasca parcialmente quemada que se puede ir depositando progresivamente sobre la superficie del suelo a partir de las copas de los árboles. A su vez, el contenido de materia orgánica en la fracción gruesa de los sedimentos evoluciona de manera paralela a la contenida en la fracción fina: pequeñas raíces y hojas secas, a causa del otoño, de la vegetación regenerada son arrastradas por la escorrentía en los aguaceros. Dichas tormentas, acompañadas en ocasiones de granizo, hacen que pequeñas fracciones vegetales sean desprendidas de la planta, siendo arrastradas hasta el canal Gerlach.

Las trampas Gerlach cerradas recogen un porcentaje superior de materia orgánica que las trampas abiertas; el mayor porcentaje de recubrimiento vegetal natural, tal y como ampliaremos más adelante, es el responsable de que en el tratamiento cerrado se recojan mayores cantidades de componentes orgánicos.

### **4.3 Regeneración de la vegetación y erosión**

A lo largo del periodo de estudio se produjo una notable recuperación natural de la cubierta vegetal, acompañada de una sensible reducción de las tasas de erosión. Ello confirma que la regeneración de la vegetación ha servido como medida correctora natural para la zona afectada por el incendio, y lo único que se propone a partir de ahora sería llevar a cabo un seguimiento de que nuestras previsiones de auto-restauración se siguen cumpliendo en un futuro cercano.

En este sentido, Mataix-Solera y Guerrero (2007) formulan las siguientes preguntas, las cuales fueron utilizadas al inicio del estudio: ¿Por qué actuar en los casos en los que el ecosistema puede recuperarse por sí solo? ¿Por qué empeñarnos a veces

en reforestar zonas donde de manera natural se restaurarán por sí solas en muy poco tiempo?

En ocasiones, algunas actuaciones posteriores al incendio pueden causar un daño irreparable, como son el uso de maquinaria pesada en labores de extracción de madera quemada, con el consiguiente daño al suelo y la vegetación que está germinando y rebrotando. (Mataix–Solera y Guerrero, 2001)

La regeneración natural de la vegetación en la zona de estudio comenzó durante el mes de febrero, observable únicamente en las parcelas cerradas y, durante los meses posteriores, también en los abiertos, tal y como se observa en el Anexo 2, (Figura 28 y 29).

La severidad del fuego no fue en nuestra zona tan elevada como para impedir el rebrote de las carrascas, lo que ha facilitado también la regeneración de la cubierta herbácea. Esto ha sido ya previamente reportado por varios autores, los cuales afirman que las comunidades vegetales de los ecosistemas mediterráneos tienen en general una alta resiliencia a los incendios forestales, es decir tienen gran capacidad para volver a las condiciones anteriores a la alteración (Lloret y Zedler, 2009).

La vegetación comenzó a desarrollarse primero en aquellas zonas situadas alrededor de los árboles quemados, en las parcelas denominadas cerradas. Posteriormente, la vegetación fue germinando en las demás zonas, hasta obtener un máximo en el mes de junio, descendiendo ligeramente en los meses siguientes, llegando a cubrir, un año después del inicio del estudio, una superficie elevada. Este desarrollo de la vegetación puede haber tenido distintos efectos aditivos en la reducción de las tasas de erosión, ya sea por su efecto protector frente al impacto de las gotas de lluvia (splash) como por el efecto agregante de las raíces o a la reducción en la velocidad de la escorrentía superficial (Ubeda y Sala, 1996).

Durante los meses julio y agosto del 2017, las precipitaciones fueron escasas, y las temperaturas cálidas. Observamos que la vegetación se secó de manera muy rápida, cayendo pequeñas ramas y hojas a la superficie de las parcelas, las cuales fueron arrastradas por la escorrentía superficial durante la primera lluvia del otoño. Es por ello que observamos que, aunque la cantidad de sedimentos totales disminuyó durante estos meses, la cantidad de materia orgánica que contenían aumentó.

#### 4.4 Tasas estimadas según los modelos USLE y ERMIT

El área de estudio presenta, en promedio, unas tasas de erosión que duplican las tasas potenciales calculadas por medio de los modelos U.S.L.E. y ERMIT, que han aportado estimaciones de tasas de erosión muy parecidas.

Debe tenerse en cuenta, en este sentido, que los modelos utilizados en este trabajo para la estimación de las tasas de erosión se alimentan de una serie de datos necesariamente limitada, por razones operativas (Rodrigues, 2012). Ello supone en su aplicabilidad práctica que habrá siempre características específicas que puedan afectar a la erosión y que no son tenidas en cuenta en el cálculo. Sin embargo, si estas características no han sido consideradas por los modelos es porque deberían tener un peso relativamente pequeño sobre la erosión, y en consecuencia no causar una desviación muy grande entre los datos estimados y las mediciones reales.

No obstante, en nuestro caso sí observamos una desviación notable entre los valores medidos y estimados, y solamente uno de los canales Gerlach presentó una tasa de erosión similar a las aportadas por los modelos, siendo, en todos los otros, mayor la tasa de erosión medida respecto a la estimada. Ello implica que debe existir algún atributo no considerado por los modelos y que afecta de manera importante a la erosión (Lattera, 2007).

Nuestro año de estudio ha resultado particularmente seco, con un volumen total de precipitación registrada en el embalse de Montearagón de prácticamente un 25% por debajo del promedio. Sin embargo, una gran proporción de los episodios de lluvia han sido de carácter tormentoso. La tabla 13 muestra, en este sentido, que, aunque solamente un 32% de los eventos de lluvia han sido fuertes o muy fuertes, éstos han supuesto el 66% de la cantidad total de agua registrada como precipitaciones. Como se ha demostrado anteriormente, existe un elevado grado de correlación entre la intensidad de precipitación y la cantidad de sedimentos arrastrados con la escorrentía, más que con el volumen total de precipitación. Ello sugiere que el elevado volumen de agua precipitado en forma de eventos tormentosos ha sido la causa principal de que la tasa de erosión registrada haya sido sensiblemente mayor a la estimada a partir de los modelos USLE y ERMIT.

Tabla 13: Distribución de los eventos de lluvia registrados durante el periodo de estudio. Se indica la frecuencia de cada tipo de episodios de lluvia según la categorización AEMET en número de eventos y volumen de precipitación de cada categoría de evento.

Clase de precipitación (AEMET, 2014)	Intensidad (mm h <sup>-1</sup> )	Frecuencia (en número de eventos, %)	Frecuencia (en volumen de precipitación, %)
<b>Débiles</b>	< 2	5	0
<b>Moderadas</b>	2 a 15	63	33
<b>Fuertes</b>	15 a 30	21	34
<b>Muy fuertes</b>	30 a 60	11	32
<b>Torrenciales</b>	> 60	0	0

Nuestros resultados demuestran que los modelos de erosión no siempre se ajustan a la realidad, por lo que resulta necesario realizar mediciones en campo para valorar sus estimaciones.

No obstante, sería necesario estudiar los procesos erosivos en los años venideros, pues con un régimen normal de lluvias y con el desarrollo de la vegetación, las tasas de erosión se irán reduciendo, previsiblemente, hasta valores normales, similares a los que había antes del incendio.

## 5. CONCLUSIONES

- La tasa real de erosión en la zona de estudio ha sido de 20,81 Mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, más del doble que lo estimado por las tasas de los modelos U.S.L.E. (8,11 Mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>) y ERMiT (9,39 Mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>).
- No se han detectado diferencias significativas entre el tratamiento abierto y cerrado por lo que respecta a tasas globales de erosión o de exportación de materia orgánica.
- La materia orgánica perdida por erosión fue muy elevada durante los primeros episodios de lluvia, descendiendo posteriormente, y volviendo a aumentar a medida que la cubierta vegetal se regeneraba. No se han encontrado diferencias significativas entre las cantidades de materia orgánica exportadas por erosión en la fracción gruesa o fina de los sedimentos recogidos.
- Las variables que más han influido en la cantidad de materia orgánica erosionada han sido el porcentaje de vegetación que recubría cada parcela y la intensidad de precipitación. Dado que dicho recubrimiento ha aumentado significativamente a lo largo del estudio, se ha considerado como medida correctora natural, la cual estabilizará, previsiblemente, las tasas de erosión en años venideros.
- Los modelos de erosión estimada no siempre se ajustan a la realidad de cada suelo. Con este trabajo se comprueba la necesidad de realizar medidas reales, que corroboren o desmientan, como en nuestro caso, los valores estimados.

## 6. RECOMENDACIONES PRÁCTICAS

- Utilizar barreras laterales en las microparcels de erosión, en el caso de tener una superficie mayor en cada parcela, pues en lluvias muy fuertes, la escorrentía podría entrar lateralmente en la parcela y generar así datos no representativos.
- Sería conveniente realizar un seguimiento de las tasas de erosión anuales en los años posteriores, pues la regeneración natural de la vegetación es evidente, obteniendo, previsiblemente, tasas de erosión normales en la zona de estudio a medio plazo.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

Abad, N., R.N. Caturla, J. Baeza, C. Bladé, F. Vieira, E. Carbó, A. Valdecantos, A. Bonet, I. Serrasolsa, R. Guàrdia, J. Raventós, J.A. Alloza, A. Escarré, J. Bellot y V.R. Vallejo. 1996. Regeneración de los montes quemados. Páginas: 51-148 en: V.R. Vallejo (editor) La restauración de la cubierta vegetal en la Comunidad Valenciana. Fundación CEAM, Valencia.

Aznar, Javier M. 2012. El fuego, de aliado a enemigo. *Flamma* 3: 19 – 23.

Aznar, Javier M. 2013. El régimen de incendios actual y la influencia humana. Red Temática Nacional de Efectos de los Incendios Forestales sobre los suelos (FUEGORED). Ficha técnica FGR2013/10

Badia, D. y Martí, C. 2003. «Plant ash and heat intensity effects on chemical and physical properties of two contrasting soils». *Arid Land Research and Management*, nº 17, 23-41.

Bautista, S. 1999. Regeneración post-incendio de un pinar (*Pinus halepensis*, Miller) en ambiente semiárido. Erosión del suelo y medidas de conservación a corto plazo. Memoria de Tesis Doctoral. Universidad de Alicante

Chandler C., Cheney Ph., Thomas Ph., Trabaud L. y Williams D. 1983. Fire effects on soil, water, and air. En *Fire in forestry*. Vol. I. Forest fire behavior and effects. John Wiley and Sons, Inc., U.S.A.

Cerdá, A., Bodí, M. B. 2007. Erosión hídrica en suelos afectados por incendios forestales. En: *Incendios forestales, suelos y erosión hídrica*. Mataix-Solera, J. (Ed.). Caja Mediterráneo. CEMACAM Alicante (Comunidad Valenciana).

Cerdá, Artemi, Mataix-Solera, Jorge. 2009. Prefacio. En: Cerdà A, Mataix-Solera J (Eds.), *Efectos de los incendios forestales sobre los suelos en España*. El estado de la cuestión visto por los 27 científicos españoles. Càtedra de Divulgació de la Ciència. Universitat de València. Valencia, pp. 493-529.

Certini, G. 2005. Effects of fire on properties of forest soils: a review. *Oecologia* 143: 1–10.

Clérici, C., García Préchac, F. 2001. Aplicaciones del modelo USLE para estimar pérdidas de suelo por erosión en Uruguay y la región sur de la cuenda del río de la Plata. 92 Arociencia. (2001) Vol.V N°1 pág 92 – 103. DeBano, I. F., Neary, d. G. Y Ffolliott, p. F. 1998. Fire's effects on ecosystems. New York. John Wiley and Sons.

González-Vila, F. J., Almendros, G., González-Pérez, A., Knicker, H., González-Vázquez, R., Hernández, Z., Piedra-Buena, A., De La Rosa, J. M. 2009. Transformaciones de la materia orgánica del suelo por incendios naturales y calentamientos controlados en condiciones de laboratorio. En Efectos de los incendios forestales sobre los suelos en España. El estado de la cuestión visto por los científicos españoles (Cerdà, A. y Mataix-Solera, J. coord.). Valencia, Cátedra de divulgación de la ciencia, Universitat de València, 219-267.

Dunne, T. 1977. Evaluation of erosion conditions and trends Food and Agriculture Organization of the United Nations

IAEST. 2017. Estadística Local de Aragón. Ficha territorial: Fornillos de Apiés.

Hormazábal, J. 2006. Degradación espacial y temporal del bosque nativo, en el noreste de la isla grande de Chiloé, x región.

Knoepp, J.D., DeBano, L.F. y Neary, D.G. 2005. «Soil Chemistry», en Wildland fire in ecosystem. Effects of fire on soil and water (Neary D. G., Ryan K. C. y DeBano L. F., coord.). Ogden, UT. General Technical Report RMRS\_GTR-42-vol. 4, United States Department of Agriculture, Forest Service and Rocky Mountain Research Station, 53-71.

Lattera, P., Orúe, M., Cabria, F. 2007. Expansión de la frontera agrícola en Argentina y erosión hídrica: mapas de riesgo utilizando el Modelo Usle con apoyo de SIG. Teledetección, hacia un mejor entendimiento de la dinámica global y regional Ed. Martin, 2007, ISBN: 978-987-543-126-3

León, J., Bodí, B. M., Cerdà, A., Badía, D. 2013. Effects of type and ash thickness on the temporal variation of runoff in a calcareous soil from SE-Spain. Geoderma 209–210: 143–152. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.06.018>

Lloret, F., Pausas, J. G. y Vila, M. 2003. «Response of Mediterranean plant species to different fire regimes in Garraf Natural Park (Catalonia, Spain): field observations and modelling predictions». Plant ecology, nº 167, 223-235.

Lloret, F. y Zedler, P. H. 2009. «The effect of forest fire on vegetation», en Fire effects on Soils and Restoration Strategies (Cerdà, A. y Robichaud, P. R., coord.). Enfield, Edit. Science Publishers, 257-295.

Lloret, F. 2004. Régimen de incendios y regeneración. En F. Vallarades, Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante (págs. 101-126). Madrid.

Llovet, J. 2006. Degradación del suelo posterior al fuego en condiciones mediterráneas. Identificación de factores de riesgo

Llovet, J., S. Bautista y A. Cerdá. 1994. Influencia de las lluvias otoñales sobre la respuesta hidrológica y erosiva post incendio de los suelos en ambiente semiárido. Páginas: 81-92 en: J. Arnáez, J.M. García Ruiz y A. Gómez Villar (editores). Geomorfología en España, Sociedad española Geomorfología, Logroño.

Martínez, J. 2017. Efectos de los incendios forestales sobre las propiedades edáficas y las tasas de erosión en los montes de Castejón (valle medio del Ebro). Universidad de Zaragoza, pp 15 – 16.

Martínez, M. 2012. Dinámica vegetal de un matorral mediterráneo tras material y métodos eliminación de competencia e introducción de especies. efectos a medio plazo. Universidad politécnica superior de Gandia, pp 26 – 27.

Meteorología, A. E. de. (s. f.). Valores climatológicos normales: Huesca Aeropuerto - Agencia Estatal de Meteorología - AEMET. Gobierno de España. Recuperado 7 de noviembre de 2017, a partir de <http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/datosclimatologicos/valoresclimatologicos>

Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA) [Internet]. 2017. Último acceso: 11 de noviembre de 2017. Disponible: [http://www.mapama.gob.es/es/desarrollo-rural/estadisticas/incendiosforestales2001-2010finalmod1\\_tcm7-349255.pdf](http://www.mapama.gob.es/es/desarrollo-rural/estadisticas/incendiosforestales2001-2010finalmod1_tcm7-349255.pdf)

Mataix-Solera, J., Cerdá, A. 2009. Incendios forestales en España. Ecosistemas terrestres y suelos. En: Cerdà A, Mataix-Solera J (Eds.), 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, Valencia, pp. 493-529.

Novara, A., Gristina, L., Saladino, S.S., Santoro, A., Cerdá, A. 2011. Soil erosion assessment on tillage and alternative soil managements in a Sicilian vineyard. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.09.007>

Pausas, J. (2004). La recurrencia de incendios en el monte mediterráneo.

Pausas, J., Ribeiro, E., y Vallejo, R. 2004. Post-fire regeneration variability of *Pinus halepensis* in the eastern Iberian Peninsula. *Forest Ecology and Management*, Vol.203, 251-259.

Pausas, Juli G. 2010. Fuego y evolución en el Mediterráneo. *Investigación y Ciencia*, número 407 (agosto): 56 – 63.

Rodriguez, M., Ibarra, P., Echeverría, M., Pérez-Cabello, F. y de la Riva, J. 2012. Propuesta metodológica para la modelización de la resiliencia de la vegetación afectada por incendios forestales en España Grupo GEOFOREST. Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio. Universidad de Zaragoza.

Robichaud, Peter R.; Elliot, William J.; Pierson, Fredrick B.; Hall, David E.; Moffet, Corey A. 2014. Erosion Risk Management Tool (ERMiT). [Online at <<https://forest.moscowsl.wsu.edu/fswepp/>>.] Moscow, ID: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station

Sánchez, J. R., Mangas, V. J., Ortiz, C. y Bellot, J. 1994. Forest fire effect on soil chemical properties and runoff. In: *Soil Erosion as a consequence of forest fires*. En: Sala, M. y Rubio, J. L. (Eds). Geoforma Ediciones. Logroño: 53-65.

Silva. O. 2002. Evaluación de los componentes de erosión de los modelos EPIC y WEPP y de producción de agua del modelo SWAT en condiciones de sabana y altas pendientes. Facultad de Agronomía. Universidad central de Venezuela.

Úbeda, X, Sala, M. 1996. Cambios en la física del suelo e incremento de la escorrentía y la erosión tras un incendio forestal. *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe* 21, 559–576.

Valladares, F. 2004. Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante. Páginas 309-334. Ministerio de Medio Ambiente, EGRAF, S. A., Madrid. ISBN: 84-8014-552-8.

## ANEXO I: Tabla general de datos

Tabla 14: Tabla general de datos. (1/6)

Tratamiento	Parcela	Fecha	Tiempo (días)	P (mm)	P (mm/h)	Sed. Total (g)	Sed. Fino (g)	Sed. Grueso (g)	Sed. Total (g/m2)	Sed. Fino (g/m2)	Sed. grueso (g/m2)
A	1	13/09/2016	1	12,1	36,6	370,78	134,7	236,08	494,37	179,600	314,773
A	1	29/09/2016	18	Seca (viento)	Seca (viento)	35,25	15,1	20,15	47,00	20,133	26,867
A	1	15/10/2016	33	5,2	10,4	28,25	10,25	18	37,67	13,667	24,000
A	1	25/10/2016	43	10,7	10,7	19,85	10,36	9,49	26,47	13,813	12,653
A	1	23/11/2016	72	66,3	32,1	3294,72	2669,51	625,21	4392,96	3559,347	833,613
A	1	Del 2 al 5 del 02/2017	146	45,3	7,55	61,25	36,24	25,01	81,67	48,320	33,347
A	1	13/02/2017	154	16,5	8,25	70,93	69,14	1,79	94,57	92,187	2,387
A	1	25/03/2017	194	47,6	47,6	181,93	152,39	29,54	242,57	203,187	39,387
A	1	25/04/2017	225	7,7	7,7	58,16	49,69	8,47	77,55	66,253	11,293
A	1	11/05/2017	241	25,8	10,32	91,81	58,69	33,12	122,41	78,253	44,160
A	1	18/05/2017	248	22,3	6,35	31,73	25,26	6,47	42,31	33,680	8,627
A	1	04/06/2017	265	25,1	5,02	21,94	18,36	3,58	29,25	24,480	4,773
A	1	08.09/06/2017	270	6,6	6,6	21,44	17,58	3,86	28,59	23,440	5,147
A	1	25/06/2017	286	4,8	4,8	56,94	18,82	38,12	75,92	50,093	25,827
A	1	29/08/2017	347	4,9	24,5	151,83	98,15	53,68	202,44	130,867	71,573
A	1	15/09/2017	368	6,7	6,7	42,16	25,25	16,91	56,21	33,667	22,547
A	1	22/09/2017	375	24,4	24,4	165,2	100,23	64,97	220,27	133,640	86,627
A	1	30/09/2017	383	2,8	2,8	9,59	4,47	5,12	12,79	5,960	6,827
A	1	18/10/2017	401	37,6	18,8	54,58	35,35	19,23	72,77	47,133	25,640
A	2	13/09/2016	1	12,1	36,6	129,38	48,8	80,58	172,51	65,067	107,440
A	2	29/09/2016	18	Seca (viento)	Seca (viento)	16,21	11,3	4,91	21,61	15,067	6,547
A	2	15/10/2016	33	5,2	10,4	23,91	12,8	11,11	31,88	17,067	14,813
A	2	25/10/2016	43	10,7	10,7	36,59	24,25	12,34	48,79	32,333	16,453
A	2	23/11/2016	72	66,3	22,1	231,27	136,2	95,07	308,36	181,600	126,760
A	2	Del 2 al 5 del 02/2017	143-146	45,3	7,55	21,89	10,22	11,67	29,19	13,627	15,560
A	2	13/02/2017	154	16,5	8,25	73,04	61,33	11,71	97,39	81,773	15,613
A	2	25/03/2017	194	47,6	47,6	84,9	56,74	28,16	113,20	75,653	37,547
A	2	25/04/2017	225	7,7	7,7	26,165	15,29	10,875	34,89	20,387	14,500
A	2	11/05/2017	241	25,8	10,32	50,66	35,35	15,31	67,55	47,133	20,413
A	2	18/05/2017	248	22,3	6,35	15,96	14,99	0,97	21,28	19,987	1,293
A	2	04/06/2017	265	25,1	5,02	20,84	2,25	18,59	27,79	3,000	24,787
A	2	08.09/06/2017	269-270	6,6	6,6	13,83	4,45	9,38	18,44	5,933	12,507
A	2	25/06/2017	286	4,8	4,8	23,79	2,22	21,57	31,72	2,960	28,760
A	2	29/08/2017	347	4,9	24,5	121,54	19,14	102,4	162,05	25,520	136,533
A	2	15/09/2017	368	6,7	6,7	70,26	49,47	20,79	93,68	65,960	27,720
A	2	22/09/2017	375	24,4	24,4	130,02	60,6	69,42	173,36	80,800	92,560
A	2	30/09/2017	383	2,8	2,8	5,26	2,25	3,01	7,01	3,000	4,013
A	2	18/10/2017	401	37,6	18,8	46,56	30,14	16,42	62,08	40,187	21,893

Tabla 14. Tabla general de datos (2/6)

Tratamiento	Parcela	Fecha	Tiempo (días)	MO Total (%)	MO Fino (%)	MO grueso (%)	MO Total (g/m2)	MO Fino (g/m2)	MO grueso (g/m2)	% suelo desnudo	% piedras	% vegetación
A	1	13/09/2016	1	18,731	25,149	15,069	92,601	45,168	47,433	45	55	0
A	1	29/09/2016	18	80,045	81,677	78,822	37,621	16,444	21,177	20	80	0
A	1	15/10/2016	33	21,056	23,829	19,477	7,931	3,257	4,675	20	80	0
A	1	25/10/2016	43	23,113	22,778	23,479	6,117	3,146	2,971	20	80	0
A	1	23/11/2016	72	39,644	43,135	24,741	1741,561	1535,321	206,240	70	30	0
A	1	Del 2 al 5 del 02/2017	146	21,729	23,558	19,079	17,745	11,383	6,362	30	70	0
A	1	13/02/2017	154	26,275	26,107	32,766	24,849	24,067	0,782	30	70	0
A	1	25/03/2017	194	26,941	26,878	27,267	65,351	54,612	10,739	40	53	7
A	1	25/04/2017	225	22,349	19,806	37,269	17,331	13,122	4,209	30	50	20
A	1	11/05/2017	241	37,573	46,524	21,712	45,994	36,406	9,588	45	25	30
A	1	18/05/2017	248	44,973	37,249	75,129	19,027	12,545	6,481	15	55	30
A	1	04/06/2017	265	50,001	48,080	59,852	14,627	11,770	2,857	10	40	50
A	1	08.09/06/2017	270	50,207	54,907	28,798	14,352	12,870	1,482	10	40	50
A	1	25/06/2017	286	65,412	79,250	58,580	49,661	19,886	29,774	30	15	55
A	1	29/08/2017	347	62,692	65,122	58,250	126,914	85,223	41,691	35	10	55
A	1	15/09/2017	368	58,000	56,258	60,600	32,603	18,940	13,663	30	15	55
A	1	22/09/2017	375	53,151	49,269	59,140	117,074	65,843	51,231	25	25	50
A	1	30/09/2017	383	76,487	81,100	72,460	9,780	4,834	4,947	20	30	50
A	1	18/10/2017	401	67,556	68,130	66,500	49,163	32,112	17,051	20	35	45
A	2	13/09/2016	1	22,698	22,843	22,610	39,155	14,863	24,292	65	35	0
A	2	29/09/2016	18	80,750	83,084	75,377	17,453	12,518	4,935	15	85	0
A	2	15/10/2016	33	22,500	16,738	29,137	7,173	2,857	4,316	15	85	0
A	2	25/10/2016	43	37,356	30,647	50,542	18,225	9,909	8,316	20	80	0
A	2	23/11/2016	72	31,095	41,777	15,792	95,885	75,867	20,018	60	40	0
A	2	Del 2 al 5 del 02/2017	143-146	43,162	23,502	60,379	12,598	3,203	9,395	15	85	0
A	2	13/02/2017	154	36,928	35,976	41,910	35,963	29,419	6,544	35	65	0
A	2	25/03/2017	194	39,180	45,998	25,442	44,352	34,799	9,553	40	54	6
A	2	25/04/2017	225	44,848	53,965	32,030	15,646	11,002	4,644	15	70	15
A	2	11/05/2017	241	41,185	47,079	27,576	27,819	22,190	5,629	25	60	15
A	2	18/05/2017	248	40,746	42,111	19,650	8,671	8,417	0,254	10	75	15
A	2	04/06/2017	265	55,923	61,899	55,199	15,539	1,857	13,682	15	65	20
A	2	08.09/06/2017	269-270	60,821	62,639	59,958	11,215	3,717	7,499	10	70	20
A	2	25/06/2017	286	72,107	71,630	76,747	22,872	2,272	20,601	15	60	25
A	2	29/08/2017	347	64,522	63,905	64,638	104,561	16,308	88,252	60	10	30
A	2	15/09/2017	368	55,119	54,690	56,140	51,636	36,074	15,562	55	20	25
A	2	22/09/2017	375	50,637	42,156	58,040	87,784	34,062	53,722	50	25	25
A	2	30/09/2017	383	71,114	61,620	78,210	4,987	1,849	3,139	55	25	20
A	2	18/10/2017	401	56,410	54,361	60,170	35,019	21,846	13,173	30	50	20

Tabla 14. Tabla general de datos (3/6)

Tratamiento	Parcela	Fecha	Tiempo (días)	P (mm)	P (mm/h)	Sed. Total (g)	Sed. Fino (g)	Sed. Grueso (g)	Sed. Total (g/m2)	Sed. Fino (g/m2)	Sed. grueso (g/m2)
A	3	13/09/2016	1	12,1	36,6	34,34	33,3	1,04	45,79	44,400	1,387
A	3	29/09/2016	18	Seca (viento)	Seca (viento)	8,01	5,9	2,11	10,68	7,867	2,813
A	3	15/10/2016	33	5,2	10,4	9,77	3,95	5,82	13,03	5,267	7,760
A	3	25/10/2016	43	10,7	10,7	9,84	4,29	5,55	13,12	5,720	7,400
A	3	23/11/2016	72	66,3	22,1	38,11	25,36	12,75	50,81	33,813	17,000
A	3	Del 2 al 5 del 02/2017	143-146	45,3	7,55	24,03	3,62	20,41	32,04	4,827	27,213
A	3	13/02/2017	154	16,5	8,25	58,86	51,99	6,87	78,48	69,320	9,160
A	3	25/03/2017	194	47,6	47,6	134,68	108,26	26,42	179,57	144,347	35,227
A	3	25/04/2017	225	7,7	7,7	13,77	8,99	4,78	18,36	11,987	6,373
A	3	11/05/2017	241	25,8	10,32	38	29,69	8,31	50,67	39,587	11,080
A	3	18/05/2017	248	22,3	6,35	7,61	6,16	1,45	10,15	8,213	1,933
A	3	04/06/2017	265	25,1	5,02	7,94	6,89	1,05	10,59	9,187	1,400
A	3	08.09/06/2017	269-270	6,6	6,6	15,16	9,69	5,47	81,16	59,000	7,293
A	3	25/06/2017	286	4,8	4,8	60,87	44,25	16,62	81,16	59,000	22,160
A	3	29/08/2017	347	4,9	24,5	77,62	55,37	22,25	103,49	73,827	29,667
A	3	15/09/2017	368	6,7	6,7	40,45	15,41	25,04	53,93	20,547	33,387
A	3	22/09/2017	375	24,4	24,4	87,26	30,59	56,67	116,35	40,787	75,560
A	3	30/09/2017	383	2,8	2,8	8,26	4,4	3,86	11,01	5,867	5,147
A	3	18/10/2017	401	37,6	18,8	145,18	22,23	122,95	193,57	29,640	163,933
C	1	13/09/2016	1	12,1	36,6	236,88	63,9	172,98	315,84	85,200	230,640
C	1	29/09/2016	18	Seca (viento)	Seca (viento)	18,72	9,81	8,91	24,96	13,080	11,880
C	1	15/10/2016	33	5,2	10,4	49,38	25,01	24,37	65,84	33,347	32,493
C	1	25/10/2016	43	10,7	10,7	35,22	19,08	16,14	46,96	25,440	21,520
C	1	23/11/2016	72	66,3	22,1	111,88	81,82	30,06	149,17	109,093	40,080
C	1	Del 2 al 5 del 02/2017	143-146	45,3	7,55	23,26	16,23	7,03	31,01	21,640	9,373
C	1	13/02/2017	154	16,5	8,25	69,49	61,38	8,11	92,65	81,840	10,813
C	1	25/03/2017	194	47,6	47,6	98,56	69,14	29,42	131,41	92,187	39,227
C	1	25/04/2017	225	7,7	7,7	38,57	35,24	3,33	51,43	46,987	4,440
C	1	11/05/2017	241	25,8	10,32	75,11	48,27	26,84	100,15	64,360	35,787
C	1	18/05/2017	248	22,3	6,35	23,83	20,07	3,76	31,77	26,760	5,013
C	1	04/06/2017	265	25,1	5,02	12,83	9,36	3,47	17,11	12,480	4,627
C	1	08.09/06/2017	269-270	6,6	6,6	24,21	11,65	12,56	32,28	15,533	16,747
C	1	25/06/2017	286	4,8	4,8	25,33	9,26	16,07	33,77	12,347	21,427
C	1	29/08/2017	347	4,9	24,5	94,72	59,25	35,47	126,29	79,000	47,293
C	1	15/09/2017	368	6,7	6,7	54,05	35,29	18,76	72,07	47,053	25,013
C	1	22/09/2017	375	24,4	24,4	75,69	36,36	39,33	100,92	48,480	52,440
C	1	30/09/2017	383	2,8	2,8	10,36	8,35	2,01	13,81	11,133	2,680
C	1	18/10/2017	401	37,6	18,8	101,65	68,16	33,49	135,53	90,880	44,653

Tabla 14. Tabla general de datos (4/6)

Tratamiento	Parcela	Fecha	Tiempo (días)	MO Total (%)	MO Fino (%)	MO grueso (%)	MO Total (g/m2)	MO Fino (g/m2)	MO grueso (g/m2)	% suelo desnudo	% piedras	% vegetación
A	3	13/09/2016	1	22,601	22,700	19,447	10,348	10,079	0,270	20	80	0
A	3	29/09/2016	18	81,767	82,610	79,411	8,733	6,499	2,234	5	95	0
A	3	15/10/2016	33	29,514	17,992	37,334	3,845	0,948	2,897	5	95	0
A	3	25/10/2016	43	42,911	38,362	46,427	5,630	2,194	3,436	10	90	0
A	3	23/11/2016	72	33,375	35,233	29,679	16,959	11,913	5,045	40	60	0
A	3	Del 2 al 5 del 02/2017	146	34,941	47,451	32,723	11,195	2,290	8,905	30	70	0
A	3	13/02/2017	154	44,088	42,368	57,099	34,600	29,370	5,230	40	60	0
A	3	25/03/2017	194	28,196	25,260	40,225	50,632	36,462	14,170	60	25	15
A	3	25/04/2017	225	46,914	44,734	51,014	8,613	5,362	3,251	10	75	15
A	3	11/05/2017	241	51,411	53,092	45,406	26,048	21,017	5,031	30	55	15
A	3	18/05/2017	248	62,909	65,028	53,906	6,383	5,341	1,042	10	75	15
A	3	04/06/2017	265	59,739	60,128	57,181	6,324	5,524	0,801	10	75	15
A	3	08.09/06/2017	270	54,181	67,354	58,058	43,973	39,739	4,234	15	70	15
A	3	25/06/2017	286	70,786	69,122	75,217	57,450	40,782	16,668	35	45	20
A	3	29/08/2017	347	65,328	65,280	65,449	67,610	48,194	19,416	40	40	20
A	3	15/09/2017	368	61,994	61,584	62,246	33,435	12,653	20,782	35	45	20
A	3	22/09/2017	375	55,544	42,425	62,625	64,623	17,304	47,319	35	50	15
A	3	30/09/2017	383	78,576	73,593	84,256	8,654	4,317	4,336	30	50	20
A	3	18/10/2017	401	55,264	59,254	54,542	106,975	17,563	89,413	20	60	20
C	1	13/09/2016	1	26,843	29,364	25,911	84,780	25,018	59,761	65	35	0
C	1	29/09/2016	18	76,259	65,508	88,095	19,034	8,568	10,466	10	90	0
C	1	15/10/2016	33	31,566	39,539	23,384	20,783	13,185	7,598	25	75	0
C	1	25/10/2016	43	38,306	38,625	37,928	17,988	9,826	8,162	20	80	0
C	1	23/11/2016	72	35,446	29,270	52,256	52,876	31,932	20,944	55	45	0
C	1	Del 2 al 5 del 02/2017	143-146	25,083	18,204	40,964	7,779	3,939	3,840	20	75	5
C	1	13/02/2017	154	37,653	36,435	46,872	34,886	29,818	5,068	35	60	5
C	1	25/03/2017	194	52,656	50,490	57,748	69,197	46,545	22,652	50	35	15
C	1	25/04/2017	225	56,061	56,236	54,204	28,830	26,424	2,407	20	60	20
C	1	11/05/2017	241	57,886	67,638	40,349	57,971	43,532	14,440	30	35	35
C	1	18/05/2017	248	61,742	60,830	66,610	19,618	16,278	3,339	15	50	35
C	1	04/06/2017	265	59,738	58,412	63,314	10,219	7,290	2,929	10	35	55
C	1	08.09/06/2017	269-270	62,948	66,259	59,876	20,320	10,292	10,027	15	30	55
C	1	25/06/2017	286	67,096	79,706	59,829	22,660	9,841	12,819	15	30	55
C	1	29/08/2017	347	65,217	68,900	59,066	82,365	54,431	27,934	10	10	80
C	1	15/09/2017	368	56,808	58,165	54,256	40,940	27,369	13,571	10	10	80
C	1	22/09/2017	375	51,917	55,019	49,050	52,395	26,673	25,722	15	10	75
C	1	30/09/2017	383	71,719	72,587	68,111	9,907	8,081	1,825	10	15	75
C	1	18/10/2017	401	60,144	61,011	58,379	81,515	55,447	26,068	10	15	75

Tabla 14. Tabla general de datos (5/6)

Tratamiento	Parcela	Fecha	Tiempo (días)	P (mm)	P (mm/h)	Sed. Total (g)	Sed. Fino (g)	Sed. Grueso (g)	Sed. Total (g/m2)	Sed. Fino (g/m2)	Sed. grueso (g/m2)
C	2	13/09/2016	1	12,1	36,6	151,35	82,2	69,15	201,80	109,600	92,200
C	2	29/09/2016	18	Seca (viento)	Seca (viento)	15,16	3,56	11,6	20,21	4,747	15,467
C	2	15/10/2016	33	5,2	10,4	21,99	15,5	6,49	29,32	20,667	8,653
C	2	25/10/2016	43	10,7	10,7	24,14	13,55	10,59	32,19	18,067	14,120
C	2	23/11/2016	72	66,3	22,1	23,91	15,22	8,69	31,88	20,293	11,587
C	2	Del 2 al 5 del 02/2017	143-146	45,3	7,55	10,45	7,36	3,09	13,93	9,813	4,120
C	2	13/02/2017	154	16,5	8,25	56,87	42,22	14,65	75,83	56,293	19,533
C	2	25/03/2017	194	47,6	47,6	200,57	169,36	31,21	267,43	225,813	41,613
C	2	25/04/2017	225	7,7	7,7	30,64	14,25	16,39	40,85	19,000	21,853
C	2	11/05/2017	241	25,8	10,32	59,28	47,05	12,23	79,04	62,733	16,307
C	2	18/05/2017	248	22,3	6,35	24,94	19,58	5,36	33,25	26,107	7,147
C	2	04/06/2017	265	25,1	5,02	24,72	14,12	10,6	32,96	18,827	14,133
C	2	08.09/06/2017	269-270	6,6	6,6	12,39	8,95	3,44	16,52	11,933	4,587
C	2	25/06/2017	286	4,8	4,8	11,43	8,95	2,48	15,24	11,933	3,307
C	2	29/08/2017	347	4,9	24,5	60,72	41,48	19,24	80,96	55,307	25,653
C	2	15/09/2017	368	6,7	6,7	31,03	21,06	9,97	41,37	28,080	13,293
C	2	22/09/2017	375	24,4	24,4	62,78	39,58	23,2	83,71	52,773	30,933
C	2	30/09/2017	383	2,8	2,8	6,66	5,01	1,65	8,88	6,680	2,200
C	2	18/10/2017	401	37,6	18,8	15,16	10,21	4,95	20,21	13,613	6,600
C	3	13/09/2016	1	12,1	36,6	41,42	33,3	8,12	55,23	44,400	10,827
C	3	29/09/2016	18	Seca (viento)	Seca (viento)	8,25	5,2	3,05	11,00	6,933	4,067
C	3	15/10/2016	33	5,2	10,4	0	0	0	0,00	0,000	0,000
C	3	25/10/2016	43	10,7	10,7	2,36	1,42	0,94	3,15	1,893	1,253
C	3	23/11/2016	72	66,3	22,1	82	72,98	9,02	109,33	97,307	12,027
C	3	Del 2 al 5 del 02/2017	143-146	45,3	7,55	8,08	5,4	2,68	10,77	7,200	3,573
C	3	13/02/2017	154	16,5	8,25	58,23	49,28	8,95	77,64	65,707	11,933
C	3	25/03/2017	194	47,6	47,6	90,83	58,58	32,25	121,11	78,107	43,000
C	3	25/04/2017	225	7,7	7,7	10,74	8,89	1,85	14,32	11,853	2,467
C	3	11/05/2017	241	25,8	10,32	75,68	61,01	14,67	100,91	81,347	19,560
C	3	18/05/2017	248	22,3	6,35	24,27	13,96	10,31	32,36	18,613	13,747
C	3	04/06/2017	265	25,1	5,02	13,83	11,59	2,24	18,44	15,453	2,987
C	3	08.09/06/2017	269-270	6,6	6,6	13,21	10,25	2,96	17,61	13,667	3,947
C	3	25/06/2017	286	4,8	4,8	11,88	7,26	4,62	15,84	9,680	6,160
C	3	29/08/2017	347	4,9	24,5	50,81	27,23	23,58	67,75	36,307	31,440
C	3	15/09/2017	368	6,7	6,7	10,36	6,64	3,72	13,81	8,853	4,960
C	3	22/09/2017	375	24,4	24,4	35,16	25,25	9,91	46,88	33,667	13,213
C	3	30/09/2017	383	2,8	2,8	5,21	4,12	1,09	6,95	5,493	1,453
C	3	18/10/2017	401	37,6	18,8	23,01	13,13	9,88	30,68	17,507	13,173

Tabla 14. Tabla general de datos (6/6)

Tratamiento	Parcela	Fecha	Tiempo (días)	MO Total (%)	MO Fino (%)	MO grueso (%)	MO Total (g/m2)	MO Fino (g/m2)	MO grueso (g/m2)	% suelo desnudo	% piedras	% vegetación
C	2	13/09/2016	1	18,678	15,800	22,100	37,693	17,317	20,376	60	40	0
C	2	29/09/2016	18	79,153	72,931	81,062	15,999	3,462	12,538	10	90	0
C	2	15/10/2016	33	24,699	27,454	18,120	7,242	5,674	1,568	10	90	0
C	2	25/10/2016	43	43,103	32,915	56,140	13,874	5,947	7,927	15	85	0
C	2	23/11/2016	72	43,801	35,432	58,458	13,964	7,190	6,773	15	85	0
C	2	Del 2 al 5 del 02/2017	146	43,359	44,110	41,571	6,041	4,329	1,713	5	95	0
C	2	13/02/2017	154	47,516	42,894	60,838	36,030	24,146	11,884	30	70	0
C	2	25/03/2017	194	35,437	36,476	29,803	94,769	82,367	12,402	50	45	5
C	2	25/04/2017	225	37,754	32,320	42,479	15,424	6,141	9,283	15	75	10
C	2	11/05/2017	241	42,850	43,727	39,476	33,869	27,432	6,437	30	55	15
C	2	18/05/2017	248	54,011	52,677	58,883	17,960	13,752	4,208	15	70	15
C	2	04/06/2017	265	59,613	54,675	66,192	19,649	10,293	9,355	15	35	50
C	2	08.09/06/2017	270	67,402	66,701	69,228	11,135	7,960	3,175	10	40	50
C	2	25/06/2017	286	63,836	65,603	57,460	9,729	7,829	1,900	5	40	55
C	2	29/08/2017	347	64,047	63,607	64,996	51,852	35,179	16,674	30	15	55
C	2	15/09/2017	368	60,724	58,580	65,253	25,124	16,449	8,674	20	30	50
C	2	22/09/2017	375	64,708	69,153	57,125	54,165	36,494	17,671	5	45	50
C	2	30/09/2017	383	77,790	78,010	77,122	6,908	5,211	1,697	15	40	45
C	2	18/10/2017	401	57,766	61,031	51,030	11,676	8,308	3,368	15	40	45
C	3	13/09/2016	1	20,626	21,376	17,549	11,391	9,491	1,900	30	70	0
C	3	29/09/2016	18	82,138	83,309	80,141	9,035	5,776	3,259	5	95	0
C	3	15/10/2016	33	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	10	90	0
C	3	25/10/2016	43	29,021	28,115	30,389	0,913	0,532	0,381	5	95	0
C	3	23/11/2016	72	26,490	27,593	17,572	28,963	26,850	2,113	40	60	0
C	3	Del 2 al 5 del 02/2017	143-146	39,729	39,771	39,646	4,280	2,863	1,417	5	90	5
C	3	13/02/2017	154	37,923	40,727	22,481	29,443	26,761	2,683	30	65	5
C	3	25/03/2017	194	33,278	41,514	18,319	40,302	32,425	7,877	45	45	10
C	3	25/04/2017	225	35,453	35,670	34,406	5,077	4,228	0,849	10	80	10
C	3	11/05/2017	241	41,449	42,050	38,951	41,825	34,206	7,619	35	55	10
C	3	18/05/2017	248	50,863	49,737	52,387	16,459	9,258	7,201	20	70	10
C	3	04/06/2017	265	53,169	51,248	63,110	9,804	7,919	1,885	10	70	20
C	3	08.09/06/2017	269-270	62,380	59,150	73,564	10,987	8,084	2,903	10	70	20
C	3	25/06/2017	286	68,284	65,944	71,961	10,816	6,383	4,433	10	70	20
C	3	29/08/2017	347	67,805	65,279	70,723	45,936	23,701	22,235	30	40	30
C	3	15/09/2017	368	59,281	56,560	64,137	8,189	5,007	3,181	25	45	30
C	3	22/09/2017	375	52,843	49,237	62,031	24,773	16,576	8,196	30	40	30
C	3	30/09/2017	383	80,011	81,036	76,136	5,558	4,452	1,107	30	50	20
C	3	18/10/2017	401	57,433	59,598	54,555	17,620	10,434	7,187	20	60	20

## ANEXO II. Localización geográfica de cada Gerlach.

Tabla 15: Latitud y Longitud de cada Gerlach.

	Latitud	Longitud
<b>Gerlach Abierto 1</b>	42° 10' 32,10" N	0° 22' 28,83" W
<b>Gerlach Abierto 2</b>	42° 10' 31,71" N	0° 22' 29,03" W
<b>Gerlach Abierto 3</b>	42° 10' 31,08" N	0° 22' 29,33" W
<b>Gerlach Cerrado 1</b>	42° 10' 31,98" N	0° 22' 28,91" W
<b>Gerlach Cerrado 2</b>	42° 10' 31,47" N	0° 22' 29,15" W
<b>Gerlach Cerrado 3</b>	42° 10' 31,33" N	0° 22' 29,28" W

Tabla 16: Coordenadas X e Y de la posición de cada Gerlach.

	Coordenada X	Coordenada Y
<b>Gerlach Abierto 1</b>	716854	4672649
<b>Gerlach Abierto 2</b>	716852	4672640
<b>Gerlach Abierto 3</b>	716845	4672626
<b>Gerlach Cerrado 1</b>	716851	4672644
<b>Gerlach Cerrado 2</b>	716851	4672636
<b>Gerlach Cerrado 3</b>	716486	4672629

### ANEXO III: Fotografías



Figura 23: Ilustración. Gracia, A. (2016). Área de estudio después del incendio, antes de la primera lluvia. Septiembre 2016.



Figura 24: Ilustración. Gracia, A. (2016). Recogida de muestras de la zona control (no quemada) para el estudio del suelo. Septiembre 2016.



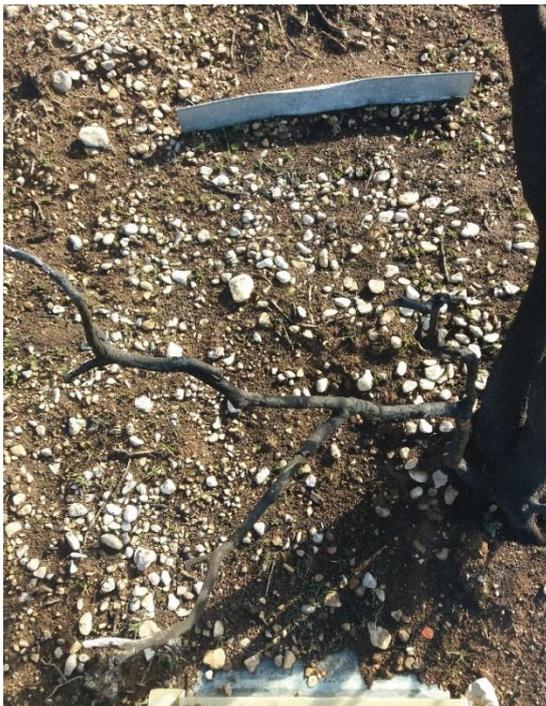
Figura 25: Ilustración. Gracia, A. (2016). Detalle de los pluviómetros utilizados para la medición de la cantidad de lluvia recogida. Septiembre 2016.



Figura 26: Ilustración. Gracia, A. (2016). Detalle de la localización de la zona de estudio, redondeada en rojo. Septiembre 2016.



*Figura 27: Ilustración. Gracia, A. (2017). Área de estudio un año después del incendio. Septiembre 2017.*



*Figura 28: Ilustración. Gracia, A. (2017). Detalle de la parcela C2 (cerrado 2). Febrero 2017.*



*Figura 29: Ilustración. Gracia, A. (2017). Detalle de la parcela C2 (cerrado 2). Octubre 2017.*

## ANEXO IV: Tablas resumen del porcentaje de materia orgánica total, fina y gruesa, en cada tratamiento (abierto y cerrado)

Tabla 17: Porcentaje de materia orgánica total, fina y gruesa, con su desviación estándar, en el tratamiento Abierto.

Tratamiento ABIERTO		% Materia orgánica total	% Materia orgánica fina	% Materia orgánica gruesa
13/09/2016	Media	21,3433	19,0420	23,5640
	N	3	3	3
	Desviación estándar	2,26287	3,78678	1,37451
29/09/2016	Media	80,8540	77,8700	82,4570
	N	3	3	3
	Desviación estándar	,86570	2,17899	,71587
15/10/2016	Media	24,3567	28,6493	19,5197
	N	3	3	3
	Desviación estándar	4,52436	8,93848	3,78430
25/10/2016	Media	34,4600	40,1493	30,5957
	N	3	3	3
	Desviación estándar	10,21177	14,58281	7,79213
23/11/2016	Media	34,7047	23,4040	40,0483
	N	3	3	3
	Desviación estándar	4,42689	7,03938	4,22512
05/02/2017	Media	33,2773	37,3937	31,5037
	N	3	3	3
	Desviación estándar	10,81292	21,04243	13,81082
13/02/2017	Media	35,7637	43,9250	34,8170
	N	3	3	3
	Desviación estándar	8,96340	12,29101	8,19222
25/03/2017	Media	31,4390	30,9780	32,7120
	N	3	3	3
	Desviación estándar	6,73321	8,05996	11,53442
25/04/2017	Media	38,0370	40,1043	39,5017
	N	3	3	3
	Desviación estándar	13,62542	9,80446	17,67038
11/05/2017	Media	43,3897	31,5647	48,8983
	N	3	3	3
	Desviación estándar	7,17760	12,34032	3,64241
18/05/2017	Media	49,5427	49,5617	48,1293
	N	3	3	3
	Desviación estándar	11,76695	27,99348	14,83521
04/06/2017	Media	55,2210	57,4107	56,7023
	N	3	3	3
	Desviación estándar	4,90681	2,33499	7,51948
09/06/2017	Media	55,0697	48,9380	61,6333
	N	3	3	3
	Desviación estándar	5,36251	17,46760	6,28414
25/06/2017	Media	69,4350	68,4757	75,0397
	N	3	3	3
	Desviación estándar	3,54608	8,75556	5,27545
29/08/2017	Media	64,1807	62,7790	64,7690
	N	3	3	3
	Desviación estándar	1,35074	3,94313	,75240
15/09/2017	Media	58,3710	59,6620	57,5107
	N	3	3	3
	Desviación estándar	3,45248	3,15922	3,61368
22/09/2017	Media	53,1107	59,9350	44,6167
	N	3	3	3
	Desviación estándar	2,45375	2,39365	4,03128
30/09/2017	Media	75,3923	78,3087	72,1043
	N	3	3	3
	Desviación estándar	3,84956	5,89862	9,82495
18/10/2017	Media	59,7433	60,4040	60,5817
	N	3	3	3
	Desviación estándar	6,79019	5,98243	6,97985

Tabla 18: Porcentaje de materia orgánica total, fina y gruesa, con su desviación estándar, en el tratamiento Cerrado.

Tratamiento CERRADO		% Materia orgánica total	% Materia orgánica fina	% Materia orgánica gruesa
13/09/2016	Media	22,0490	21,8533	22,1800
	N	3	3	3
	Desviación estándar	4,26445	4,18645	6,81765
29/09/2016	Media	79,1833	83,0993	73,9160
	N	3	3	3
	Desviación estándar	2,93962	4,35081	8,94128
15/10/2016	Media	18,7550	13,8347	22,3310
	N	3	3	3
	Desviación estándar	16,60125	12,26686	20,26122
25/10/2016	Media	36,8100	41,4857	33,2183
	N	3	3	3
	Desviación estándar	7,15920	13,23900	5,26156
23/11/2016	Media	35,2457	42,7620	30,7650
	N	3	3	3
	Desviación estándar	8,65724	22,03448	4,12780
05/02/2017	Media	36,0570	40,7270	34,0283
	N	3	3	3
	Desviación estándar	9,67552	,98414	13,87494
13/02/2017	Media	41,0307	43,3970	40,0187
	N	3	3	3
	Desviación estándar	5,61809	19,41318	3,28724
25/03/2017	Media	40,4570	35,2900	42,8267
	N	3	3	3
	Desviación estándar	10,61965	20,27910	7,09862
25/04/2017	Media	43,0893	43,6963	41,4087
	N	3	3	3
	Desviación estándar	11,29255	9,95498	12,94963
11/05/2017	Media	47,3950	39,5920	51,1383
	N	3	3	3
	Desviación estándar	9,11244	,70618	14,31371
18/05/2017	Media	55,5387	59,2933	54,4147
	N	3	3	3
	Desviación estándar	5,59808	7,12037	5,74702
04/06/2017	Media	57,5067	64,2053	54,7783
	N	3	3	3
	Desviación estándar	3,75705	1,72352	3,58312
09/06/2017	Media	64,2433	67,5560	64,0367
	N	3	3	3
	Desviación estándar	2,75019	6,99550	4,23774
25/06/2017	Media	66,4053	63,0833	70,4177
	N	3	3	3
	Desviación estándar	2,30303	7,77900	8,04574
29/08/2017	Media	65,6897	64,9283	65,9287
	N	3	3	3
	Desviación estándar	1,92307	5,82879	2,70564
15/09/2017	Media	58,9377	61,2153	57,7683
	N	3	3	3
	Desviación estándar	1,98045	6,05274	1,06682
22/09/2017	Media	56,4893	56,0687	57,8030
	N	3	3	3
	Desviación estándar	7,13262	6,55465	10,24572
30/09/2017	Media	76,5067	73,7897	77,2110
	N	3	3	3
	Desviación estándar	4,29238	4,94252	4,28079
18/10/2017	Media	58,4477	54,6547	60,5467
	N	3	3	3
	Desviación estándar	1,47847	3,67551	,82163

**ANEXO V: Tabla resumen de las tasas de erosión registradas en cada episodio de lluvias, Mg ha<sup>-1</sup>, así como de la intensidad de precipitación, mm h<sup>-1</sup> y precipitación total, mm.**

*Tabla 19: Comparación de las tasas de erosión (Mg/ha), intensidad de precipitación (mm/h) y precipitación total (mm) por cada episodio de lluvias.*

<b>Episodio de lluvias</b>	<b>Mg/Ha</b>	<b>Intensidad precipitación (mm/h)</b>	<b>Precipitación total (mm)</b>
13/09/2016	12,855	36,6	12,1
29/09/2016	1,355	0	0
15/10/2016	1,777	10,4	5,2
25/10/2016	1,707	10,7	10,7
23/11/2016	50,425	33,15	66,3
05/02/2017	1,986	7,55	45,3
13/02/2017	5,166	8,25	16,5
25/03/2017	10,553	47,6	47,6
25/04/2017	2,374	7,7	7,7
11/05/2017	5,207	10,32	25,8
18/05/2017	1,711	6,35	22,3
04/06/2017	1,361	5,02	25,1
09/06/2017	1,946	6,6	6,6
25/06/2017	2,537	4,8	4,8
29/08/2017	7,430	24,5	4,9
15/09/2017	3,311	6,7	6,7
22/09/2017	7,415	24,4	24,4
30/09/2017	0,605	2,8	2,8
18/10/2017	5,149	18,8	37,6