

# **Estudio de la evolución temporal a corto plazo del manejo pre y post-incendio sobre propiedades microbiológicas del suelo.**



**Sergio Aguado Ivorra**

**Grado en Ciencias Ambientales**

**2016-2017**

***Facultad de Ciencias Experimentales***

Tutora: Victoria Arcenegui Baldó

Área de Geodinámica Externa

Departamento de Agroquímica y Medio Ambiente



## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quería agradecer **a mi familia** todos los ánimos, las fuerzas, el cariño y el apoyo enorme que me han dado durante la realización del proyecto.

También quería agradecer enormemente **a mi tutora Vicky** por la paciencia, esfuerzo, exigencia y dedicación conmigo en este trabajo, ya que a pesar de que las circunstancias no siempre acompañaban, en todo momento ha estado para resolver las dudas que me han podido surgir, corregirme una y otra vez cada parte y un largo etcétera.

**A Marcos Francos** por estar siempre disponible y facilitarme toda la información que he podido necesitar para realizar el trabajo.

**A todos los profesores y personal presentes en el laboratorio** que siempre me han echado un cable si me ha hecho falta en algún momento, con especial mención **a José María** que siempre se ofrecía para cualquier cosa que necesitase.

**A mis amigos/as más cercanos/as**, con los que he podido contar en todo momento para consejos o dudas y en los que me he podido apoyar siempre que me ha hecho falta.

Por último también **al resto del equipo del Departamento de Agroquímica y Medio Ambiente del Alcludia** que también han estado siempre para resolverme cualquier problema que se me plantease.

## Resumen

Una de las prácticas más comunes tras producirse un incendio forestal son la saca de madera o la “corta y deja” de madera, que pueden afectar negativamente al ecosistema. No existen muchos estudios, pero se investigan cada vez más los efectos de una gestión pre-incendio, como es la reducción de la masa forestal. En este trabajo se ha estudiado la evolución temporal del carbono de la biomasa microbiana (CBM), la respiración edáfica basal (REB) y la relación entre ambos ( $qCO_2$ ) en un suelo quemado en Ódena. Se aplicaron tres manejos pre-incendio, uno sin tratar (BNM15B), otro gestionado 10 años antes (BM05B) y otro que se gestionó justo antes del incendio (BM15B) y tres manejos post-incendio, no tratado (NT), saca (CR) y cortar y dejar (CL) con el fin de determinar cuál es más favorable para la recuperación del suelo. Tras tres años de seguimiento, los cambios observados sobre las propiedades del suelo son significativos y favorecen su evolución positiva. Estos cambios no fueron inmediatos, por lo que sería necesaria una prolongación mayor en el tiempo del estudio sobre ambos tipos de manejos.

**Palabras clave:** suelo, manejo, pre-incendio, post-incendio, parámetros microbiológicos, CBM, REB.

## Abstract

After a wildfire, one of the methods to proceed is the post-fire treatment as salvage logging or the cut and leave the burned wood, which often affects negatively to the ecosystem. Although there are not many research, nowadays the effects of the pre-fire management are more investigated, like the reduction of forest biomass. In this research have been analyzed: temporary evolution of microbial biomass carbon (CBM), basal soil respiration (RSB) and the relation between them ( $qCO_2$ ) in a forest soil burned in Ódena. Three pre-fire treatments were used, one without treatment (BNM15B), another which was managed ten years before (BM05B) and one who was managed immediately before the fire (BM15B). There were also three treatments post-fire: not-treated (NT), cut and remove (CR) and cut and leave (CL) in order to notice which one is the most favourable for the soil recovery. After three years of monitoring, the changes obtained on the microbiological parameters by some of the treatment are significant and favour a positive soil evolution. These changes were not immediate, so it would be necessary to spend more time so as to analyze both treatments.

**Keywords:** soil, treatment, pre-fire, post-fire, microbial parameters, CBM, REB.

# ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN .....	5
2. ANTECEDENTES .....	9
3. OBJETIVOS .....	11
4. MATERIAL Y MÉTODOS .....	12
4.1. ZONA DE ESTUDIO .....	12
4.2. DISEÑO EXPERIMENTAL .....	14
4.2.1. MANEJO PRE-INCENDIO .....	14
4.2.2. MANEJO POST-INCENDIO .....	15
4.3. ANÁLISIS DE LABORATORIO .....	17
4.3.1. CARBONO DE LA BIOMASA MICROBIANA (CBM) .....	17
4.3.2. RESPIRACIÓN EDÁFICA BASAL (REB) .....	19
4.4. COCIENTE METABÓLICO ( $qCO_2$ ) .....	21
4.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICOS .....	21
5. RESULTADOS .....	22
5.1. PRE-INCENDIO .....	22
5.1.1. CARBONO DE LA BIOMASA MICROBIANA (CBM) .....	22
5.1.2. RESPIRACIÓN EDÁFICA BASAL (REB) .....	23
5.1.3. COCIENTE METABÓLICO DEL SUELO ( $qCO_2$ ) .....	23
5.2. POST-INCENDIO .....	24
5.2.1. CARBONO DE LA BIOMASA MICROBIANA .....	24
5.2.2. RESPIRACIÓN EDÁFICA BASAL .....	25
5.2.3. COCIENTE METABÓLICO DEL SUELO ( $qCO_2$ ) .....	26
6. DISCUSIÓN .....	28
7. CONCLUSIÓN .....	32
8. PROYECCIÓN FUTURA .....	33
9. BIBLIOGRAFÍA .....	34

# 1. INTRODUCCIÓN

Los incendios forestales son un fenómeno producido de forma natural en muchos ecosistemas terrestres, y muchos de sus efectos sobre las propiedades del suelo son cada vez más estudiados y de vital importancia para entender el funcionamiento de los ecosistemas (Neary et al., 2005; Buhk et al., 2007; Úbeda y Outeiro, 2009).

En las últimas décadas el número de incendios se ha incrementado debido a varios factores destacando el abandono de las actividades tradicionales en las zonas rurales, la ausencia del manejo y control de estas zonas y el cambio climático (Pereira et al., 2015; Vélez, 2000).

Concretamente los ecosistemas mediterráneos han estado y seguirán estando muy influenciados por este fenómeno, de manera que los incendios son una de las principales causas de los cambios producidos en estos ecosistemas (García-Orenes et al., 2017).

Así, el fuego ha de entenderse como un proceso planetario más, clave junto al clima, que ha condicionado tanto la evolución de las plantas como su dispersión, el desarrollo de nuevos biomas, la formación de los suelos y los ciclos hidrológicos y erosivos de cada ecosistema (Mataix-Solera y Cerdà et al., 2009).

En las últimas décadas, los incendios forestales se han convertido en un factor de origen humano en la mayoría de los casos, llegando a ser un 70% más frecuente por causas antrópicas que naturales (Mataix-Solera y Guerrero, 2008). Es por ello, que el estudio de la incidencia del fuego en nuestros ecosistemas y sobretodo en los suelos, ya que la aceleración de los ciclos biogeoquímicos se inician en él, va a ser decisivo para entender la evolución de este después de un incendio, y la recuperación del ecosistema ya que la aceleración de los ciclos biogeoquímicos se inician en él (Cerdà y Mataix-Solera, 2009). Además la observación de este estudio desde diferentes puntos de vista junto con la propuesta del uso de herramientas de gestión pre y post-incendio, tienen un alto grado de interés y utilidad.



Figura 1. A la izquierda y en el centro se ve maquinaria recogiendo ramas y troncos del suelo. A la derecha se está efectuando una poda para reducir la masa forestal y así prevenir incendios más severos.

La gestión pre-incendio y sus tratamientos influyen sobre todo en la respuesta de la vegetación después de producirse un incendio (Figura 1) y es motivo de preocupación para los gestores de áreas que aplican tratamientos de reducción de combustible (por ejemplo, adelgazamiento y/o quema) para aumentar la resistencia forestal y reducir el riesgo de incendio (Baron et al., 2009). En general, estos tratamientos reducen la severidad del fuego al reducir los combustibles de la superficie y reducir la densidad arbórea y la conectividad entre las copas (Cochrane et al., 2012; Finney et al., 2005; Pollet y Omi, 2002; Strom y Fulé, 2007). Sin embargo, la influencia de las condiciones climáticas extremas de incendios y la topografía pueden provocar fuegos de alta severidad incluso en áreas tratadas. En los sitios quemados más severamente y sus opuestos (los que menos), los tratamientos antes del fuego probablemente tengan efectos a largo plazo sobre la recuperación después del incendio, sin embargo, a día de hoy no se conocen exactamente sus efectos (Shive et al., 2013).

Se cree que la severidad del fuego anularía los manejos de la madera realizados antes del incendio. Es decir, las áreas gravemente quemadas se asemejarían entre ellas hubieran tenido o no lugar los tratamientos previos (Grime, 1977).

Kuenzi et al. (2008) encontraron también que las áreas de baja y alta severidad acaban teniendo comunidades vegetales marcadamente diferentes 2 y 3 años después de producirse el incendio. Estas diferencias en los tipos de vegetación cambian drásticamente el paisaje: las áreas de baja severidad seguirán habiendo pinos, mientras que en las de alta se encontrarán

otras especies de vegetación (Haire y McGarigal, 2010; Savage y Mast, 2005; Strom y Fulé, 2007).

La gestión posterior a un incendio puede tener un impacto negativo en los suelos, en algunos casos incluso más grave que el propio fuego. La saca de madera es una técnica muy frecuente aplicada al manejo de las zonas afectadas por un incendio, esta técnica lleva a cabo actividades como la extracción de la madera del área quemada (Figura 2), el uso de maquinaria pesada en la zona y el arrastre de los troncos quemados por encima de los suelos, dando lugar a una posible mayor erosión y degradación del suelo (Mataix-Solera et al., 2015, 2016).



Figura 2. Corte de la madera quemada tras un incendio para su posterior extracción de la zona afectada.  
Fuente: John Muir Project

Los microorganismos del suelo son fundamentales para la regulación de los ciclos biogeoquímicos que se producen en los ecosistemas terrestres ya que son responsables de procesos como la descomposición de componentes orgánicos (Nannipieri et al., 2003). Es por ello que son un componente clave para la conservación y el manejo de la diversidad biológica en los suelos después de un incendio (Mataix-Solera y Cerdà, 2009).



La actividad biológica del suelo merece una especial atención por su relevancia en la dinámica de los ecosistemas, contribuyendo a la salud del suelo y al crecimiento de las plantas (Bertiller et al., 2009). La comunidad microbiana juega un papel esencial en el proceso de transformación de la materia orgánica, el ciclo de los elementos y la estabilidad de la estructura del suelo (Marinari et al., 2000; Masciandaro et al., 1997).

La biomasa microbiana se define como la porción de la materia orgánica compuesta por los microorganismos vivos de menos de 5 a 10  $\mu\text{m}^3$  de tamaño. El carbón contenido en esta fracción viva del suelo varía entre 0,5 y un 5% del carbón orgánico total presente en el suelo. Los métodos de laboratorio para cuantificar la biomasa microbiana están basados principalmente en la medida de los compuestos presentes en los microorganismos (como el carbón que se extrae por fumigación) entre otros (Mataix-Solera et al., 2009).

La actividad de los microorganismos es otra medida importante ya que esta nos puede servir para cuantificar la actividad microbiana presente en un suelo. La cuantificación en la respiración del suelo es también una forma de medir la actividad heterótrofa del total de microorganismos y el carbono orgánico en descomposición (Mataix-Solera et al., 2009).

No se sabe cuáles son exactamente los efectos de la saca de madera sobre las propiedades del suelo ni cómo puede afectar al ecosistema y a su posterior gestión tras un incendio. Marañón-Jiménez et al. (2011) vieron una disminución en la respiración del suelo después del tratamiento de la saca de madera. Serrano-Ortiz et al. (2011) también observaron un impacto negativo con respecto al secuestro de carbono del suelo y Lindenmayer y Noss (2006) afirman que reduce la cobertura vegetal, afecta al microclima del suelo, a la descomposición de materia orgánica y la capacidad de almacenamiento de carbono del ecosistema.

Por otro lado, puede reducir la materia orgánica del suelo eliminando los troncos muertos ya que, si no hubiese intervención, caerían al suelo y contribuirían al almacenamiento del carbono orgánico (Smith et al., 2000; Moroni et al., 2010; Seedre et al., 2011). Todos estos factores anteriores provocarán una respuesta en las propiedades microbianas, produciendo cambios importantes en el contenido de microorganismos y su actividad (Burton et al., 2000; Nadelhoffer, 2000; Tang et al., 2003).

## 2. ANTECEDENTES

La zona de estudio sufrió dos grandes incendios forestales. Un primer incendio en el año 1986 y otro en 2015. El fuego comenzó en el municipio de El Bruc el 26 de Julio de 2015 debido a la práctica inadecuada de una trituradora de paja y quemó un total de 1280 hectáreas en los 3 días que duró el incendio.

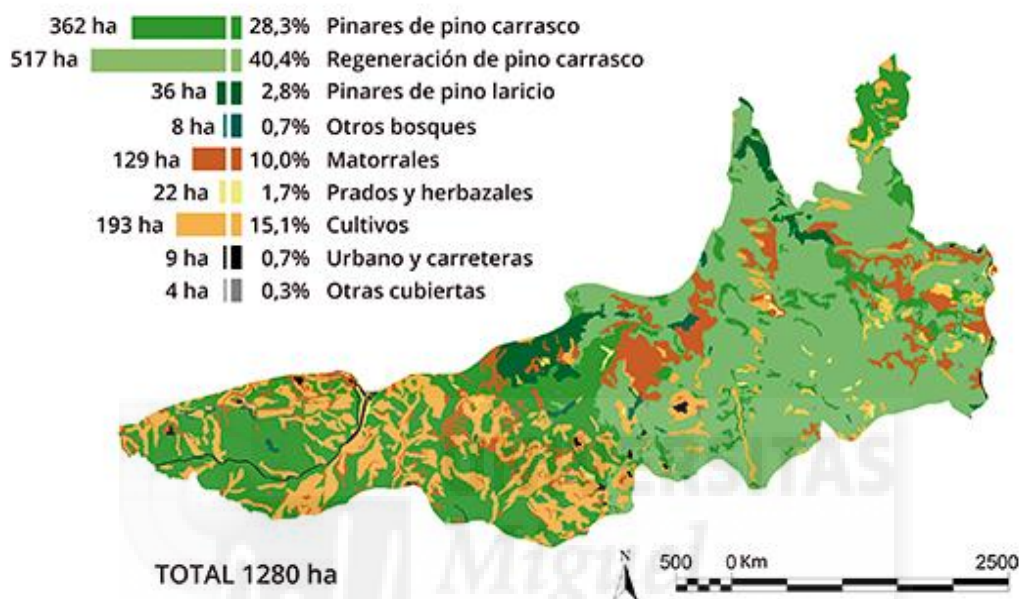


Figura 3. Mapa con los diferentes usos del suelo dentro de la zona afectada por el incendio de Ódena en 2015 (Fuente: CREAM (Centro de Investigación Ecológica y Aplicaciones Forestales)).

Entre los usos del suelo de la zona afectada encontramos principalmente la presencia de pino carrasco en más de la mitad del área sumando entre los ejemplares adultos y los ejemplares replantados que se encontraban en fase de regeneración.

Antes del incendio de 2015 había una alta densidad vegetal más o menos homogénea en toda el área quemada (Figura 3). La gestión pre-incendio se hizo procurando dejar 1.000 pies de pino carrasco (que era la especie más abundante en la zona) por hectárea y cortando las ramas de los árboles que estaban por debajo de 1 metro de altura. Con esto se pretendía evitar que frente a la ignición de un incendio, el fuego no llegara a la parte alta de los árboles y evitar así una propagación por copas. Tanto en 2005 como en 2015 el tipo de gestión fue el mismo.

Además, en 2005 y 2015 se realizaron medidas de gestión pre incendio para procurar disminuir la severidad de los mismos y poder realizar un estudio sobre las ventajas o inconvenientes que puede conllevar una gestión previa a un incendio.



Figura 4. Toma aérea de la zona afectada tras el incendio de 2015 en Ódena donde se puede diferenciar entre la zona quemada y la que se salvó del fuego (Fuente: PAU COSTA FOUNDATION).

En la actualidad, parte de las áreas donde se había aplicado una reducción de la cubierta vegetal, que hasta hace unos meses estaba quemada (Figura 4), están cubiertas de una nueva vegetación gracias a las especies rebrotadoras, que tienen un banco de yemas subterráneas protegidas que no son destruidas por el fuego y que les permite rebrotar. Gracias a esta estrategia, la zona afectada se puede empezar a regenerar rápidamente y es por eso que los investigadores ya encontraban ejemplares de encina, coscoja, madroño y brezo seis meses después del fuego. En cuanto a los pinos carrascos que se habían quemado, que no tienen una estrategia rebrotadora, sino germinadora, tienen una regeneración más paulatina y variable en toda la zona.

Este trabajo se ha realizado dentro del marco de un proyecto de investigación más extenso, cuyos trabajos son realizados por Marcos Francos, de la Universidad de Barcelona, y que se desarrolló conjuntamente con otros miembros del equipo de investigación a cargo del proyecto.

### 3. OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo consiste en el estudio de la evolución temporal de diferentes manejos pre y post-incendio sobre la biomasa microbiana y la respiración edáfica basal del suelo. Se observará la evolución en los suelos incendiados en tres muestreos realizados de forma consecutiva durante los tres años siguientes a un gran incendio forestal para estudiar que tratamientos de los aplicados son los más adecuados para una recuperación pronta del suelo y cuales pueden producir un deterioro en las propiedades edáficas después del incendio.



## 4. MATERIAL Y MÉTODOS

### 4.1. ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio se encuentra situada en Ódena, en la provincia de Barcelona (41° 38' 28.4" N - 1° 44' 15.6 E) a una altitud  $z = 424$  m.s.n.m. en el Noreste de España (Figura 5).



Figura 5. A la izquierda la ubicación de la provincia de Barcelona (marcada en amarillo) con respecto a España, en el centro una ampliación a la provincia de Barcelona para mostrar la situación del municipio de Ódena dentro de esta y por último a su derecha una fotografía del incendio, al fondo el pico Montserrat de 1236 m (mapa realizado con Gvsig; Imágenes tomadas de la PAU COSTA FOUNDATION).

La temperatura media anual es de 14,2 °C por ello pertenece a un termotipo mesomediterráneo y tiene un ombrotipo subhúmedo debido a que sus precipitaciones media anuales oscilan entre los 500 y 600 mm (Figura 6).

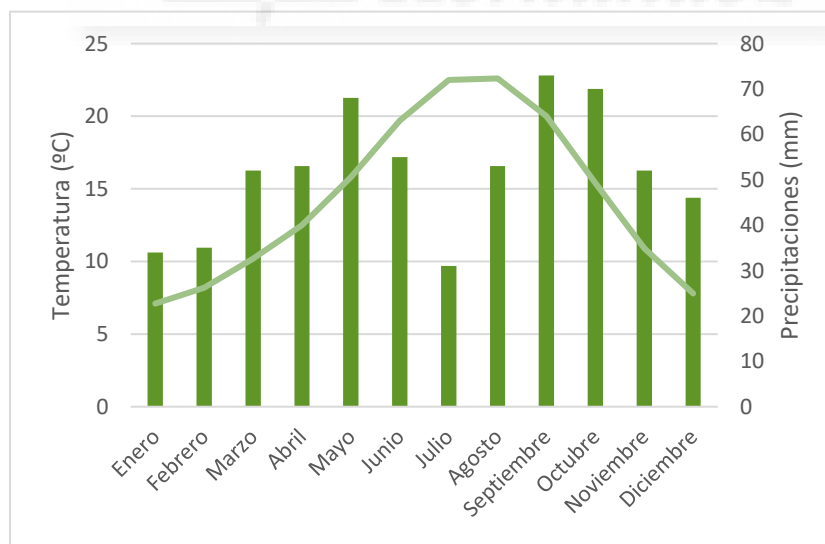


Figura 6. Climograma del municipio de Ódena. La línea verde que cruza de izquierda a derecha muestra la temperatura media a lo largo de los meses de un año (°C), las barras verticales muestran las precipitaciones anuales en cada mes (mm).

La vegetación que predomina en la zona son los bosques de *Pinus halepensis* Miller, *Pinus nigra* Arnold y *Quercus ilex* L. Además, otras de las especies que se encuentran allí aunque en menor proporción tras el incendio fueron *Pistacea lentiscus* L. y *Genista scorpius* L.

La zona de estudio sufrió un incendio en el año 1986 del cual se estaba recuperando a día de hoy y otro en 2015. El fuego comenzó en el municipio de El Bruc el 26 de Julio de 2015 y quemó un total de 1274 hectáreas en los 3 días que duró el incendio (Figura 7).

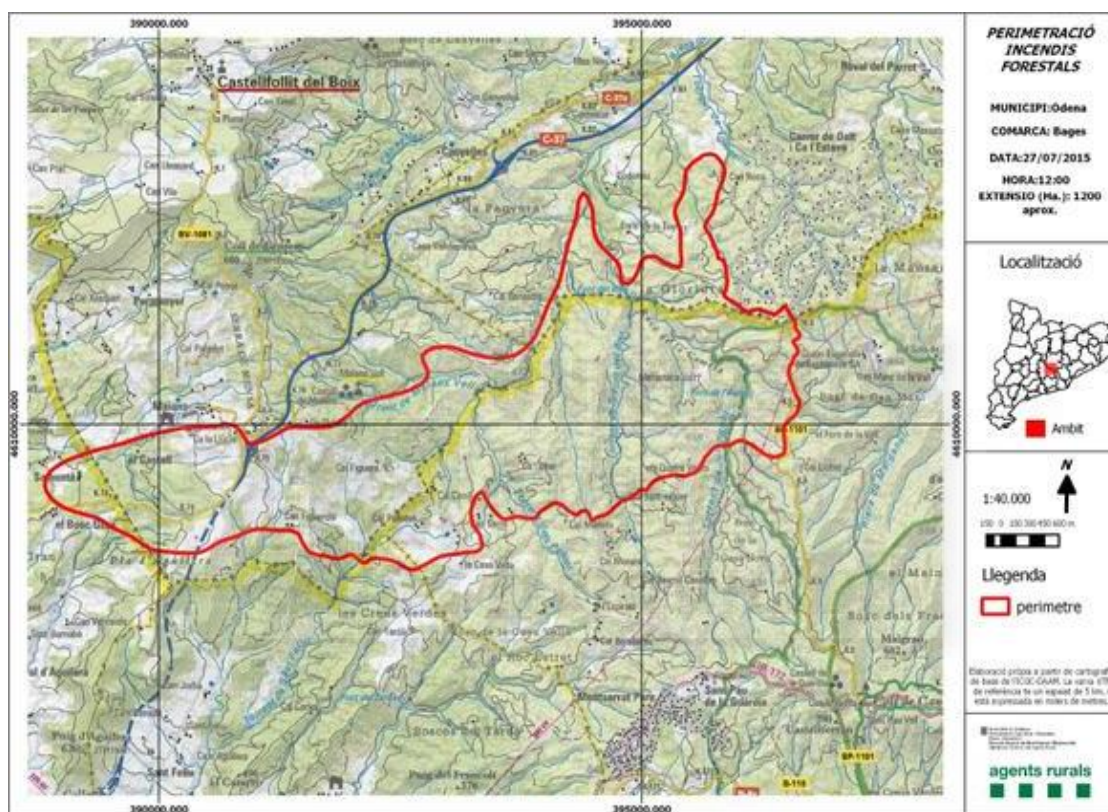


Figura 7. Perímetre del incendi forestal en Òdena en 2015 (Fuente: Agents Rurals de Catalunya).

El incendio se clasificó de severidad alta debido a las características del incendio por Úbeda et al. (2009). Los datos que se obtuvieron sobre las precipitaciones y la temperatura fueron registrados por la estación meteorológica de Ódena (41° 36' 19" N - 1° 38' 18" E, z= 423 m.s.n.m.).



Figura 8. Incendio de Ódena en 2015. A la derecha una de las zonas afectadas por el incendio tras el paso del fuego (Fuente: PAU COSTA FOUNDATION).

El sustrato geológico de la zona quemada está compuesto principalmente por rocas sedimentarias y los suelos fueron clasificados como Haploxerept Fluventico (Soil Survey Staff, 2014). Estos suelos son muy profundos, están bien drenados y poseen texturas medias con algunos elementos gruesos. La secuencia típica del horizonte es, Ap-Bw (k)-(Ab (k)).

## 4.2. DISEÑO EXPERIMENTAL

### 4.2.1. MANEJO PRE-INCENDIO

La parcela experimental se delimitó dos meses después de que ocurriese el incendio en octubre de 2015 (Figura 9). Se realizaron 3 manejos diferentes (Tabla 1) cada uno con 3 subparcelas (A, B y C) de 2x2 m<sup>2</sup>. Por cada subparcela se recogieron 3 muestras (0-2,5 cm de profundidad), habiendo en su conjunto un total de 9 muestras por cada manejo (9x3=27 muestras) para cada uno de los muestreos. En este estudio se realizaron 3 muestreos.

Tabla 1. Diferentes manejos pre-incendio realizados tras el incendio de Ódena en octubre de 2015.

Manejos	Descripción
BNM15B	Zona quemada en 1986 y en 2015 sin gestión ninguna
BM05B	Zona quemada en 1986 y 2015 gestionada en 2005
BM15B	Zona quemada en 1986 y en 2015 y gestionada en 2015

Los muestreos realizados se llevaron a cabo en las mismas fechas comentadas más adelante en el manejo post-incendio, los días 13 de octubre de 2015 (2 meses después del incendio), 26 de mayo de 2016 (10 meses después del incendio) y por último el 31 de Enero de 2017 (18 meses después del incendio).

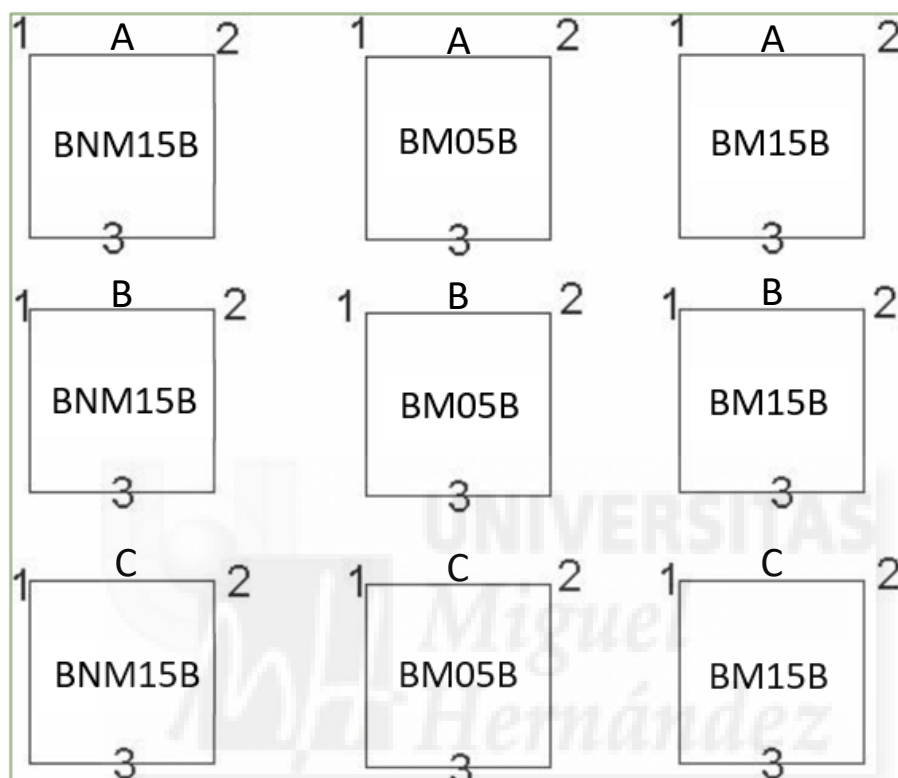


Figura 9. Diseño experimental para el manejo pre-incendio mostrando los 3 manejos diferentes (BNM15B, BM05B y BM15B) con sus 3 subparcelas (A, B y C) correspondientes. Los números 1, 2 y 3 corresponden con las muestras tomadas.

#### 4.2.2. MANEJO POST-INCENDIO

La parcela experimental, como el caso anterior se delimitó dos meses después de que ocurriese el incendio en octubre de 2015 (Figura 10). Se realizaron 3 manejos diferentes (Tabla 1) cada uno con 3 subparcelas (A, B y C) de 2x2 m<sup>2</sup>. Por cada subparcela se recogieron 3 muestras (0-2,5 cm de profundidad), habiendo en su conjunto un total de 9 muestras por cada manejo (9x3=27 muestras) para cada uno de los muestreos. En este estudio se realizaron 3 muestreos.



Tabla 2. Distintos manejos post-incendio realizados tras el incendio en Òdena en octubre de 2015.

Manejos	Descripción
No tratamiento (NT)	No se realizó ninguna tarea ni se modificó la zona de estudio después de haber ocurrido el incendio.
Cortar y sacar (CR)	Se cortó la vegetación afectada en la zona quemada y se retiró manualmente de la zona de estudio.
Cortar y dejar (CL)	Se cortó la vegetación quemada por el incendio y se distribuyó aleatoriamente por la superficie del suelo.

Tanto las características atmosféricas como las características del suelo son las mismas que las explicadas en el manejo pre-incendio.

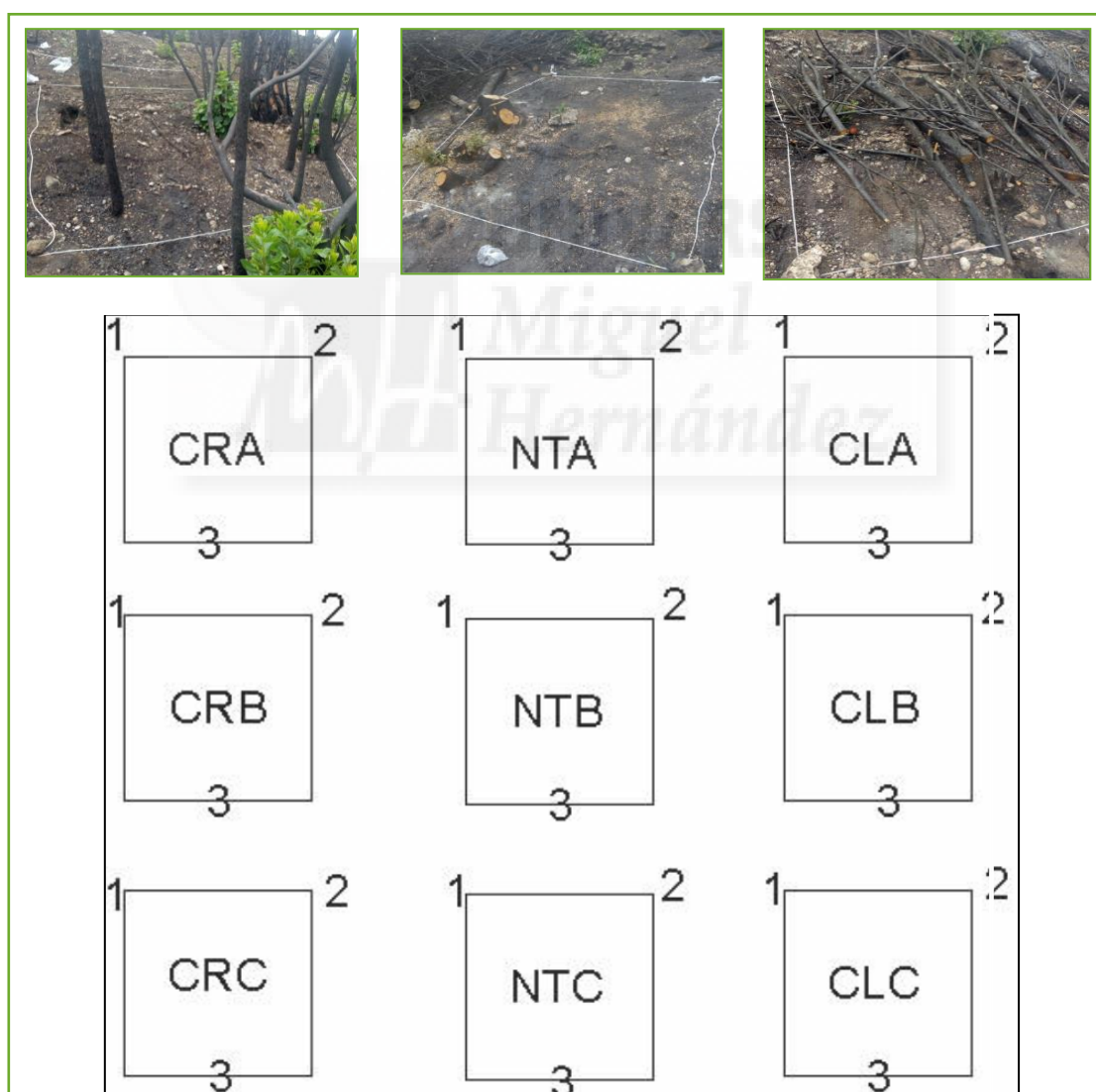


Figura 10. Diseño experimental de los diferentes manejos en la gestión post-incendio donde se muestran los 3 manejos diferentes realizados (NT, CR y CL) con 3 subparcelas (A, B y C) por cada manejo.

Para este estudio se realizaron tres muestreos. El primer muestreo se llevó a cabo el 13 de octubre (otoño) de 2015, 2 meses después de producirse el incendio.

El segundo muestreo se llevó a cabo 10 meses después del incendio, (en primavera) el 26 de mayo de 2016.

El tercer muestreo fue a finales de enero de 2017, el martes 31, 18 meses después del incendio.

Todas las muestras fueron recogidas y almacenadas en bolsas de plástico para su posterior análisis en el laboratorio.

Las características de la litología, pendiente, tipo de suelo, relieve y la cubierta vegetal eran muy similares y homogéneas en cada una de las zonas de manejo. El área contaba con una pendiente <10%.

Todos los muestreos se realizaron en Barcelona por el grupo de investigación de Marcos Francos pero las muestras fueron enviadas a la Universidad Miguel Hernández de Elche para su análisis de laboratorio.

### **4.3. ANÁLISIS DE LABORATORIO**

#### **4.3.1. CARBONO DE LA BIOMASA MICROBIANA (CBM)**

Para determinar el carbono de la biomasa microbiana (CBM) en el suelo, se utilizó el método de “Fumigación-Extracción” desarrollado por Vance et al. (1987). Para llevar a cabo este método necesitamos 3 días consecutivos durante los que realizaremos diferentes tareas.

- **Fumigación:**

Cada una de las muestras de suelo a analizar se divide en dos fracciones:

1. Fracción de muestra no fumigada: se pesan alrededor de 5 g del suelo, pero esta fracción no es fumigada con cloroformo.
2. Fracción de muestra fumigada: se pesan alrededor de 5 g de suelo. Se coloca en un desecador y se hace vacío hasta que el cloroformo del vaso empieza a hervir y se mantiene así durante 2 minutos, posteriormente se deja el desecador cerrado durante 24 horas.

La fumigación provoca la lisis celular de los microorganismos. Ello va a solubilizar compuestos citoplasmáticos, haciéndolos extraíbles por el sulfato potásico  $K_2SO_4$  que añadiremos luego.

- **Extracción del carbono soluble:**

El siguiente paso es analizar el carbono orgánico soluble en las muestras, tanto en la fracción fumigada como en la no fumigada. Para ello realizamos la extracción del carbono con sulfato potásico  $K_2SO_4$  0,5 M durante una hora en agitación, usando una relación (1:4, p/v). El carbono de la fracción no fumigada es al que llamaremos carbono orgánico soluble (DeLuca y Keeney, 1994).

- **Determinación del carbono soluble:**

La determinación colorimétrica se hace tomando 3 mL de los extractos de  $K_2SO_4$  a los que se le añaden 1 mL de dicromato potásico  $K_2Cr_2O_7$  1 N y 1,5 mL de ácido sulfúrico  $H_2SO_4$ . Se preparan patrones de glucosa de 0, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000  $mg \cdot L^{-1}$ , a los que se le añaden los mismos reactivos. Tanto las muestras como los patrones se introducen en la estufa a 150 °C durante 15 minutos, se deja reposar una noche, y posteriormente se añaden 10 mL de agua desionizada.

Tras intensa agitación para conseguir una mezcla completamente homogénea, se mide en el espectrofotómetro (Figura 11) a 590 nm.

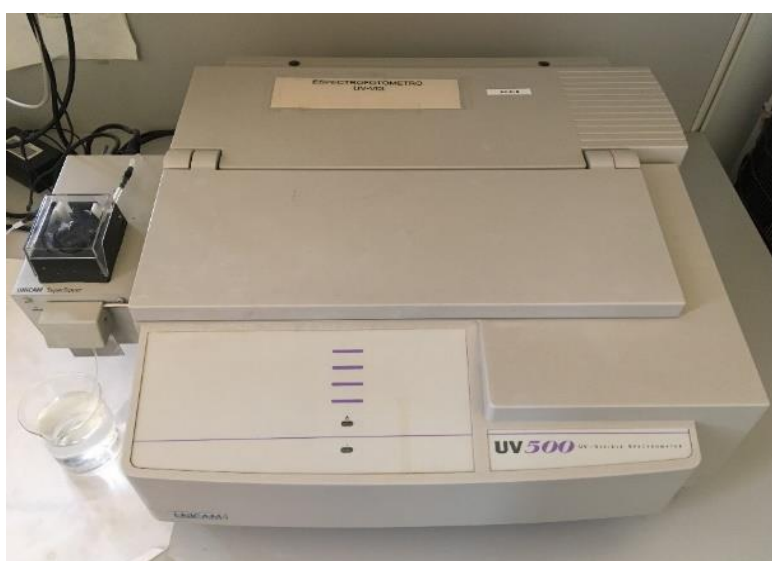


Figura 11. Espectrofotómetro de luz ultravioleta utilizado para la determinación del carbono de la biomasa.

- **Cálculo de la biomasa microbiana**

Para el cálculo del CBM, una vez se conoce la concentración de carbono de las dos fracciones (expresada ya en mg C kg<sup>-1</sup> suelo seco), se resta la concentración de la no fumigada a la fumigada, y se multiplica por 2,64. Este valor (2,64) es un factor que recoge varios aspectos, entre ellos la cantidad de carbono que es extraíble con K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, además de la corrección empírica con otros métodos de análisis de biomasa microbiana, más laboriosos pero más exactos, como por ejemplo bio-volumen (tinción y contaje). Para su determinación se emplea la siguiente fórmula:

$$CBM = \frac{CF}{CNF} * 2,64$$

Siendo CF el carbono de la fracción de suelo fumigado, y CNF el carbono en la no fumigada.

#### **4.3.2. RESPIRACIÓN EDÁFICA BASAL**

La fracción de los microorganismos activos del suelo necesita una constante fuente de energía, la cual, en los microorganismos heterótrofos procede de las transformaciones de materiales orgánicos tales como azúcares, proteínas, nucleótidos y en menor grado de compuestos humificados. Las reacciones de obtención de energía en la célula son rédox, basadas en la transferencia de electrones de un dador a un receptor (Anderson, 1982). En la respiración, que es la oxidación de materia orgánica por organismos aerobios, el oxígeno funciona como el receptor final de electrones. Los productos finales son CO<sub>2</sub> y agua. Por lo tanto la actividad metabólica de los microorganismos se puede cuantificar midiendo la producción de CO<sub>2</sub> o la pérdida de O<sub>2</sub>. De esta forma, también se puede estimar la cantidad de materia orgánica que se mineraliza.

La respiración edáfica basal fue monitorizada con un respirómetro multisensor (MicroOxymax, Columbus, OH, USA), que mide el CO<sub>2</sub> liberado mediante un sensor infrarrojo.

- **Procedimiento**

Se pesan, anotando el peso exacto, entre 10 y 30 g (en nuestro caso 17 g) de suelo tamizado (< 2mm) en un frasco de 250 mL. El suelo debe humedecerse hasta el 55% de su capacidad de campo. El frasco se cierra con tapaderas con rosca que presentan dos orificios para la posterior conexión de los frascos al equipo. Los frascos son sumergidos en un baño de agua a 25 °C para asegurar una temperatura estable. Los frascos se conectan mediante dos tubos al respirómetro, uno de entrada por donde se capta el aire del frasco para la medición del contenido de CO<sub>2</sub>, y otro de salida por donde se renueva la atmósfera del frasco. Los frascos se mantuvieron en incubación a 25 °C y en oscuridad mediante el cubrimiento con un material opaco, durante 4 días. Se realizaron medidas cada 6 horas del contenido de CO<sub>2</sub> en cada frasco, forzando la renovación de la atmósfera del frasco en cada medida.

El respirómetro (Figura 12) lleva asociado un programa informático que, una vez introducidos los parámetros de medida (temperatura, tiempo total del experimento, intervalo de medida, intervalo de renovación, unidades de medida y peso del suelo), realiza los cálculos de la tasa de CO<sub>2</sub> liberado y el contenido de CO<sub>2</sub> acumulado. Los valores utilizados son los correspondientes a la tasa del último intervalo de 6 horas de medida al final de los 4 días de incubación, expresado en mg CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>. Al multiplicar por 12/44, obtuvimos la tasa en mg C-CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>.



Figura 12. Respirómetro multisensor (MicroOxymax, Columbus, OH, USA) utilizado para la determinación de la respiración microbiana.

#### 4.4. COCIENTE METABÓLICO ( $qCO_2$ )

El coeficiente metabólico ( $qCO_2$ ) se define como la tasa de respiración microbiana (medida como evolución de  $CO_2$ ) por unidad de biomasa microbiana. El  $qCO_2$  se utiliza a menudo para estudiar cambios y situaciones de estrés en el suelo a lo largo del tiempo, observándose que si el estrés del ecosistema aumenta, también lo hace el cociente metabólico.

Anderson y Domsch (1985) propusieron la relación entre la respiración basal del suelo y la biomasa microbiana (= cociente metabólico microbiano, respiración específica de la biomasa, o  $qCO_2$ , basada en la teoría de Odum de la sucesión de ecosistemas (Odum, 1969 y 1985) como una medida alternativa en los cambios en la biomasa microbiana en respuesta a las posibles perturbaciones. Este índice supuestamente disminuye durante la sucesión y después de la recuperación de la perturbación, porque las condiciones de "equilibrio" se acercan y la microflora del suelo se vuelve más eficiente en la conservación de C.

En la última década ha habido un número cada vez mayor de estudios que utilizan el  $qCO_2$  como un indicador de perturbación y desarrollo del ecosistema. Se sabe que las perturbaciones, al igual que el estrés comentado anteriormente, causan un aumento del  $qCO_2$ .

Para su determinación se emplea la siguiente fórmula:

$$qCO_2 = \frac{REB (\mu g/h/g)}{CBM (mg C/kg \text{ suelo})}$$

#### 4.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

Los análisis estadísticos se realizaron con el programa SPSS 23 (C SPSS Inc., 1989) y XLSTAT (2017) para la plataforma Excel, donde se ajustó los datos a una distribución Normal para todos los parámetros que se han estudiado sobre calidad del suelo, verificado con el test Kolmogorov-Smirnov. Para conocer la evolución temporal y el efecto de los diferentes tratamientos realizados en cada muestreo para la zona pre y post-incendio se realizó un test ANOVA, realizándose una prueba de inter-sujetos entre manejos. Para la separación de las medias fue realizado un test Post-Hoc de Tukey ( $p < 0,05$ ) asumiendo varianzas iguales.

## 5. RESULTADOS

### 5.1. PRE-INCENDIO

A continuación se muestra la evolución temporal de los parámetros estudiados del suelo en los 3 muestreos realizados de los diferentes manejos pre-incendio para observar y analizar los efectos de una gestión preventiva.

#### 5.1.1. CARBONO DE LA BIOMASA MICROBIANA (CBM)

En la Figura 13 se observa una disminución significativa del CBM en las parcelas quemadas donde no se realizó ningún manejo pre-incendio (BNM15B). Sin embargo, en las parcelas dónde se realizó una gestión pre-incendio hay un aumento significativo del CBM con el tiempo. Obteniéndose valores del CBM por encima de 300 mg C/kg suelo en el muestreo 3 en las parcelas gestionadas.

En cuanto a los manejos, sólo se observaron diferencias estadísticamente significativos ( $p < 0.05$ ) en el muestreo 3 en las parcelas gestionadas (BM05B y BM15B) respecto a los otros manejos, con valores de 649 Y 360 mg C/kg suelo respectivamente. Con lo cual se obtiene que el manejo pre-incendio favorecer la recuperación del carbono de la biomasa en el suelo de nuestro estudio.

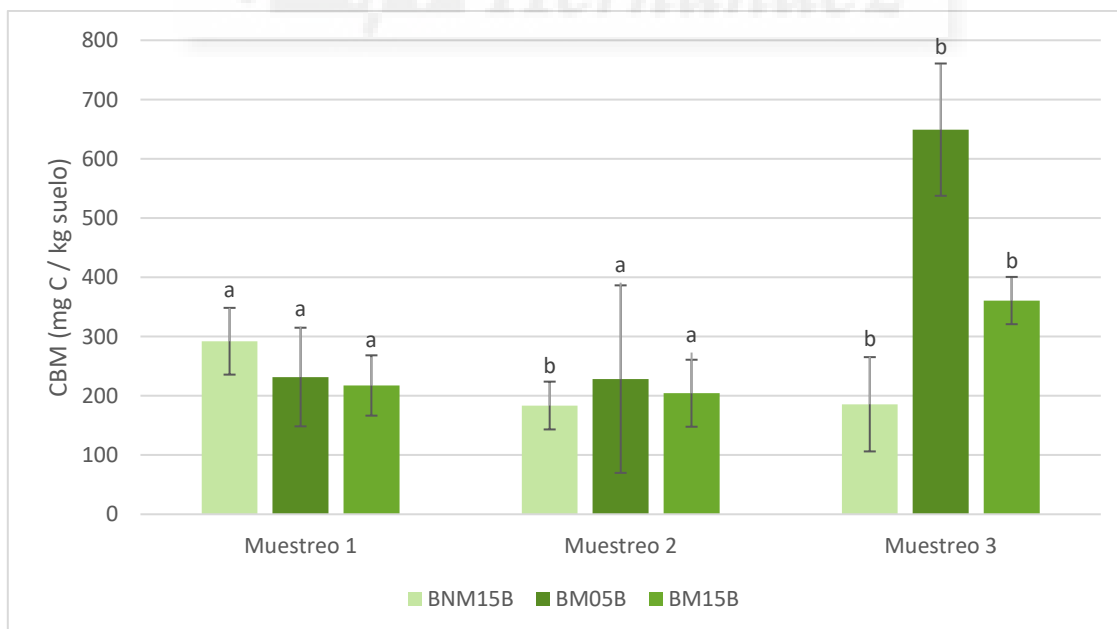


Figura 13. Evolución temporal del carbono de la biomasa microbiana (CBM) del suelo en los diferentes manejos pre-incendio (BNM15B: quemado en 1986 y 2015 no manejo, zona control; BM05B: quemado en 1986 y 2015 gestionado en 2005; BM15B: quemado en 1986 y 2015 gestionado en 2015).

### 5.1.2. RESPIRACIÓN EDÁFICA BASAL (REB)

No se observaron diferencias significativas (ns) en la evolución temporal de la REB para las parcelas donde se hizo un manejo pre-incendio (Figura 13) pero sí que hubo una disminución significativa para las parcelas no tratadas.

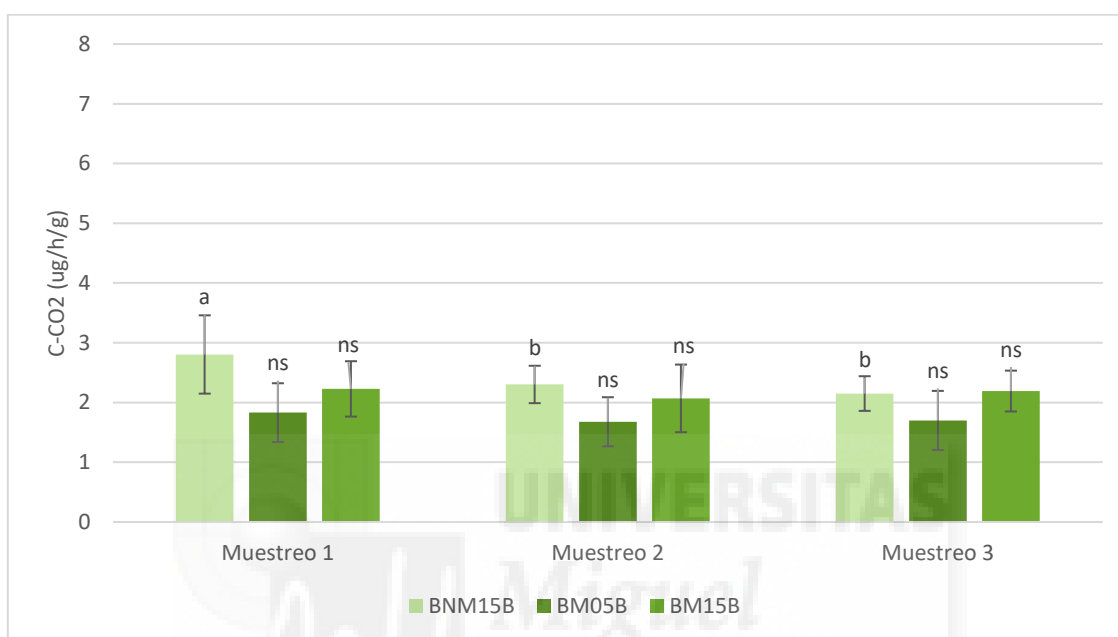


Figura 14. Evolución temporal del respiración edáfica basal (REB) del suelo en los diferentes manejos pre-incendio (BNM15B: quemado en 1986 y 2015 no manejo, zona control; BM05B: quemado en 1986 y 2015 gestionado en 2005; BM15B: quemado en 1986 y 2015 gestionado en 2015).

### 5.1.3. COCIENTE METABÓLICO DEL SUELO (qCO<sub>2</sub>)

En la figura 15 no se observa una variación significativa con el tiempo entre los muestreos pero sí se observa una disminución significativa con el tiempo en el tercer muestreo realizado a los 18 meses del incendio para los dos manejos pre-incendio BM05B y BM15B ( $p < 0.05$ ) que se corresponden con la parcela gestionada 10 años antes y la parcela gestionada inmediatamente antes de producirse el incendio. Lo que puede indicarnos que se produjo una perturbación en el medio antes de la recogida de muestras.



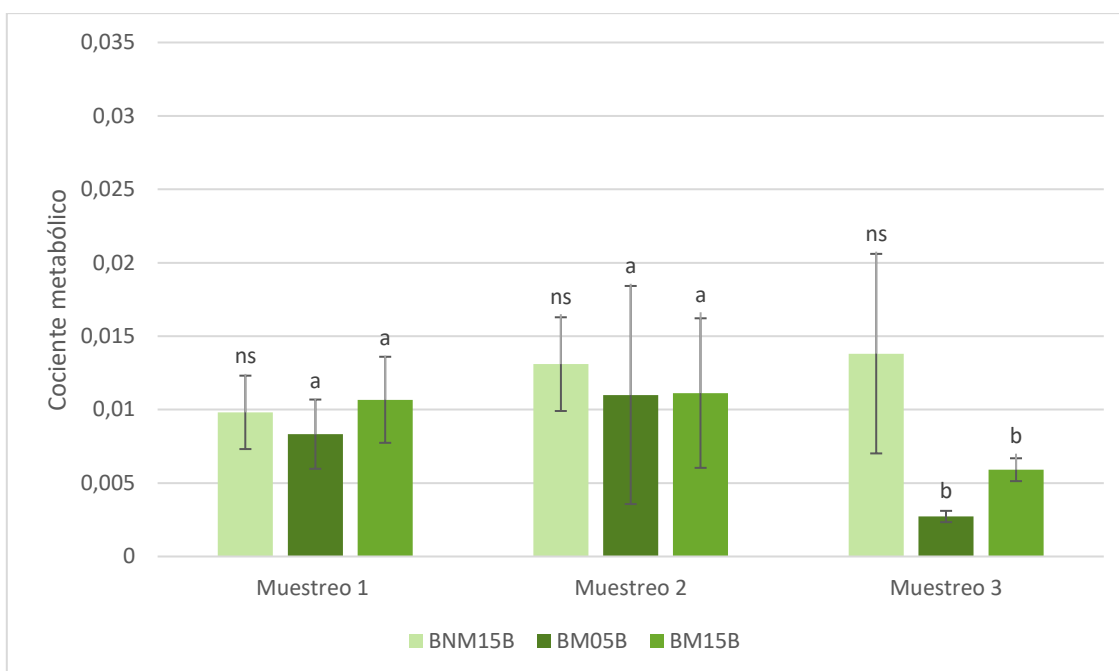


Figura 15. Evolución del cociente metabólico edáfico entre el CBM y la REB para 3 muestreos con un manejo pre-incendio (BNM15B: quemado en 1986 y 2015 no tratado, zona control: BM05B: quemado en 1986 y 2015 gestionado en 2005; BM15B: quemado en 1986 y 2015 gestionado en 2015).

## 5.2. POST-INCENDIO

En este apartado se muestra la evolución temporal de los parámetros estudiados del suelo en los 3 muestreos realizados de los diferentes manejos post-incendio para observar y analizar los efectos de una gestión después de ocurrir un incendio.

### 5.2.1. CARBONO DE LA BIOMASA MICROBIANA (CBM)

En cuanto a la evolución temporal del CBM (Figura 14) se observa una disminución significativa con el tiempo en los diferentes manejos estudiados. Alcanzándose los valores más bajos en el muestreo 2. Llegando a reducirse a 1/3 de los valores iniciales para el tratamiento CR (cortar la madera quemada y retirarla) de 620 a 185 mg C/kg suelo. En el muestreo 3, se observa una recuperación de los valores iniciales para las parcelas control (NT: no manejo). En las parcelas donde se realizó un manejo post-incendio hay un aumento respecto del muestreo 2, pero con valores inferiores a los iniciales.

Sólo se observaron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre los manejos estudiados en el muestreo 1 y en el 3. Obteniéndose los valores más bajos para las parcelas donde se realizó saca y se dejaron los restos de la tala (Figura 16).

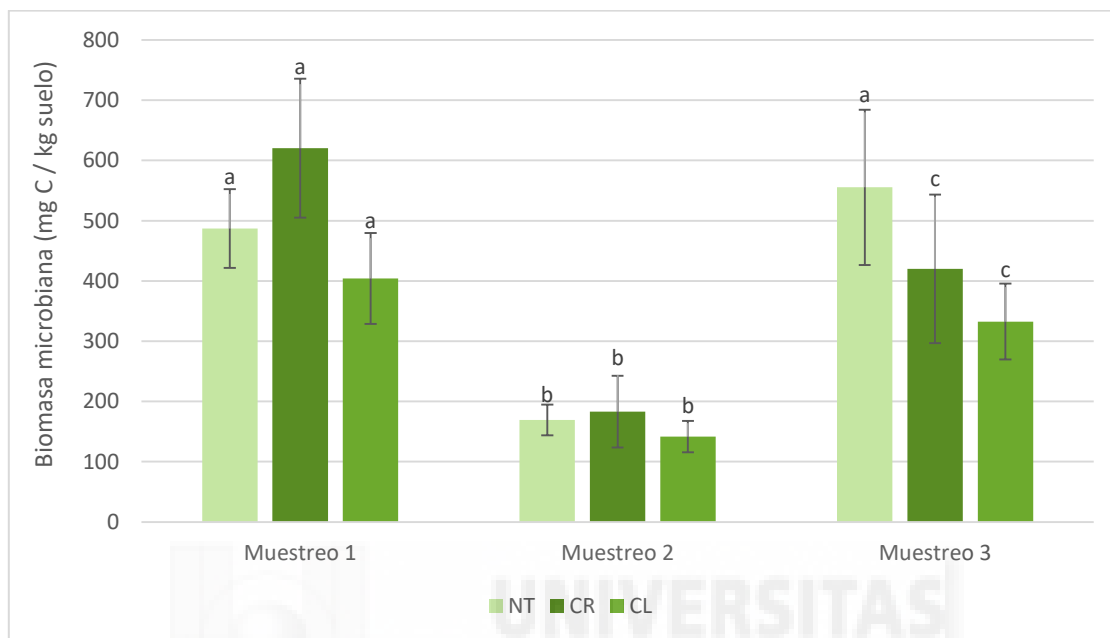


Figura 16. Evolución temporal del carbono de la biomasa microbiana (CBM) del suelo en los diferentes manejos post-incendio (NT: quemado no tratado, zona control: CR: cortar y sacar: CL: cortar y dejar).

### 5.2.2. RESPIRACIÓN EDÁFICA BASAL (REB)

Aquí se representa la evolución en el tiempo de la respiración edáfica basal (REB) de 3 muestreos diferentes aplicando un manejo post-incendio.

En la figura 17 no se observan diferencias significativas (ns) para los diferentes muestreos en el tiempo a pesar de que se aprecie una disminución durante su evolución temporal. Tampoco se observan cambios estadísticamente significativos para los diferentes manejos dentro de cada muestreo aunque el tratamiento CR parece el más favorable.

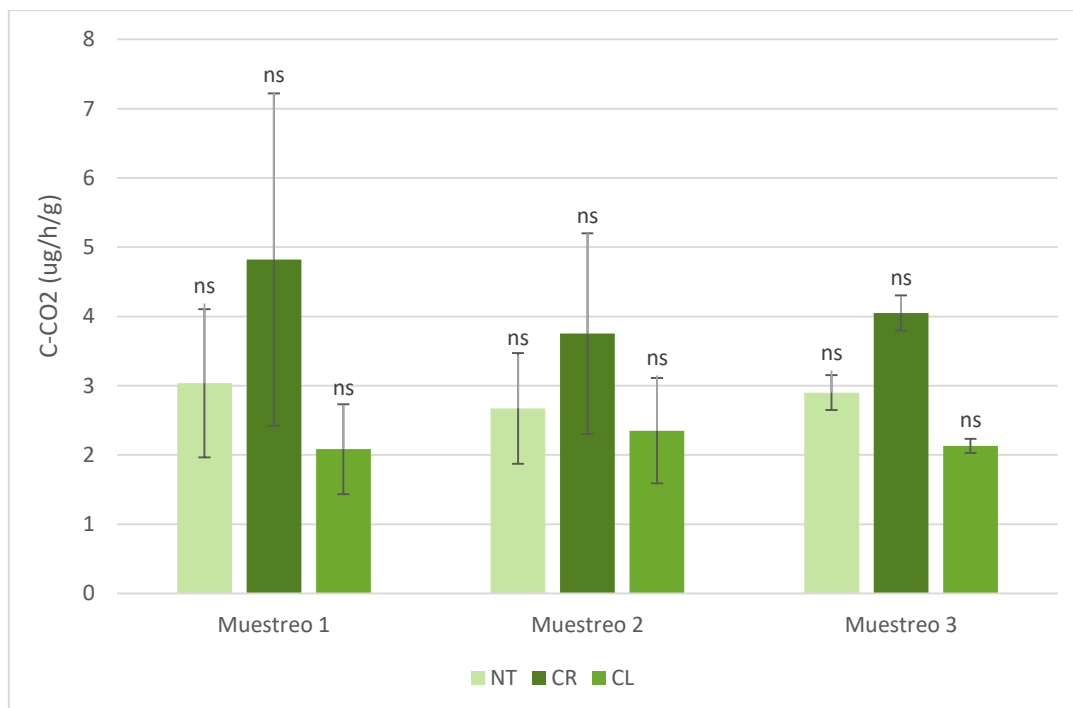


Figura 17. Evolución temporal de la respiración edáfica basal (REB) en diferentes muestreos con un manejo post-incendio (NT: quemado no tratado, zona control: CR: cortar y sacar: CL: cortar y dejar).

### 5.2.3. COCIENTE METABÓLICO DEL SUELO ( $qCO_2$ )

En la figura 18 se observa un incremento significativo del cociente metabólico con el tiempo a los 10 meses de producirse el incendio (muestreo 2) que después deja de verse. Esto señala que pudo haber una perturbación justo antes de la recogida de muestras en el medio que afectase a las propiedades estudiadas de forma que la proporción entre manejos sea la misma para entre muestreos hay una diferencia de disminución significativa.

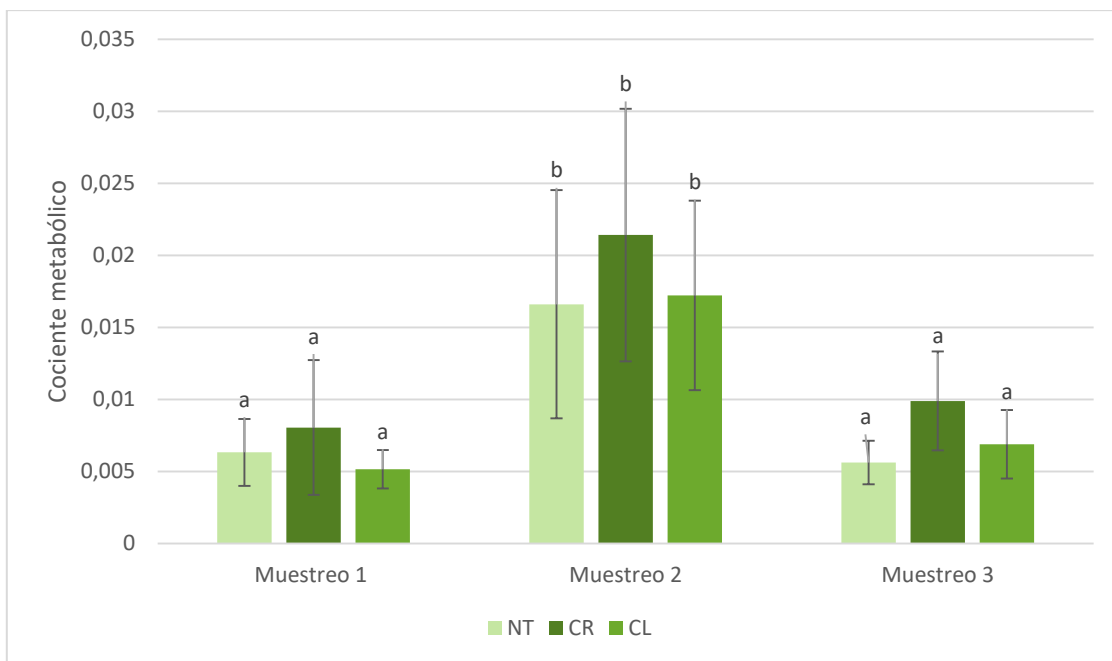
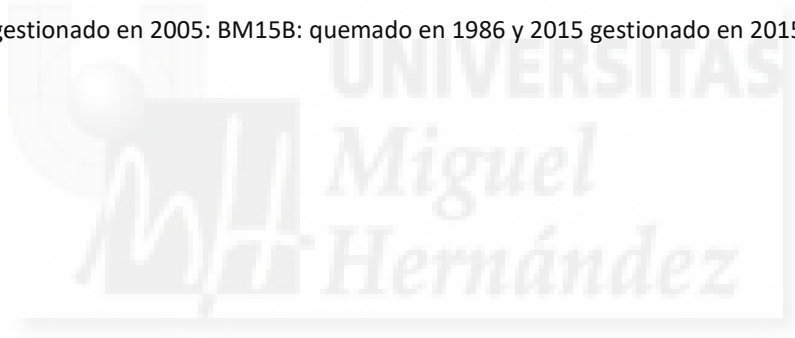


Figura 18. Evolución del cociente metabólico edáfico entre el CBM y la REB para 3 muestreos con un manejo pre-incendio (BNM15B: quemado en 1986 y 2015 no tratado, zona control: BM05B: quemado en 1986 y 2015 gestionado en 2005; BM15B: quemado en 1986 y 2015 gestionado en 2015).



## 6. DISCUSIÓN

Los parámetros microbiológicos responden muy rápidamente a las perturbaciones producidas en el suelo, y en este estudio se observó que tanto el fuego como la gestión pre y post-incendio tienen un impacto directo sobre la biomasa y la actividad microbiana del suelo al igual que en otros estudios (Mataix-Solera et al., 2009).

Generalmente, inmediatamente después del fuego, la población bacteriana que existe en la cubierta vegetal próxima al suelo se reduce, pero este efecto depende de la intensidad y duración del fuego. Sin embargo, al poco tiempo por cambios abióticos que han tenido lugar se suelen producir incrementos explosivos de bacterias, en momentos en los que la humedad es alta, motivado por un aporte de nutrientes por parte de las cenizas, aumento del pH, y por un aumento de la temperatura del suelo, como consecuencia de una mayor radiación al carecer de vegetación (Serra et al., 1992).

Para el caso de la gestión pre-incendio, no se han realizado muchos estudios sobre el efecto que estos tratamientos tienen sobre las propiedades del suelo antes y después de que se produzca un incendio. Normalmente la reducción del combustible vegetal que se realiza tiempo antes de un incendio, suele verse reflejado sobretodo en una menor severidad de este (Kristen et al., 2013). Diversos estudios afirman que los tratamientos pre-incendio favorecen sobretodo que haya una menor severidad y peligrosidad del incendio (Amanda et al., 2008). Además estos tratamientos favorecen la aparición de nuevas especies de vegetación tras el incendio ya que existe una menor competencia entre especies y hay una reducción en el banco de semillas de las especies de la zona, por lo que también se reduce su población (Amanda et al., 2008).

Una gestión pre-incendio sobre la masa forestal puede favorecer además un mejor control y extinción del incendio (Kristen et al., 2013). En nuestro estudio, el efecto del fuego sobre la biomasa microbiana se pudo observar 2 meses y 10 meses después del incendio obteniéndose valores muy bajos de este parámetro. Esto es una consecuencia del impacto del calor sobre la microbiología del suelo (Mataix-Solera et al., 2009). A los 18 meses se observó un aumento de la biomasa en las parcelas donde se realizó una gestión pre-incendio. Alcanzándose valores del CBM por encima de las parcelas donde no se realizó ninguna gestión previa al incendio.

El efecto del fuego podría haber sido mucho más dañino sin la realización de la pre-gestión como se puede observar en los resultados de las parcelas no tratadas en la biomasa microbiana.

También se observó un efecto directo del fuego para la actividad microbiana, medida como REB, que mostró valores ligeramente bajos y que no mostraban cambios significativos para todo el periodo de estudio, aunque se observó una disminución significativa para el manejo de las parcelas no tratadas. En otros estudios se ha visto que los árboles y ramas quemados pueden actuar como estructuras de recuperación, mejorando las condiciones microclimáticas para la regeneración de las plantas (Harmon et al., 1986; Lindenmayer y Noss, 2006; Stoddard et al., 2008) y que estas condiciones favorecen el desarrollo de los microorganismos y por tanto un aumento de la tasa de respiración (Marañón-Jiménez et al., 2011), pero para el caso de nuestro estudio los valores de la respiración edáfica fueron muy bajas durante todo el estudio.

En nuestro estudio por tanto se ha comprobado que a corto plazo, una gestión pre-incendio tiene efectos positivos sobre la biomasa microbiana en el suelo, haciendo que se recuperen y vuelvan a estabilizarse antes que en las parcelas no gestionadas.

De los estudios de la gestión post-incendio se sabe que normalmente el uso de maquinaria pesada para la realizar la tala y saca de la madera quemada da como resultado una compactación del suelo que puede dificultar la recuperación de sus parámetros microbiológicos (García-Orenes et al., 2017). El manejo de saca (Cortar y sacar), ha sido comúnmente el más utilizado después del incendio, pero estudios recientes han manifestado que dicho tratamiento puede afectar a la función y regeneración del ecosistema (Donato et al., 2006; Lindenmayer y Noss, 2006; Castro et al., 2010; García-Orenes et al., 2017) debido a esta compactación.

El manejo post-incendio de saca de la madera quemada y depositarla sobre la superficie del suelo, denominado CL en nuestro estudio, es defendido por varios autores (Buhk et al., 2007), ya que este tipo de manejo favorece la recuperación del suelo frente a las acciones erosivas microclimáticas o para recuperar las poblaciones microbianas en el suelo (Marañón-Jiménez et al., 2013; Castro et al., 2013). En nuestro estudio no hemos obtenido los

resultados que se reflejan en estos estudios comentados, y donde el manejo CL obtuvo valores más bajos que el resto de manejos para el caso de la gestión post-incendio.

La madera quemada constituye una importante fuente de nutrientes de liberación lenta, permitiendo la reincorporación de los nutrientes al ecosistema (Freedman et al., 1981; Augusto et al., 2000; Merino et al., 2003; Marañón-Jiménez et al., 2013), lo que resulta especialmente importante en el caso de los micronutrientes debido a su escasez en el suelo, y en el caso de los macronutrientes debido a la gran demanda de éstos por la vegetación en las primeras etapas de la regeneración (López-Serrano et al., 2005; Merino et al., 2003; Marañón-Jiménez y Castro, 2013).

Al igual que se ha comentado en la gestión pre-incendio, el paso del fuego provoca una disminución de la biomasa microbiana del suelo, este efecto depende de la intensidad así como de la duración del incendio (García-Orenes et al., 2017). En otros estudios se ha observado un aumento explosivo de las poblaciones microbianas debidas a una humedad alta y a la disponibilidad de nutrientes fácilmente asimilables procedentes de las cenizas entre otros factores (Serra et al., 1992). Esto puede justificar por qué a los dos meses tras el incendio (muestreo 1) se encuentran valores más altos de CBM a diferencia del segundo muestreo tras transcurrir 8 meses (muestreo 2) y que a los 18 meses donde se muestra de nuevo un incremento significativo (muestreo 3) comience a estabilizarse el ecosistema. De los valores que hemos obtenido en el muestreo 2, cabe destacar que son anormalmente bajos si los comparamos con los otros dos, lo que apunta a que se produjese una perturbación en el medio antes de la recogida de muestras que pudiese modificar los parámetros microbiológicos del suelo.

En nuestro estudio, el manejo post-incendio CR (cortar la madera quemada y extraerla de la zona afectada) fue en el que se encontraron los valores más altos del CBM, con valores de hasta 650 mg C/kg suelo a los 18 meses de su aplicación. Por el contrario, en otros estudios realizados como es el de García-Orenes et al. (2017) se encontró que los valores obtenidos tras la aplicación del mismo manejo (CR), eran muy diferentes y mucho más bajos. Esta diferencia parece que fue causada por el uso de maquinaria pesada para la extracción de la madera quemada, ya que en nuestro estudio no se usó dicho maquinaria y los valores obtenidos fueron significativamente más elevados.

Para el caso de la actividad microbiana con manejos post-incendio, no se encontraron diferencias significativas a lo largo de todo el estudio ni para la evolución temporal ni para los diferentes manejos.

En la actividad microbiana para el manejo post-incendio, no ha habido evolución positiva tras los 18 meses de estudio después del incendio, ni tampoco son significativas las diferencias entre manejos.

Con respecto al cociente metabólico microbiano ( $qCO_2$ ), se sabe que es un parámetro problemático ya que responde de manera impredecible a la perturbación y puede ser confundido con las respuestas microbianas al estrés (Wardle y Ghani, 1995). En otros estudios, como el de Halvorson et al. (1991), se calcularon valores de  $qCO_2$  y se observó que aunque el cociente a veces disminuía al reducirse las perturbaciones, no había claros indicios de que dichos descensos hubieran sido producidos por esas perturbaciones, no sucede así en nuestro trabajo, donde parece que sí hay una relación entre las perturbaciones y los valores obtenidos. Dado que la biomasa microbiana y la respiración del suelo aumentaron como estaba previsto con una reducción de la perturbación en el estudio, el  $qCO_2$  parece que es más adecuado que cualquiera de estos otros factores para usarse como un bioindicador de la respuesta del ecosistema a la perturbación (Fenn et al., 1993).

En nuestro estudio, en las parcelas pre-incendio los resultados mostraban que podían haberse producido algunas perturbaciones a los 18 meses del incendio en las parcelas donde se hizo una gestión pre-incendio BM05B y BM15B ya que la biomasa presentaba valores anormalmente bajos. En los manejos post-incendio se vio un aumento de la biomasa pero no de la respiración, obteniéndose los valores más bajos de  $qCO_2$ , esto puede ser debido a que los nutrientes no estén tan disponibles para que la biomasa microbiana los asimile.

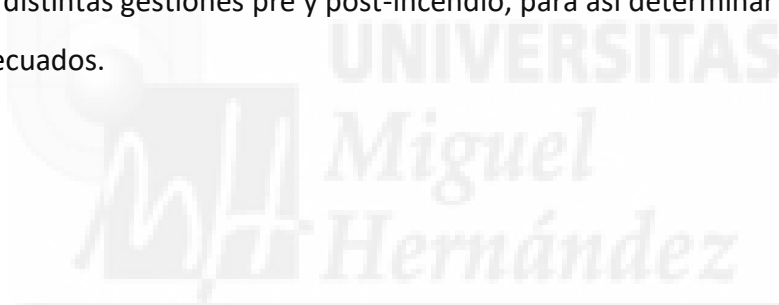


## 7. CONCLUSIÓN

Tras los resultados obtenidos para el manejo pre-incendio, se concluye que el tratamiento que mejor evolución ha presentado para la biomasa ha sido el BM05B a los 18 meses de producirse el incendio. En el caso de la actividad microbiana, no se observaron cambios significativos para los muestreos ni tampoco para los diferentes manejos.

Los cambios observados en las variables edáficas estudiadas en el manejo post-incendio resultaron más evidentes sobre las parcelas en las que no se había realizado tratamiento alguno. Para la actividad microbiana en el manejo post-incendio se concluye que no hubo cambios significativos en los parámetros estudiados ni para los muestreos ni para los manejos.

Es necesaria la realización de más muestreos y durante un tiempo más prolongado para medir la evolución de estas y otras propiedades del suelo a lo largo del tiempo y evaluar el efecto de las distintas gestiones pre y post-incendio, para así determinar qué tratamientos son los más adecuados.



## 8. PROYECCIÓN FUTURA

No existen muchos estudios acerca de la gestión pre-incendio, por lo que en mi consideración deberían realizarse más estudios con este tipo de manejos y gestiones pre-incendio y durante un tiempo más prolongado para poder observar mejor su evolución y sus efectos sobre las propiedades del suelo.

También se debe investigar acerca de los tratamientos aplicados post-incendio, se deberían realizar varios muestreos y durante más tiempo para realmente apreciar los efectos de los diferentes tratamientos aplicados y su evolución temporal o combinando estos tratamientos con otros nuevos para procurar la protección del suelo frente a la erosión entre otros factores.

En ambos casos se deben realizar más estudios para lograr una mayor comprensión sobre los efectos que estos tratamientos producen sobre las propiedades microbiológicas del suelo.



## 9. BIBLIOGRAFÍA

Acosta-Martínez V., Mikha M., Vigil MF., 2007. Microbial communities and enzyme activities in soils under alternative crop rotations compared to wheat–fallow for the Central Great Plains. *Appl Soil Ecol* 37, 41-52.

Amanda M. Kuenzi, Peter Z. Fule, Carolyn Hull Sieg, 2008. Effects of fire severity and pre-fire stand treatment on plant community recovery after a large wildfire *Forest Ecology and Management* 255, 855-865.

Anderson, T. -H. y Domsch, K. H., 1985. Determination of eco-physiological maintenance requirements of soil microorganisms in a dormant state. *Biology and Fertility of Soils* 1, 81-89.

Baron, J.S., Gunderson, L., Allen, C.D., Fleishman, E., McKenzie, D., Meyerson, L.A., Oropeza, J., Stephenson, N., 2009. Options for national parks and reserves for adapting to climate change. *Environ. Manage.* 44, 1033–1042.

Bertiller, M.B., Marone, L., Baldi, R. y Ares, J.O., 2009. Biological interactions at different spatial scales in the Monte desert of Argentina. *Journal of Arid Environments* 73, 212-221.

Brais, S., Paré, D., Ouirmet, R., 2000. Impacts of wild fire severity and salvage harvesting on the nutrient balance of jack pine and black spruce boreal stands. *For. Ecol. Manag.* 137, 231-243.

Buhk, C., Meyn, A., Jentsch, A., 2007. The challenge of plant regeneration after a fire in the Basin: scientific gaps in our knowledge on plant strategies and evolution of traits. *Plant Ecol.* 192, 1-19.

Burton, A.J., Pregitzer, K.S., Hendrick, R.L., 2000. Relationships between fine root dynamics and nitrogen availability in Michigan northern hardwood forests. *Oecologia* 125, 389-399.

Cerdà, A. y Mataix-Solera, J. (eds), 2009. Efectos de los incendios forestales sobre los suelos en España. El estado de la cuestión visto por los científicos españoles. Càtedra de Divulgació de la Ciència. Universitat de València. 27-28.

Cochrane, M.A., Morgan, C.J., Wimberly, M.C., Baer, A.D., Finney, M.A., Beckendorf, K.L., Eidenshink, J., Zhu, Z., 2012. Estimation of wildfire size and risk changes due to fuel treatments. *Int. J. Wildland Fire*.

Fenn M.E., Poth M.A., Dunn P.H. and Barro S.C., 1993. Microbial N and biomass, respiration and N-mineralisation in soils beneath two chaparral species along a fire-induced age gradient. *Soil Biology & Biochemistry* 25, 457-466.

Finney, M.A., McHugh, C.W., Grenfell, I.C., 2005. Stand- and landscape-level effects of prescribed burning on two Arizona wildfires. *Can. J. For. Res.* 35, 1714-1722.

García, C., Hernández, T., 1997. Biological and biochemical indicators in derelict soils subject to erosion. *Soil Biol. Biochem.* 29, 171-177.

García-Orenes, F., Guerrero, C., Roldán, A., Mataix-Solera, J., Cerdà, A., Campoy, M., Zornoza, R., Bárcenas, G., Caravaca, F., 2010. Soil microbial biomass and activity under different agricultural management systems in a semiarid Mediterranean agroecosystem. *Soil Tillage Res.* 109, 110-115.

García-Orenes, F., Arcenegui, V., Chrenková, K., Mataix-Solera, J., Moltó, J., Jara-Navarro y Torres, M.P., 2017. Effects of salvage logging on soil properties and vegetation recovery in a fire-affected Mediterranean forest: A two year monitoring research. *Science of the Total Environment* 586, 1057-1065.

Grime, J.P., 1977. Evidence for the existence of three primary strategies in plants and its relevance to ecological and evolutionary theory. *Am. Nat.* 111, 1169-1194.

Halvorson J.J., Smith J.L. and Franz E.H., 1991. Lupine influences on soil carbon, nitrogen and microbial activity in developing ecosystems at Mount St. Helens. *Oecologia* 87, 162-170.

Harmon, M.E., Franklin, J.F., Swanson, F.J., Sollins, P., Gregory, S.V., Lattin, J.D., Anderson, N.H., Cline, S.P., Aumen, N.G., Sedell, J.R., Lienkaemper, G.W., Cromack, K., Cummins, K.W., 1986. Ecology of coarse woody debris in temperate ecosystems. *Adv. Ecol. Res.* 15, 133-302.

Jennings, T.N., Smith, J.E., Cromack, Jr.K., Sulzman, E.W., McKay, D., Cladwell, B.A., Beldin, S.I., 2012. Impact of postfire logging on soil bacterial and fungal communities and soil biogeochemistry in mixed-conifer forest in central Oregon. *Plant Soil* 350, 393-411.

Kristen L. Shive, Carolyn H. Sieg, Peter Z. Fulé., 2013. Pre-wildfire management treatments interact with fire severity to have lasting effects on post-wildfire vegetation response. *Forest Ecology and Management* 297, 75-83.

Lindenmayer, D.B., Noss, R.F., 2006. Salvage logging, ecosystem processes, and biodiversity conservation. *Conserv. Biol.* 20, 949-958.

Marañón-Jiménez, S., Castro, J., Kowalski, A.S., Serrano-Ortiz, P., Reverter, B.R., Sánchez-Cañete, E.P., Zamora, R., 2011. Post-fire soil respiration in relation to burnt Wood management in a Mediterranean mountain ecosystem. *For. Ecol. Manag.* 261, 1436-1447.

Marinari, S., Masciandaro, G., Ceccanti, B., and Grego, S., 2000. Influence of organic and mineral fertilizers on soil biological and physical properties. *Biores. Technol.* 72, 9-17.

Masciandaro, G., Ceccanti, B. and Garcia, C., 1997. Soil agro-ecological management: Fertirrigation and vermicompost treatments. *Biores. Technol.* 59, 199-206.

Mataix-Solera, J., Navarro-Pedreño, J., Guerrero, C., Gómez, I., Marco, B. y Mataix, J., 2002. Effects of an experimental fire on soil microbial populations in a Mediterranean environment. En: J.L. Rubio, R.P.C. Morgan, S. Asins and V. Andreu (eds), *Man and Soil at the Third Millennium*. Vol II. Geofoma Ediciones, Logroño, 1067-1614.

Mataix-Solera, J., Guerrero, C., García-Orenes, F., Bárcenas, G.M. y Torres, M.P., 2009. Forest fire effects on soil microbiology. En: A. Cerdà and P. Robichaud (eds), Fire effects on soils and restoration strategies. Science Publishers, Inc. Enfield, New Hampshire USA, 133-175.

Mataix-Solera, J., Arnaiz, P., Arcenegui, V., Chrenková, K., López-Caravaca, A., García-Orenes, F., Jara-Navarro, A.B., Cerdà, A., 2016. Hydrological response 3 years after salvage logging treatments in a recently burnt forest soil. European Society for Soil Conservation Conference. Cluj-Napoca, Romania. 15–18 June 2016. Abstracts Book, 47.

Moroni, M.T., Shaw, C.H., Otahal, P., 2010. Forest carbon stocks in Newfoundland boreal forests of harvest and natural disturbance origin I: field study. Can. J. For. Res. 40, 2135-2145.

Nadelhoffer, K.J., 2000. The potential effects of nitrogen deposition on fine-root production in forest ecosystems. New Phytol. 147, 131-139.

Nannipieri P, Kandeler E, Ruggiero P., 2002. Enzyme activities and microbiological and biochemical processes in soil. In: Burns RG, Dick RP (eds) Enzymes in the environment. Activity, ecology and applications. Marcel Dekker, New York, 1-33

Nannipieri, P., J. Ascher, M.T. Ceccherini, L. Landi, G. Pietramellara, and G. Renella., 2003. Microbial diversity and soil functions. European Journal of Soil Science, 54, 655-670.

Neary, D.G., Ryan, K.C., DeBano, L.F., 2005. Wildland fire in ecosystems: effects of fires in water and soils. General Technical Report RMRS-GTR-42-VOL.4. United States Department of Agriculture, Forest Service, Ogden, UT.

Odum g P., 1969. The strategy of ecosystem development. Science 164, 262-270.

Odum E. P., 1985. Trends expected in stressed ecosystems. Bioscience 35, 419-422.

Pollet, J., Omi, P.N., 2002. Effect of thinning and prescribed burning on crown fire severity in ponderosa pine forests. Int. J. Wildland Fire 11, 1-10.

Robichaud, P. R., Beyers, J. L., Neary, D. G., 2000. Evaluating the effectiveness of postfire rehabilitation treatments. General Technical Report RMRS-GTR-63. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Fort Collins, CO.

Seedre, M., Shrestha, B.M., Chen, H.Y.H., Colombo, S., Jögiste, K., 2011. Carbon dynamics of North American boreal forest after stand replacing wildfire and clearcut logging. *J. For. Res.* 16, 168-183.

Serrano-Ortiz, P., Marañón-Jiménez, S., Reverter, B.R., Sánchez-Cañete, E.P., Castro, J., Kowalski, A.S., 2011. Post-fire salvage logging reduces carbon sequestration in Mediterranean coniferous forest. *For. Ecol. Manag.* 262, 2287-2296.

Smith, K.C., Coyea, M.R., Munson, A.D., 2000. Soil carbon, nitrogen, and phosphorus stocks and dynamics under disturbed black spruce forests. *Ecol. Appl.* 10, 775–788.

Stoddard, M.T., Huffman, D.W., Alcoze, T.M., Fule, P.Z., 2008. Effects of slash on herbaceous communities in pinyon-juniper woodlands of northern Arizona. *Rangel. Ecol. Manag.* 61, 485-495.

Strom, B.A., Fulé, P.Z., 2007. Pre-wildfire fuel treatments affect long-term ponderosa pine forest dynamics. *Int. J. Wildland Fire* 16, 128-138.

Tang, J.W., Baldocchi, D.D., Qi, Y., Xu, L.K., 2003. Assessing soil CO<sub>2</sub> efflux using continuous measurements of CO<sub>2</sub> profiles in soils with small solid-state sensors. *Agric. For. Meteorol.* 118, 207-220.

Úbeda, X., Outeiro, L., 2009. Physical and chemical effects of fire on soil. In: Cerdà, A., Robichaud, P.R. (Eds.), *Fire Effects On Soil And Restoration Strategies*. Science Publishers, Enfield, NH, 105-132.

Wardle D.A. and Ghani A., 1995. A critique of the microbial metabolic quotient ( $qCO_2$ ) as a bioindicator of disturbance and ecosystem development. *Soil Biol. Biochem.* No 12, 27, 1601-1610.

