

PROYECTO FIN DE MASTER:

VARIACIONES EN PROFUNDIDAD DE LAS  
PROPIEDADES DE UN SUELO YESOSO  
FORESTAL BAJO QUEMA CONTROLADA.

Master en Iniciación a la Investigación  
en Ciencias Agrarias y del Medio Natural



Autora: María Conesa Puente.

Director: David Badía Villas.

30 Noviembre 2012

Escuela politécnica Superior de Huesca. Universidad de Zaragoza

# ÍNDICE GENERAL

<b>1. Introducción</b>	8
1.1. Problemática de los incendios	10
1.2. Efecto del fuego sobre las propiedades del suelo.	12
1.3. Contextualización	17
<b>2. Objetivos</b>	18
<b>3. Metodología</b>	20
3.1. Localización del área de estudio	21
3.2. Quema de suelos	24
3.3. Descripción de los métodos	29
3.3.1. Color	29
3.3.2. Hidrofobicidad	31
3.3.3. Densidad Aparente	32
3.3.4. Estabilidad estructural	33
3.3.5. Materia orgánica	36
3.3.6. Carbono pirolizado	37
3.4. Análisis estadístico	37
<b>4. Resultados y discusión</b>	39
4.1. Color	41
4.2. Hidrofobicidad	43
4.3. Densidad aparente	46
4.4. Estabilidad estructural	47
4.5. Carbono orgánico	51

4.6. Carbono pirolizado	52
4.7. Carbono inorgánico	53
4.8. Relación entre parámetros	54
<b>5. Conclusiones generales</b>	<b>56</b>
<b>6. Referencias bibliográficas</b>	<b>59</b>
<b>7. Resumen</b>	<b>72</b>
<b>8. Anexos</b>	<b>74</b>
8.1. Temperaturas alcanzadas	75
8.1.1. Temperaturas alcanzadas bloque 1	75
8.1.2. Temperaturas alcanzadas bloque 2	77
8.1.3. Temperaturas alcanzadas bloque 3	79
8.2. Evolución logarítmica de la hidrofobicidad	81
8.3. Densidad Aparente	90
8.4. Elementos gruesos	91
8.5. Estabilidad estructural	92
8.6. Resultados TOC	95
8.7. Gráficas de los resultados obtenidos	96
8.8. Gráficas resumen datos	102

## ÍNDICE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Localización de la zona de extracción de los bloques	22
<b>Figura 2:</b> Mapa de España y emplazamiento de la zona de estudio dónde se realizó el muestreo	22
<b>Figura 3:</b> Temperaturas registradas en monolitos de suelo bajo quema controlada	25
<b>Figura 4:</b> Esquema del equipo utilizado para el tratamiento de la quema	26
<b>Figura 5:</b> Tablas Munsell	30
<b>Figura 6:</b> Tres patrones diferentes de cambios de estabilidad de los agregados en relación a la gravedad de los incendios	50

## ÍNDICE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1:</b> Climatograma mediterráneo	10
<b>Gráfico 2:</b> Número de siniestros y superficie afectada en España en las últimas tres décadas	11
<b>Gráfico 3:</b> Número de siniestros y superficie afectada en Aragón en las últimas dos décadas	11
<b>Gráfico 4:</b> Temperaturas registradas a 1 y 2 cm de profundidad en la quema del bloque uno	27
<b>Gráfico 5:</b> Temperaturas registradas a 1 y 2 cm de profundidad en la quema del bloque dos	28
<b>Gráfico 6:</b> Temperaturas registradas a 1 y 2 cm de profundidad en la quema del bloque tres	28

## ÍNDICE FOTOGRAFÍAS

<b>Foto 1:</b> Caracterización del bloque de suelo en el laboratorio	24
<b>Foto 2:</b> Imagen de una muestra de suelo que ha sido quemada	27
<b>Foto 3:</b> Gota de agua en la superficie de un agregado de suelo repelente al agua	45

## ÍNDICE TABLAS

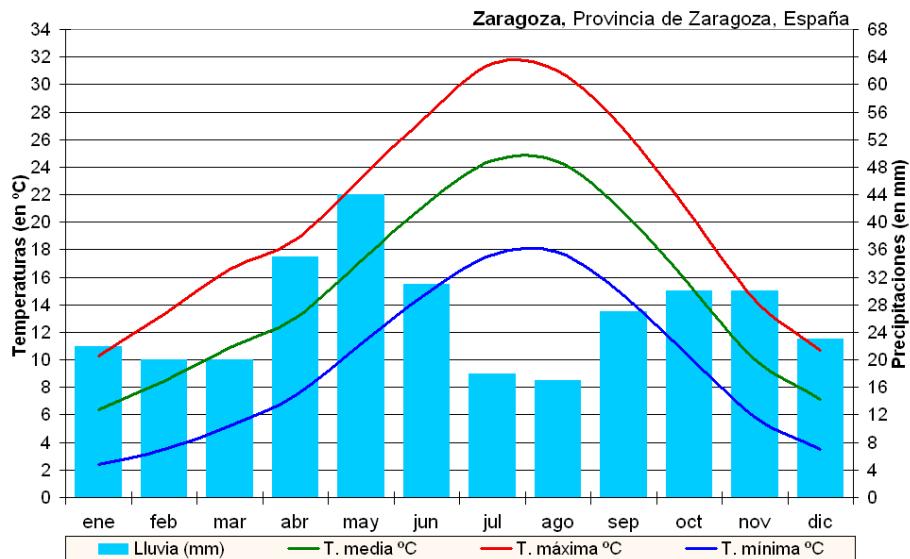
<b>Tabla 1:</b> Factores de formación y propiedades del horizonte Ah	23
<b>Tabla 2:</b> Concentración de etanol e intensidad de la repelencia	32
<b>Tabla 3:</b> Estabilidad estructural	36
<b>Tabla 4:</b> Resultados obtenidos del color del suelo	41
<b>Tabla 5:</b> Efecto del fuego en la repelencia del suelo al agua a diferentes profundidades	44
<b>Tabla 6:</b> Tabla de frecuencias de la hidrofobicidad del agua	46
<b>Tabla 7:</b> Efecto del fuego en la densidad aparente a diferentes profundidades	46
<b>Tabla 8:</b> Efecto del fuego en la estabilidad estructural a diferentes profundidades	48
<b>Tabla 9:</b> % de arena en cada uno de los bloques a 1 y 2 cm de profundidad	48
<b>Tabla 10:</b> Efecto del fuego en el carbono orgánico a diferentes profundidades	51
<b>Tabla 11:</b> Efecto del fuego en el carbono pirolizado a diferentes profundidades	52
<b>Tabla 12:</b> Efecto del fuego en el carbono inorgánico a diferentes profundidades	53
<b>Tabla 13:</b> Semi-matriz de los parámetros estudiados	54
<b>Tabla 14:</b> Resumen de los datos obtenidos	57

# INTRODUCCIÓN

## 1. INTRODUCCIÓN:

Los incendios forestales han aumentado drásticamente en frecuencia y extensión gracias al calentamiento general y la tendencia a la sequía. Pero el principal motivo han sido los cambios socioeconómicos, incluyendo la despoblación rural, el abandono de la tierra y la forestación con especies inflamables. El mosaico de muchos de los paisajes mediterráneos (por ejemplo, el patrón de uso de la tierra, las terrazas abandonadas o pistas de esquí) puede explicar a veces en conflicto post-incendio, la respuesta hidrológica y de erosión en diferentes sitios y escalas espaciales (Shakesby, 2011).

Las características climáticas del mediterráneo (veranos cálidos y secos e inviernos relativamente húmedos) lo hacen propenso a los incendios forestales y a la erosión del suelo en el post-incendio. La mayoría de las precipitaciones ocurren entre octubre y marzo con un 70-80% (es decir, otoño y primavera) y es en los veranos secos cuando ocurren los incendios forestales. Aunque las precipitaciones anuales varían considerablemente en el mediterráneo, los veranos se caracterizan por altas temperaturas, la alta velocidad del viento y la baja humedad del aire. El contenido de humedad es bajo, lo que promueve las igniciones de incendios. Las velocidades del viento altas y las olas de calor aumentan la probabilidad de generar grandes incendios forestales (Shakesby, 2011).



Gráfica 1: Climatograma en clima mediterráneo (Zaragoza). Fuente datos: [www.aemet.es](http://www.aemet.es)

### 1.1. Problemática de los incendios:

La gran preocupación por los incendios forestales y sus efectos en la región mediterránea comenzó a partir de los años 70, ya que se produjo un aumento exponencial de la actividad del fuego (Moreno et al., 1998). Entre los 70 y los 90, se quemaron un promedio de 600.000 hectáreas al año disminuyendo, en décadas posteriores, a unas 150.000 hectáreas (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2012).

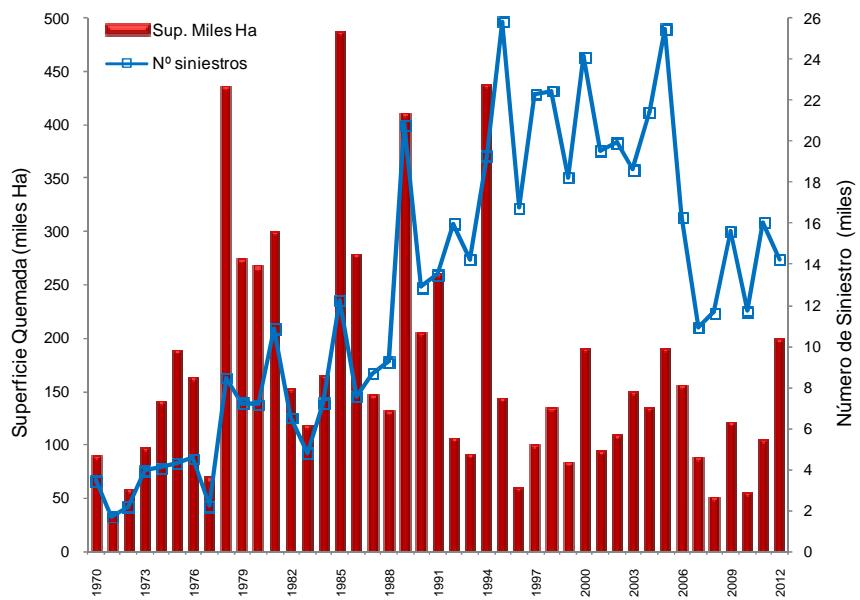
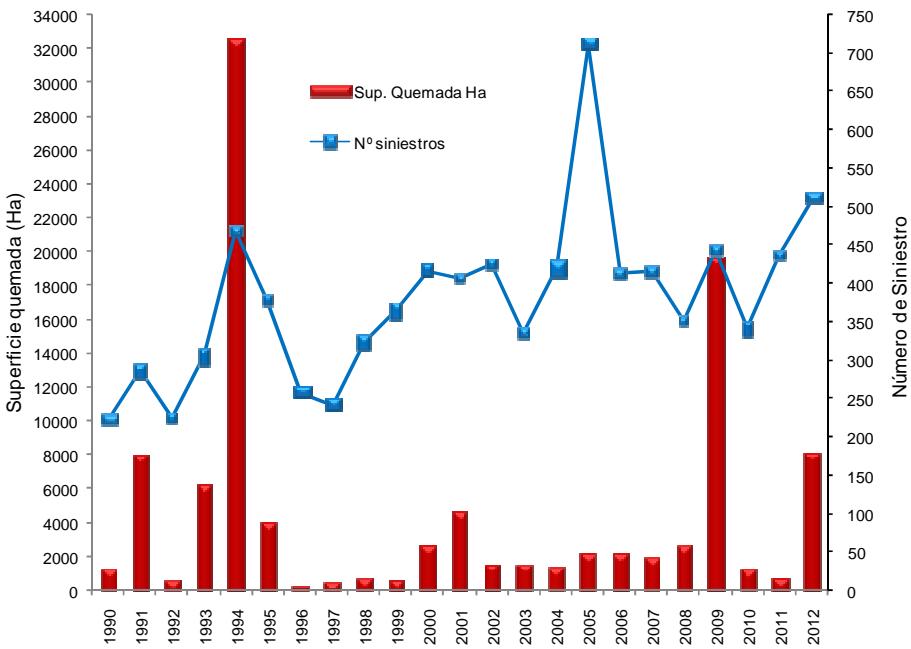


Gráfico 2: Número de siniestros y superficie afectada en España en las últimas tres décadas. Fuente: Elaboración a partir de datos del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. \*2012 Datos provisionales actualizados a 30 de Septiembre del 2012.



Gráfica 3: Número de siniestros y superficie afectada en Aragón en las últimas dos décadas. Fuente: Elaboración a partir de datos del Instituto Aragonés de Estadística. \*2012 Datos provisionales actualizados a 30 de Septiembre del 2012.

### 1.2. Efecto del fuego sobre las propiedades del suelo:

A pesar de que el fuego es un agente totalmente natural responsable de dar forma dinámica a la vegetación (Trabaud, 2002), los incendios forestales son frecuentemente considerados como un agente importante de erosión y degradación del suelo. Incluso se ha sugerido que en algunos lugares es el agente más importante de cambios geomorfológicos (Debano et al., 2005).

Hay que tener en cuenta que sólo una pequeña parte del calor generado durante un incendio forestal es irradiado al suelo. La naturaleza de los cambios en el suelo depende tanto de las temperaturas alcanzadas en distintas profundidades del suelo como del grado de calentamiento que los diferentes componentes del suelo pueden soportar antes de ser alterado. A su vez, el grado de calentamiento del suelo depende de factores tales como la magnitud y duración de la energía transferida desde el fuego hacia el suelo, la composición del suelo (incluyendo la humedad), la estructura (porosidad), etc.

Las diferentes variaciones espaciales, temporales y en profundidad que el suelo pueden tener modifican su estructura, así como la infiltración del agua en el suelo y la escorrentía, lo que conduce a su erosión y degradación (Bento-Gonçalves et al., 2012). Por ejemplo, el fuego puede redistribuir y concentrar las partículas hidrofóbicas ya existentes en el suelo e incluso hacerlas más hidrófobas por pirólisis (Badía y Martí, 2003; Shakesby, 2011).

Bien es sabido que son varias las intensidades del fuego y además, cada una de ellas afecta al suelo de manera diferente. Por lo que la erosión después de un incendio es proporcional a la intensidad del fuego(Coelho et al., 2004; Ferreira et al., 2005).El nivel de gravedad con que el fuego puede afectar una zona, estará en función de parámetros que definen el régimen del fuego en una determinada área como son: extensión, frecuencia, periodo de recurrencia, estacionalidad y la intensidad de los incendios (Ayache et al., 2012).

La eliminación de la cubierta vegetal, así como de la hojarasca o mantillo, deja al suelo sin protección frente a las lluvias, elimina la microbiota y altera los

componentes presentes en éste. A pesar de la eliminación de esta cubierta vegetal, en el suelo queda un banco de semillas, bulbos y raíces que van a permitir la posterior recuperación de la vegetación. De hecho, hay plantas adaptadas a zonas en las que los incendios son comunes año a año como son las plantas pirófitas, por ejemplo, algunas especies de pinos (Shakesby, 2011).

El comportamiento del fuego y por tanto su potencial impacto está relacionado con la cantidad de combustible acumulado, que a su vez depende del tiempo transcurrido desde el último incendio (Baeza et al., 2011). De hecho, las diferencias encontradas entre la biomasa consumida de cada especie son atribuibles alas diferencias estructurales entre las especies y a la retención de ramas muertas (Schwilk, 2003; Bond et al., 2005).

Para clasificar la severidad del fuego en un incendio, se tiene en cuenta el grado de destrucción de la vegetación y el combustible del suelo (Doerr et al., 2005).

Hay estudios que en condiciones de laboratorio indican que la quema promueve un consumo considerable de carbono orgánico del suelo cuando la temperatura supera los 200-250°C (Giovannini et al., 1988; Giovannini, 1994). La duración de los niveles de la alta temperatura en estos experimentos en calentamientos artificiales ha sido generalmente larga.

Otros autores han estudiado el efecto del calentamiento en condiciones de laboratorio, con el uso de tiempos largos de residencia de las altas temperaturas Josa et al., 1994 han encontrado que la estabilidad estructural se redujo entre 200 °C y 300 °C, mientras que Guerrero et al., 2001 han observado que el porcentaje de agregados estables aumentó logarítmicamente cuando se calienta.

Varios autores (Josa et al., 1994 ; DeBano, 2000 ) describen la creación de compuestos hidrófobos cuando las temperaturas del suelo han alcanzado 175 °C- 200 °C, y la desaparición de estos compuestos cuando la temperatura se eleva entre 280 °C y 400 °C. Durante nuestro tratamiento de combustión, la temperatura del suelo se eleva a estos intervalos, de tal manera que tanto la síntesis y la destrucción de las sustancias hidrófobas podría tener lugar al mismo tiempo.

Además, según diferentes autores (Giovannini, 1994; Pardini et al., 2004 ; Six et al., 2004 ), el calentamiento de un suelo hasta 220°C no modifica significativamente las características del suelo. El calentamiento entre 220 °C y 460°C provoca la combustión de algunos agentes de cementación y otras sustancias orgánicas en el suelo. Las temperaturas superiores a 460°C para provocar la combustión total de la materia orgánica del suelo y la descomposición de los carbonatos. Sin embargo, a esta temperatura, la macroagregación se puede aumentar a través de la agregación de los componentes de arcilla y limo en arena de tamaño de partículas ( Giovannini, 1994 ).

Tras un incendio forestal, existen varios impactos ambientales y ecológicos ya que la quema de biomasa es una fuente significativa de gases atmosféricos como el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y el metano ( $\text{CH}_4$ ), gases de efecto invernadero, que contribuyen al calentamiento global (Levine, 1994). El modelo más simple para la combustión de biomasa supone que los productos finales son  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$  y minerales contenidos en las cenizas. Sin embargo, la oxidación completa de la biomasa requiere condiciones de disponibilidad de oxígeno durante el proceso de combustión, que en general no ocurre en la naturaleza. En condiciones ambientales, la combustión suele ser incompleta y también se produce CO,  $\text{CH}_4$ , una compleja gama de productos de pirólisis incluidos hidrocarburos y fracciones de partículas de materia orgánica (Cofer et al., 1997). Pero como la vegetación en los ecosistemas vuelve a crecer, el  $\text{CO}_2$  se retira de nuevo a la atmósfera a través de la fotosíntesis y se incorpora en el crecimiento vegetativo con un nuevo equilibrio del Carbono (Levine, 1996).

Además, cabe destacar que son muchas las propiedades edáficas que se pueden ver afectadas por el fuego, tanto de una manera directa e inmediata por efecto del calor recibido como indirecta por la alteración posterior. La magnitud de esos cambios dependerá de varios factores, siendo los factores clave la intensidad y la severidad del fuego. Entre las propiedades afectadas por el fuego destacan: la estabilidad estructural, la materia orgánica o la repelencia. Por todo esto, en los últimos años diversos estudios han tratado de relacionar los cambios que se producen en el suelo tras un incendio, como es el caso de la repelencia al agua con

la materia orgánica del suelo, tanto en ensayos de laboratorio como en zonas afectadas por incendios (Certini, 2005; Doerr, et al., 2005; Llovet, et al., 2008). No obstante, se aprecia una gran variabilidad en función de la cobertura vegetal, las propiedades del suelo, intensidad del fuego, profundidad estudiada, etc. Varios estudios de laboratorio indican que la temperatura por debajo de 175°C causa ligeros cambios en la repelencia al agua. La repelencia al agua se incrementa notablemente entre 175 y 270 °C. Por encima de los 270°C y hasta los 400°C se destruyen las sustancias hidrofóbicas, suprimiendo así la repelencia al agua (DeBano, et al.; 1976; Doerr, et al., 2004; Varela, et al., 2005). No obstante, estas directrices no siempre se cumplen (Atanassova, et al., 2011).

Si hablamos de la estabilidad de los agregados, hay que tener en cuenta que es el factor que más fuertemente influye en la susceptibilidad de los suelos frente a la erosión y a la infiltración del agua en el suelo, convirtiéndose tras los incendios, debido a la eliminación de la cubierta vegetal y la hojarasca, en un factor clave en la gestión del agua y la pérdida de nutrientes y materiales del suelo (Shabesky, 1993).

La estabilidad estructural es considerada por muchos autores como un parámetro indicativo de la calidad del suelo, puesto que depende de factores físicos, químicos y biológicos. La mayoría de los estudios han encontrado una pérdida de la estabilidad estructural como consecuencia del fuego (Úbeda, et al., 1990), pero otros han descrito lo contrario (Mataix-Solera et al., 2011). A veces la actividad del fuego no conduce a cambios significativos en las propiedades del suelo y no se detecta una pérdida de la estabilidad de los agregados. Por ejemplo, un área donde el fuego se propaga a través de la copa de los árboles. En este caso, no se observarán en el suelo cambios significativos directos causados por el fuego. Por otra parte, hay casos en los que los cambios de calor puede conducir a una mayor estabilidad de los agregados como, por ejemplo, si las temperaturas son suficientes para producir la fusión térmica de las partículas y la recristalización de minerales en la fracción de arcilla (Giovannini et al., 1997) que conduce a la formación de agregados más resistentes. En muchos casos, cuando el suelo se calienta a temperaturas bajas, se ha observado un aumento de la estabilidad estructural del mismo, muchos autores lo atribuyen a la condensación de sustancias hidrófobas en

agregados (Fox et al., 2007; Terefe et al., 2008). También se han encontrado correlaciones positivas entre ambos parámetros por diferentes autores (Varela et al., 2007; Arcenegui et al., 2008), y en suelos con características diferentes (García-Corona et al., 2004; Mataix-Solera et al., 2004).

Por otro lado, la materia orgánica del suelo tiene un gran valor por su importante influencia sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas de éste. La materia orgánica representa un indicador muy importante de la calidad del suelo, tanto para la agricultura (Producción y economía) como para el medio ambiente (secuestro de Carbono, calidad del aire, del agua,...). El contenido en materia orgánica es un parámetro relacionado directamente con la calidad edáfica: interviene en la estructura del horizonte, ayuda a formar complejos arcillo-húmicos del suelo, mejora la capacidad de infiltración del agua en suelos arcillosos, aumenta la capacidad de retención de agua en los suelos arenosos y determina la disponibilidad de nutrientes, influyendo positivamente en la productividad del suelo. Sin embargo, la materia orgánica se puede ver modificada, cualitativa y cuantitativamente por el manejo del suelo, la mineralización o las quemas. En referencia a este último apartado, el fuego afecta a la materia orgánica, y diversas propiedades relacionadas, a través del incremento de la temperatura y la deposición de cenizas (De la Rosa et al., 2012).

El suelo es el mayor reservorio de carbono de la Tierra, siendo el 70% del total carbono orgánico y el resto de carbonatos (Batjes, 1996). Durante la descomposición de la materia orgánica no humificada (restos de plantas, animales y microorganismos, en el suelo una proporción variable de Carbono orgánico (60-80%) se revierte a la atmósfera en forma de CO<sub>2</sub>. Se trata de un proceso de mineralización rápida que suele tener lugar durante el primer año. El restante, que no se mineraliza, sufre procesos más lentos de oxidación y después de trasformaciones complejas, o bien se convierte en biomasa microbiana o se estabiliza en forma de sustancias húmicas. Este último proceso, conocido como humificación, implica cambios severos en la complejidad estequiométrica y química de los materiales macromoleculares originales que conforman nuevas sustancias

químicas, con mayor resistencia a la biodegradación y mineralización (Tate, 1987). Estos cambios no son solo una consecuencia de la actividad microbiana, sino de las transformaciones abióticas inducidas por factores físicos externos o fisico-químicos, incluyendo el fuego (Hatcher et al., 1988; González-Pérez et al., 2004).

En definitiva, sabemos que los cambios en las propiedades físicas y químicas del suelo están influenciados por diferentes factores. En la actualidad se desconoce el alcance exacto de cada uno de ellos, de tal forma que el estudio de nuevos casos se hace fundamental para conseguir comprender los efectos del fuego sobre los suelos.

### **1.3. Contextualización:**

Han sido muchos los trabajos realizados desde la EPSH sobre el tema de suelos afectados por incendios. Una revisión reciente puede consultarse en Badía et al (2011). En dichos trabajos se muestra como se modifican diversas propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo tras quemadas controladas de temperaturas crecientes (Badía y Martí, 2003<sup>a</sup> y 2003<sup>b</sup>) o como aumenta la erosión del suelo postincendio mediante el uso de simuladores de lluvia (Badía y Martí, 2008; Badía et al., 2008). Sin embargo, se mantiene la duda de hasta qué profundidad se ven afectadas algunas propiedades clave como la hidrofobicidad, la estabilidad estructural o la cantidad y calidad de la materia orgánica.

## OBJETIVOS

## 2. OBJETIVOS:

Con este proyecto se pretende estudiar cómo se ven afectadas diversas propiedades de un suelo forestal yesoso, característico del Valle Medio del Ebro, sometido a la quema en condiciones controladas. En concreto:

1. Se evaluará la influencia del fuego sobre la repelencia del suelo al agua, la estabilidad estructural, la materia orgánica (cantidad), la densidad aparente y el color.
2. Paralelamente se pretende analizar hasta qué profundidad se ven afectados estos parámetros ante una quema moderada en condiciones de laboratorio.

## METODOLOGÍA

### 3. METODOLOGÍA:

#### 3.2. Localización del área de estudio:

Los suelos fueron muestreados en el término municipal de Remolinos, cerca de la ciudad de Zaragoza, situado en los montes de Zuera, acoge un grado inusual de la biodiversidad para ser una región semiárida, y se clasifica como un lugar de interés natural europeo (Gracia, 2005).

La cuenca del Ebro (NE-España) tiene un clima mediterráneo semiárido, con una precipitación media anual de alrededor de 450 mm/año y una temperatura media anual de 13 °C. La evapotranspiración media anual de referencia es de unos 1200 mm y se ve reforzada por los patrones de viento. Teniendo en cuenta estos factores, el déficit de agua para esta zona es una de las más altas de Europa. El régimen de humedad del suelo se sitúa en el límite del xérico y arídico, dependiendo de si la reserva de humedad excede o no los 50 mm/perfil (Jarauta, 1989).

Estos suelos han sido muestreados con anterioridad, en concreto en dos zonas diferentes situadas en las estribaciones del LIC denominado Montes de Zuera, Castejón de Valdejasa y El Castellar (en adelante, Montes de Zuera). A pesar de su reconocida importancia ecológica, los suelos de esta zona nunca han sido estudiados.

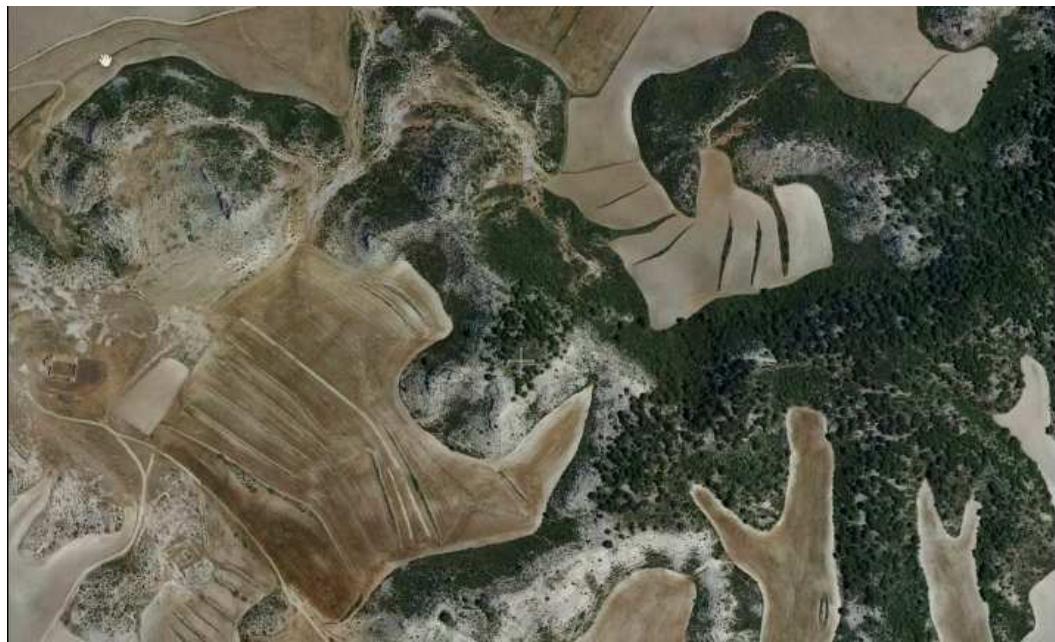


Figura 1: Localización de la zona de extracción de los monolitos o bloques inalterados de suelos (t.m. Remolinos). Fuente: [www.sigpac.es](http://www.sigpac.es)

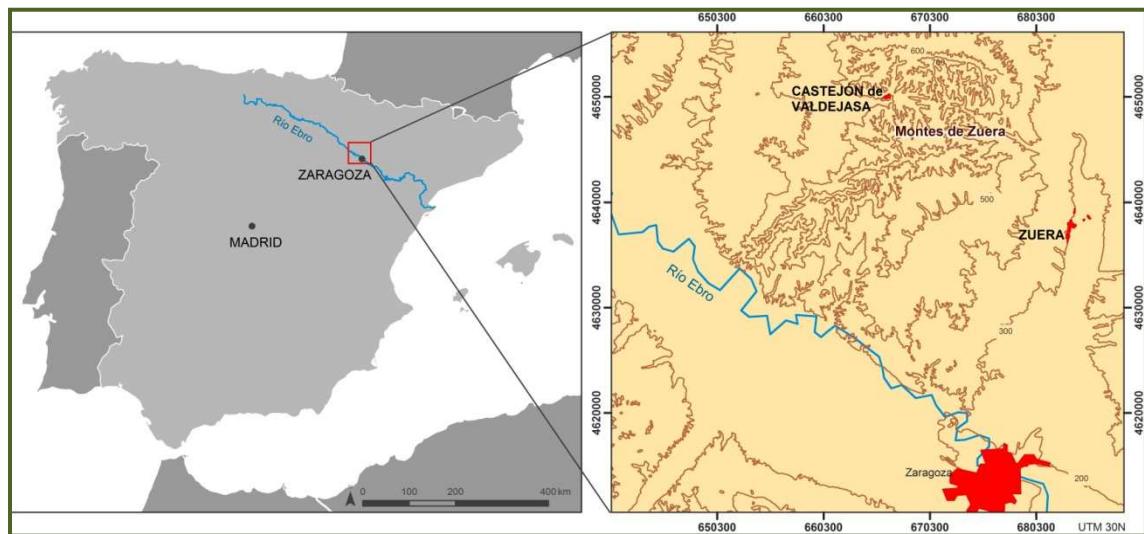


Figura 2: Mapa de España y emplazamiento de la zona de estudio donde se realizó el muestreo. Fuente: Badía et al., 2011.

Estos montes están cubiertos, en sus laderas norte, de pino carrasco (*Pinus halepensis*) con sotobosque de albada (*Gypsophilastruthium subsp. hispanica*),

asnallo (*Ononis tridentatae*) y coscoja (*Quercus coccifera*). Estas especies, ricas en esencias y con bajo contenido de agua, facilitan la combustión de estos ecosistemas en época estival (Aznar et al., 2012)

Se recogieron seis bloques inalterados de un suelo yesoso (*Gipsisol hipergípsico*) de la capa más superficial del suelo, cuyas características se describen en la siguiente tabla (*Tabla 1*).

---

### Factores de formación

---

Comunidad vegetal	Pinar
Régimen de humedad del suelo	Xérico
Régimen de temperatura del suelo	Mésico
Material parental	Yeso
Localización, municipio	Tauste
UTM 30T (X-Y)	661982 – 4646188
Altitud (msnm)	493

---

### Propiedades del horizonte Ah

---

Materia Orgánica (%)	6,0
pH (1:2.5)	8,0
Carbonatos equivalentes (%)	21,1
Yeso equivalente (%)	35,8
Estabilidad estructural (%)	95,0
Elementos gruesos (%)	6,2
<i>USDA clase textural<sup>a</sup></i>	<i>Franca (49,36,15)</i>

---

<sup>a</sup> El porcentaje de cada fracción aparece respectivamente entre paréntesis: arena, 2-0.05 mm; limo, 0.05-0.002 mm; arcilla, <0.002 mm.

*Tabla 1. Factores de formación y propiedades del horizonte Ah.*

Los suelos se han muestreado con la ayuda de una pala plana, extrayéndose bloques de 20x20x20cm y de características edáficas similares para poder comparar los resultados.

El principal objetivo al extraer los bloques de suelo, es mantener intacta su estructura. Aunque su cobertura vegetal es retirada en el proceso de quemado manteniéndose intactos los horizontes O y Ah. Una vez en el laboratorio, se han envuelto en papel y se han secado al aire para eliminar los efectos potenciales de la variación de humedad (Doerr, 2002). De los bloques obtenidos, tres han sido sometidos a una quema controlada y los otros tres han permanecido inalterados; en ellos se analizaron las diferentes propiedades en cuatro profundidades distintas: horizonte O y primer, segundo y tercer centímetro del horizonte Ah.



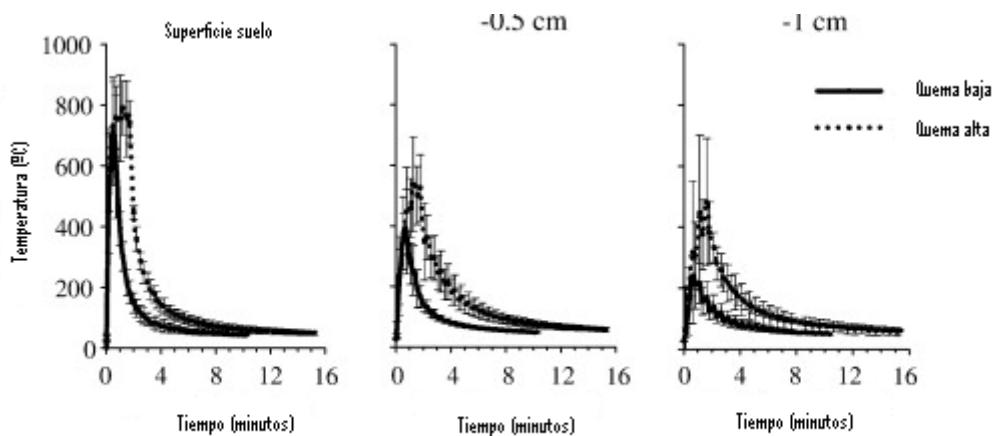
Fotografía 1: Caracterización de bloque de suelo en laboratorio. (Beatriz Arjona)

### 3.3. Quema de los suelos:

La quema consistió en la aplicación de una llama en la parte superior de cada bloque hasta que se alcanzó una temperatura de 250°C en el primer centímetro del horizonte Ah. Esta temperatura simula un incendio de intensidad moderada y ha sido frecuentemente usada por diversos autores (Doerr et al., 2004; García-Corona

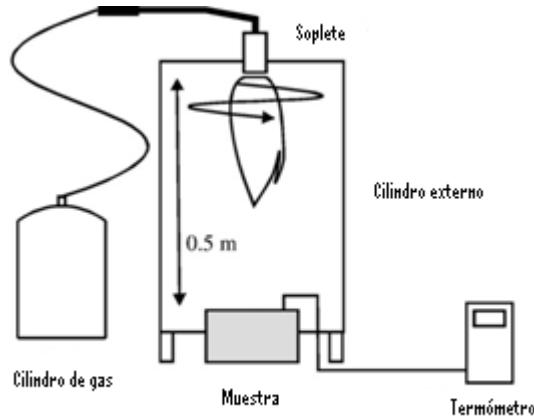
et al., 2004; Josa et al., 1994; Guerrero et al., 2001; Giovannini et al., 1988; Josa et al., 1994; Soto et al., 1991).

En este experimento se han sometido los diferentes bloques a una quema controlada mediante el uso de un soplete, siguiendo la metodología de Llovet et al (2009). En el estudio de Llovet et al. (2008) se registraron temperaturas de aproximadamente 200°C en el primer centímetro de suelo en la quema de baja intensidad, pero el tiempo durante el cual se mantuvo esta temperatura fue de tan sólo 100 segundos.



*Figura 3: Temperaturas registradas en monolitos de suelos bajo quema controlada (valores medios y las desviaciones estándar) por Llovet et al. (2008).*

El objetivo era simular un incendio de intensidad media. Para ello, se ha aplicado una llama gracias a un soplete hasta alcanzar 250°C a 1 cm de profundidad en el horizonte Ah. (Chandler et al., 1983) El tiempo de exposición al fuego ha sido el necesario hasta alcanzar la temperatura correspondiente. Esta parte del experimento se ha realizado en el invernadero de la E.P.S.H. El instrumental que se ha usado fue el mismo que se indica en la figura 3.



*Figura 4: Esquema del equipo utilizado para el tratamiento de la quema. Fuente: Llovet et al, 2008.*

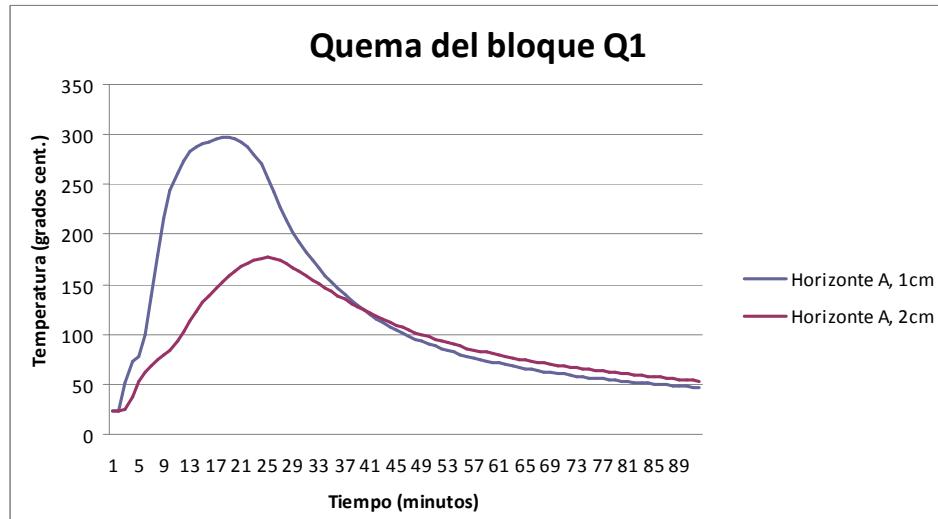
La bombona suministró butano, por un tubo el gas llegó al soplete. La quema se produjo gracias a una boquilla que apuntó directamente al bloque de suelo, éste se encontraba a unos 0,5 m. bajo la boca del soplete. El soplete estaba sujeto a una vara de hierro que se clavó en el suelo para que sirviera de sujeción del soplete. En la muestra se pincharon los termopares, a diferentes profundidades uno del otro, pero ocupando el mismo espacio en la muestra, que es exactamente la superficie del suelo donde va a dar de lleno la llama. Obteniendo así mayor fiabilidad de los resultados. Se aplicó fuego con un soplete (10 cm de diámetro) a una altura de 0,5 metros por encima de cada uno de los tres bloques quemados. Las temperaturas se registraron a 1 cm y a 2 cm de profundidad (en el horizonte Ah) con el Picotech TC-08, tratando los resultados con el programa PicoLog R5.21.9. (Termopar). La quema se paró al llegar a los 250 °C de profundidad a 1 cm.



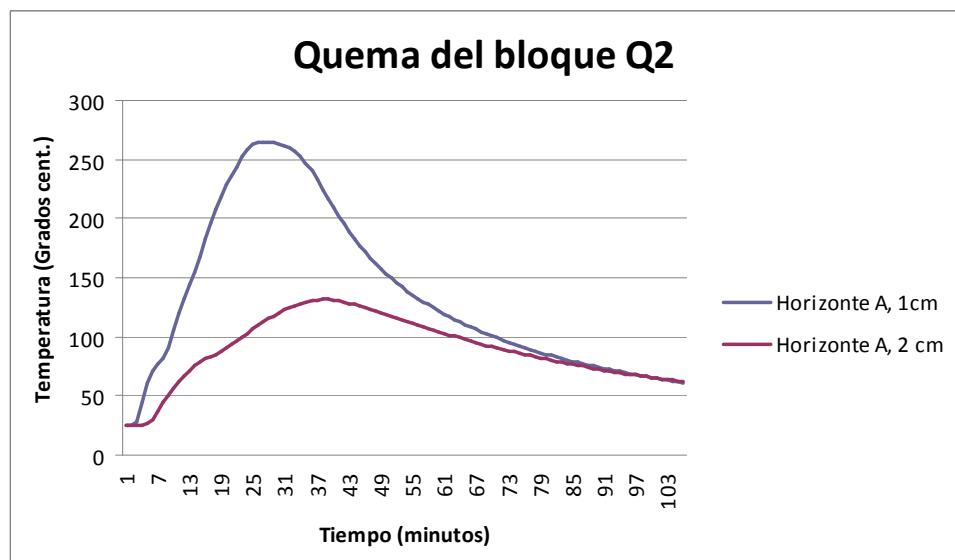
*Fotografía 2: Imagen de una muestra de suelo que ha sido quemada (Foto: Javier Martínez Aznar).*

Las tres muestras fueron sometidas así a la misma intensidad del fuego. El fuego afecta directamente a la superficie, quemando la materia orgánica que se conserva en el bloque, que puede seguir ardiendo una vez apagado el soplete.

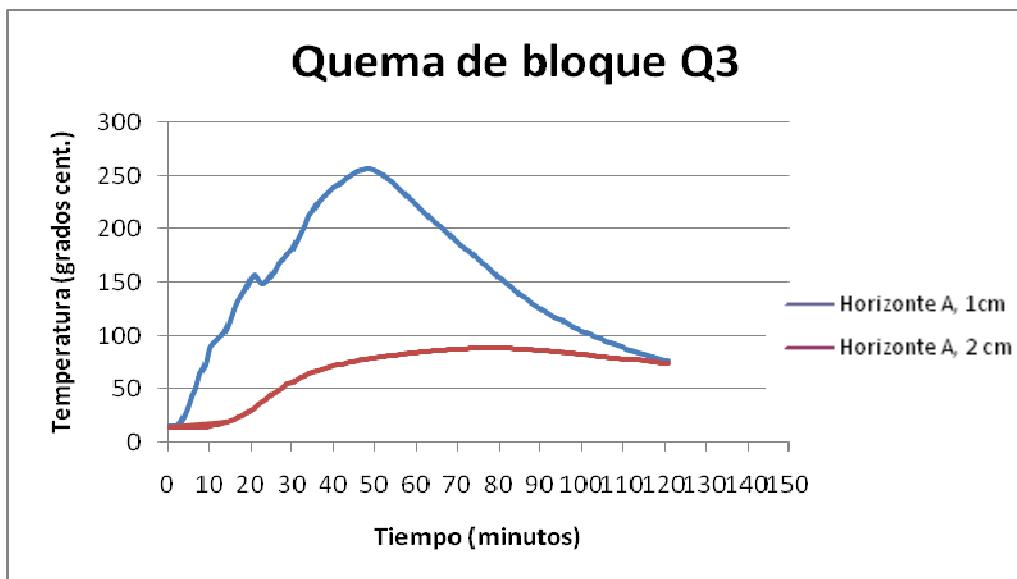
A continuación, se exponen las tres gráficas que corresponden a las temperaturas alcanzadas en las tres profundidades de estudio de los tres bloques sometidos a quema controlada.



*Gráfico 4: Temperaturas registradas a 1 y 2 cm de profundidad en la quema del bloque uno.*



Gráfica 5: Temperaturas registradas a 1 y 2 cm de profundidad en la quema del bloque dos.



Gráfica 6: Temperaturas registradas a 1 y 2 cm de profundidad en la quema del bloque tres.

Cuando se apaga la llama (250°C a 1cm Ah), la temperatura cae según lo esperado, ya que conforme va desapareciendo la materia orgánica del horizonte O,

este termopar está más expuesto al contacto casi directo al fuego, por ello al interrumpirse la llama, la temperatura desciende bruscamente.

A la profundidad de 1 cm del horizonte A, las temperaturas de 250°C se superaban en:

-Bloque 1, a los 14 minutos (261,44°C)

-Bloque 2, a los 26 minutos (252,23°C)

-Bloque 3, a los 50 minutos (252,12°C)

El suelo es un mal conductor del calor por ello a 2 cm del horizonte Ah, el efecto del fuego sobre la temperatura alcanzada es mucho menor. Los rangos máximos y mínimos de temperaturas son muy suaves en comparación con las dos anteriores profundidades. Esto se observa en las gráficas donde esta profundidad da temperaturas máximas entre 80 y 170°C. Se observa que los máximos de temperatura se alcanzan varios minutos después de que se hayan alcanzado las máximas en la profundidad anterior.

Una vez quemados todos los bloques, se llevaron las muestras al laboratorio iniciándose su análisis una vez hubo disminuido. Ha sido importante dejarlos enfriar, puesto que a estas temperaturas, aún podían llevarse a cabo efectos en la estructura molecular de las partículas que lo forman.

#### **3.4. Descripción de métodos:**

Se han determinado una serie de propiedades tanto en los bloques control como en los bloques quemados:

##### **3.3.1. Color**

La determinación de color se realiza con la carta de colores Munsell (Figura 6) que permite clasificar el suelo en función de tres componentes:

- Matiz, color espectral dominante (R: rojo; Y: amarillo; YR: naranja).
- Brillo: Luminosidad, variación en tintes. (Negro: 0; blanco puro: 10).
- Chroma: Saturación, fuerza del color espectral. (Colores neutros: 0; colores fluorescentes: 30)

Para llevar a cabo la medida del color de las diferentes muestras deben estar completamente secas, para ello se ha extendido la tierra sobre papeles no satinados y se ha dejado secar unos cuantos días hasta que se logró un equilibrio entre su humedad y la del ambiente (secado al aire). A continuación se ha tamizado a 2mm de malla, para separar la tierra fina de los elementos gruesos (piedras, gravas, restos de raíces, etc.). Para deshacer los terrones u agregados se ha usado un rodillo de madera que los ha disgregado sin romper los elementos gruesos de la muestra del suelo. Para la conservación de estas muestras, se ha guardado la tierra fina (Diámetro < 2 mm) bien homogeneizada y seca en una bolsa de papel resistente con una etiqueta que la identificase claramente. Bajo estas condiciones la mayor parte de parámetros físico-químicos se mantienen constantes durante largo tiempo. La medida de color se ha hecho en seco, después de todo este proceso y a continuación, en húmedo con la ayuda de una pipeta Pasteur.



Figura 5. Tablas Munsell. Fuente: edafologia.ugr.es

### **3.3.2. Hidrofobicidad o repelencia al agua del suelo:**

Se quiere determinar la influencia de la quema controlada controlada en el grado de hidrofobicidad del suelo. La repelencia al agua tiene importantes consecuencias hidrológicas y geomorfológicas. La solución cuya gota se infiltra dentro de los primeros 3 segundos tras su aplicación tiene una tensión superficial menor a la del suelo (Letey et al., 2000). Este intervalo de tiempo se ha escogido según los criterios de Crockford et al. (1991) y Doerr (1998).

Para ello, se ha utilizado el test de Intensidad de la repelencia. El test EP usa el conocimiento de la tensión superficial de las soluciones estandarizadas de etanol en agua. Se han aplicado en el suelo gotas de estas soluciones y se ha observado su infiltración de forma instantánea o temporal (Watson y Letey, 1971). La gota con mayor tensión superficial que el suelo permanecerá sobre éste por algún tiempo, mientras que la que tenga menor tensión superficial que el suelo infiltrará instantáneamente. Así pues, se han aplicando gotas con tensiones superficiales incrementadas (disminuyendo la concentración de etanol) hasta que la gota ha resistido la infiltración, ha permitido así la clasificación del suelo dentro de una categoría de tensión superficial entre dos concentraciones de etanol. En este análisis, se han aplicado, con una pipeta, distintas soluciones concentraciones de etanol: 0, 3, 5, 8.5, 13, 24 y 36% en volumen (Doerr, 1998). Hay que destacar que los datos del 0%, que corresponde a agua destilada, se tratan de los mismos resultados que el test WDPT. Este test consiste en colocar una gota en la superficie del suelo y determinar el tiempo empleado hasta su completa penetración (Letey, 1969).

Se han calculado los tiempos de infiltración de cada gota y se han hecho las medias y desviaciones típicas para las diferentes réplicas en cada uno de los experimentos.

Las muestras del suelo se han puesto sobre un vidrio de reloj o placa de Petri, se ha aplicado etanol en creciente concentración sobre la superficie del suelo

mediante una jeringa o micropipeta dejándolas caer desde menos de 1.5 cm de altura por las razones ya explicadas. Estos resultados pueden verse afectados por la temperatura u el contenido inicial de agua en el suelo, por lo que es recomendable que estas determinaciones se realicen con el suelo seco para obtener medidas más estandarizadas.

El aumento en la concentración de etanol incide directamente en la disminución de la tensión superficial, de la manera siguiente ya tabulada por Mataix-Solera y Jordán (2009):

Intensidad de repelencia	%etanol	MED( Mol/l)	y (N.m <sup>-1</sup> .10 <sup>-3</sup> )
<b>Muy hidrofílico</b>	0	0	72.1
<b>Hidrofílico</b>	5	0.85	56.6
<b>Ligeramente hidrofílico</b>	8.5	1.45	51.2
<b>Moderadamente hidrofílico</b>	13	2.22	46.3
<b>Fuertemente hidrofóbico</b>	18	3.07	42.3
<b>Muy fuertemente hidrofóbico</b>	24	4.09	38.6
<b>Extremadamente hidrofóbico</b>	36	6.14	33.1

Tabla 2: Concentración de etanol e intensidad de la repelencia

### 3.3.3. Densidad aparente:

Este dato se obtiene mediante la relación entre la masa y el volumen de una materia inalterada de un suelo. Para ello se ha decapado el suelo centímetro a centímetro y se ha dividido por el volumen que ocupaba. Finalmente se ha calculado la densidad aparente en g cm<sup>-3</sup>, gracias a la siguiente fórmula.

$$Da = P/V.$$

V= volumen cilindro

P= Peso (Kg).

### **3.3.4. Estabilidad estructural:**

El método que se ha seleccionado fue el propuesto por Kemper y Koch (1996) y cuyo protocolo se actualiza en Schinner et al., 1996. Se valora la estabilidad estructural de los agregados al someterlos a la acción de fuerzas mecánicas por tamizado en medio húmedo. Se considera que este tratamiento simula las fuerzas de fraccionamiento que son ejercidas sobre el suelo por las aguas de escorrentía o cuando se encuentra en condiciones de inmersión.

Una vez que se han recogido las muestras de suelo se han trasladado al laboratorio evitando la compresión de las mismas ya que puede causar alguna variación en la estabilidad de los agregados (Murer et al., 1993); para ello, se han cogido con el suelo seco y se han tratado en recipientes que impidan su compresión. Las muestras, secas al aire y tamizadas a 2mm. se han pasado por un tamiz de 1 mm de luz, para poder trabajar con agregados comprendidos entre 1 y 2 mm. El uso de un solo rango de agregados se justifica por el menor tiempo consumido en la aplicación del método y por la existencia de una buena correlación entre los resultados obtenidos con agregados de este tamaño y de mayores tamaños. Por último, se recomienda dejar las muestras almacenadas durante poco tiempo (no más de tres semanas) para evitar la modificación de la estabilidad estructural.

El material que se usó para este análisis fue:

- Tamizador: Consta de un recipiente con un motor monofásico, excéntrica de nylon, mecanismo de balanceo y tapa con seis orificios para la introducción de los tamices. La velocidad de rotación de la excéntrica es de 46 rpm con la cual la frecuencia de 46 inversiones por minuto dando un recorrido a los tamices de 12,7 mm.
- Cubetas: Seis cubetas de acero inoxidable, unidas en grupos de tres.
- Tamices: Seis tamices de 38 mm de diámetro y 0,25 mm de luz de malla, en los que se coloca la muestra para realizar el tamizado en húmedo.
- Vasitos o platitos de aluminio.

- Reactivo: Difosfatotetrasódico.

Para la determinación de la estabilidad estructural se ha partido de agregados secos al aire con un tamaño comprendido entre 1-2 mm. Estos agregados se han sometido a una agitación y tamizado en húmedo con agua destilada en el tamizador automático. Después de realizar todo el proceso sólo debe quedar en el tamiz la fracción de arena mayor de 0,25mm. Se han realizado dos réplicas por muestra, aprovechando así las seis cubetas que tiene el aparato.

Se han pesado 4 g de agregados secos al aire, y se han colocado en uno de los recipientes del tamizador. Se han añadido 80 ml de agua destilada en cada cubeta a una temperatura de entre 22-25 °C y se ha tapado la máquina. A continuación, se han colocado los tamices en los orificios del tape de la máquina y se ha encendido el motor durante aproximadamente 5 minutos. Pasado ese tiempo, se ha lavado los agregados que han quedado en el tamiz con agua destilada y se han trasvasado a los recipientes o vasos metálicos. Es importante tener tarados los recipientes (M1), dejar que se sequen hasta que alcancen un peso estable (aproximadamente 24 horas a 50°C ya que se trata de suelos yesosos) y después se volvió a pesar (M2).

Después de enfriarse las muestras, los agregados que aún quedaban estables se han disuelto con 50 ml de difosfatotetrasódico durante 2h. Al cabo de este tiempo se ha pasado el contenido del recipiente a través de un tamiz y si algún agregado ha parecido estable se ha roto con una varilla de goma deformable. Se ha continuado lavando hasta que en el tamiz sólo ha quedado partículas de arena mayores de 0,25mm. Se han lavado las partículas de arena con agua destilada pasándolas a un recipiente metálico y se han secado hasta alcanzar un peso estable (M3), a una temperatura de 105 °C. Para el cálculo de la estabilidad estructural se ha seguido la siguiente fórmula:

$$\%SAS = (M2 - M3) / (W - (M3 - M1)) \times 100$$

W= Peso inicial de suelo (4 g).

M1= Tara del recipiente g.

M2= Tara del recipiente más peso de los agregados estables y de arena.

M3= tara del recipiente más masa de arena g.

M2-M3= Masa de los agregados estables.

M3-M1= masa de arena g

Para el cálculo de la estabilidad estructural hay que tener en cuenta una serie de observaciones ya que por ejemplo, es importante que la temperatura del agua para el tamizado en húmedo esté comprendida entre 20 y 30 °C, ya que se ha observado que la estabilidad estructural decrece cuando la temperatura del agua usada está fuera de dicho intervalo (Kemper y Rosenau 1986).

Durante el tiempo que dura la aplicación del método hay que intentar que todos los agregados estén cubiertos por agua. Si no es así habrá que intentar sumergirlo con gotas de agua usando un pulverizador (Kandeler y Murer, 1993).

La estabilidad estructural aumenta tal y como transcurre el tiempo de almacenaje de la muestra del suelo, se recomienda no superar las tres semanas entre el muestreo del suelo, secado, tamizado y análisis con el fin de que las determinaciones sean comparables (Kemper y Koch 1996; Murer et al 1993).

En este caso al tratarse de suelos yesoso las muestras no deben superar la temperatura menor o igual a 50°C para eliminar la humedad de la muestra pero no el agua de constitución del yeso. Además cada litro de agua destilada disolveremos 2,6 g de sulfato cálcico dihidratado para evitar que se disuelva el yeso, ya que la solubilidad es de ese orden a 25°C.

Por último, conviene dejar sedimentar las muestras para poder sacar el máximo de agua de las mismas y así traspasarlas al a estufa con el mínimo líquido; en caso contrario se trata más en secar y se corre el riesgo de condensar agua en exceso en la estufa.

La interpretación de resultados sería la siguiente:

%SAS	Estabilidad
100-80	Agregados muy estables
80-60	Agregados estables
60-40	Agregados moderadamente estables
40-20	Agregados poco estables
20-0	Agregados muy poco estables

*Tabla 3: Estabilidad estructural*

### **3.3.5. Materia orgánica:**

El análisis se llevó a cabo en el Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología (IRNA-CSIC) en Sevilla. Se llevó a cabo el Análisis Carbono total TOC, mediante oxidación catalítica por combustión con detector de infrarrojos no dispersivo. Con este proceso se ha obtenido la cantidad de carbono total (TC), carbono inorgánico (IC) y carbono orgánico total. El material utilizado ha sido un Analizador de Carbono Total marca Shimadzumod TOC-V chs.

La medida de la cantidad de materia orgánica se puede establecer directamente a través del Carbono Orgánico Total (TOC). El método para determinar el TOC en suelos se basa en una oxidación catalítica a 900°C. Como producto de la combustión es el carbono (orgánico e inorgánico) que se oxida a CO<sub>2</sub>. Este dióxido de carbono se introduce en una corriente de aire y se mide mediante un detector de infrarrojos no dispersivo (NDIR). De esta forma se calcula el TC. El IC, que contempla básicamente dióxido de carbono disuelto, carbonatos y bicarbonatos, se obtiene mediante la acidificación de la muestra con ácido fosfórico, proceso en el que se forma CO<sub>2</sub> y el cual es analizado por el NDRI. EL TOC se puede establecer por diferencia de los anteriores (TC-IC).

### **3.3.6. Carbono pirolizado:**

La pirolisis se realizó en ausencia de oxígeno con un pirolizador de microhorno. Se peso 0,005mg de muestra de suelo en una cápsula de platino que se introdujo en el microhorno calentándose a 500ºC durante 30seg. El horno del GC se programó a 50ºC, aumentándose hasta 300ºC a la velocidad de 10ºC min<sup>-1</sup>.

### **3.4. Análisis estadístico:**

El diseño experimental incluye tres repeticiones por tratamiento: bloques quemados y no quemados. Todas las variables se han trasformado para cumplir los criterios de normalidad y supuestos para el análisis estadístico paramétrico.

Para llevar a cabo el correspondiente análisis, se han tratado todos los datos estadísticamente con el programa SPSS Statistics 17.0.

En este caso, la hipótesis nula traducirá la idea de que en los diferentes grupos se obtienen resultados similares y la hipótesis alternativa lo negará. Queremos demostrar que la hipótesis nula es falsa y que por lo tanto el efecto del fuego tiene influencia en las diferentes propiedades estudiadas, así como hasta que profundidad puede tener efecto.

Existen dos tipos de técnicas:

- Paramétricas: Cuando suponemos que la distribución de los datos de cada muestra tienen cierta distribución en particular. Realizando para su análisis el test ANOVA.
- No paramétricas: No es necesario suponer nada para la distribución de los datos. Usando la prueba Kruskal-Wallis.

En este caso usaremos las técnicas paramétricas, para usarse el modelo ANOVA, debe poder suponerse que son válidas una serie de condiciones:

- La variabilidad de todas las muestras debe ser similar.
- Las muestras deben tener una distribución aproximadamente normal.

- Los tamaños de las muestras no deben ser muy dispares.

Dándose estas condiciones, el modelo ANOVA traduce la hipótesis nula de que en todos los grupos se obtienen valores similares de las variables por una condición equivalente; que las medias entre los diferentes grupos son iguales.

La separación demedias se ha realizado de acuerdo a la honestidad de Tukey prueba de diferencias significativas a un nivel alfa de 0,05 para todo los parámetros estudiados. Antes de ANOVA, las variables se ensayaron para determinarla normalidad con la prueba de Shapiro-wilks y el test de Levene, para comparar varianzas. En todos los casos en los que el valor P fue inferior a 0,05 se transformaron para mejorar la normalidad y homoestaticidad

A su vez, también se aplico el test de Tukey, para examinar las posibles diferencias que puede haber entre las medias muestrales de los diferentes grados de profundidad.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN:

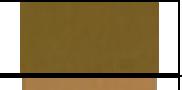
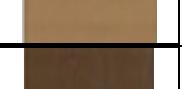
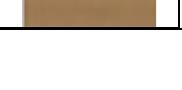
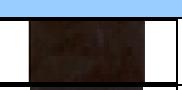
Los resultados obtenidos han sido los siguientes:

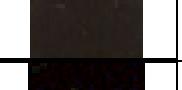
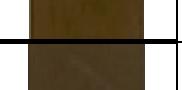
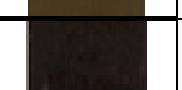
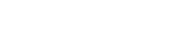
### 4.1. Color:

Probablemente es el color el cambio más apreciable de manera inmediata, este cambio se puede deber a la acumulación de cenizas, al enrojecimiento que se produce cuando el suelo contiene óxidos de hierro o a la desaparición de la materia orgánica.

El efecto del fuego es aparente sólo por encima de los 2cm del perfil del suelo. Por debajo de esta profundidad no se aprecian diferencias entre bloques quemados y control, viéndose cómo se oscurecen mucho más los suelos hasta esta profundidad.

		SECO				
Horizonte O	1	10YR	3	3		
	2	10YR	3	1		
	Q1	10YR	2	1		
	Q2	10YR	2	1		
	1	10YR	5	3		
Horizonte Ah 1cm	2	2,5Y	6	3		
	3	2,5Y	5	3		
	Q1	10YR	2	2		
	Q2	2,5Y	3	1		
	Q3	10YR	3	1		

<b>Horizonte Ah 2cm</b>	1	2,5,Y	5	4			
	2	10YR	6	4			
	3	10YR	5	4			
	Q1	10YR	5	3			
	Q2	10YR	6	3			
	Q3	10YR	4	2			
<b>Horizonte Ah 3cm</b>	1	10YR	5	3			
	2	10YR	5	6			
	3	10YR	6	3			
	Q1	10YR	5	3			
	Q2	10YR	6	3			
	Q3	10YR	6	3			

		HUMEDO					
<b>Horizonte 0</b>	1	10YR	2	2			
	2	10YR	3	1			
	Q1	10YR	2	1			
	Q2	10YR	2	1			
	1	10YR	4	3			
<b>Horizonte Ah 1cm</b>	2	2,5Y	4	3			
	3	2,5Y	4	2			
	Q1	10YR	2	1			
	Q2	2,5Y	3	1			
	Q3	10YR	2	1			

<b>Horizonte Ah 2cm</b>	1	2,5Y	3	3			
	2	10YR	3	3			
	3	10YR	3	4			
	Q1	10YR	3	2			
	Q2	10YR	4	3			
	Q3	10YR	2	2			
<b>Horizonte Ah 3cm</b>	1	10YR	3	4			
	2	10YR	4	4			
	3	10YR	4	3			
	Q1	10YR	3	4			
	Q2	10YR	4	3			
	Q3	10YR	4	3			

Tabla 4: Resultados obtenidos del color del suelo

En los primeros centímetros, si que se aprecian cambios entre las muestras quemadas y no quemadas. Siendo las muestras quemadas más oscuras. Sin embargo, estos cambios no son tan significativos como los que pueden observarse en otro tipo de suelos como es el caso de los suelos calizos con un horizonte grueso (30 cm o más) donde el color es más oscuro, en comparación con los suelos yesosos (Badia et al., 2013).

Se entiende por ceniza al residuo producido por el fuego, se trata de los residuos orgánicos e inorgánicos. Su formación es debida a la oxidación de la materia orgánica. Hay que tener en cuenta que el material producido por el calentamiento a baja temperatura no se considera ceniza ya que sólo se produce la evaporación del agua de hojas o de madera, sin haber ningún proceso de combustión, solamente secado (Bento-Gonçalvez et al., 2012).

El color de la ceniza es un estimador indirecto de los efectos del fuego en el consumo de materia orgánica. Colores marrón y rojizo representan una baja severidad del fuego, en cambio un color gris oscuro o blanco ceniza indica que la severidad del fuego alta (Úbeda et al., 2009 ).

Cuando se compara el color de la ceniza producida después de un incendio en condiciones de laboratorio, se tiene la ventaja de que es posible saber la temperatura alcanzada y el tiempo de combustión (Bento-Gonçalvez et al., 2012) Además el color del suelo se puede utilizar para cuantificar el carbono orgánico del mismo teniendo en cuenta que las técnicas convencionales para ello son caras, consumen mucho tiempo y en ocasiones son imprecisas ( McCauley et al.,1993). Hay una serie de estudios que informan sobre las relaciones que existen entre el color del suelo y Carbono orgánico del suelo. Por ejemplo, Franzmeier (1988) indica que existe una relación débil entre el valor Munsell en húmedo y el carbono orgánico del suelo (Viscarra et al., 2006).

#### 4.2. Hidrofobicidad:

Se ha constatado que el suelo presenta en superficie una “muy fuerte hidrofobicidad” (Clase 6), rebajándose a “ligeramente hidrofóbica” en el primer centímetro del Ah y desapareciendo la hidrofobicidad a los 2 cm (Tabla 5). La quema produce una pérdida de la repelencia al agua del suelo, aunque solo es significativa esa diferencia en el horizonte O.

Repelencia (Clase)	Control	Quemado	P
<b>Horizonte O</b>	6,33+0,33a	1,33+0,33a	< 0.001
<b>Ah 0-1cm</b>	3+0,58b	1+0a	0.260
<b>Ah 1-2cm</b>	2 +0,58bc	1+0a	0.158
<b>Ah 2-3cm</b>	1+0c	1+0a	-

*Tabla 5: Efecto del fuego en la repelencia del suelo al agua a diferentes profundidades .El valor p, indica las diferencias debidas al fuego para cada profundidad. Las diferentes letras de cada columna indican diferencias significativas entre las profundidades (Test Tukey).*

La pérdida de hidrofobia ha sido constatada por otros autores a temperaturas similares, siempre por encima de los 225 °C, y se relaciona con la degradación selectiva de los compuestos hidrofóbicos (Cerdá y Doerr, 2005), principalmente estructuras alifáticas (Simkovic et al., 2008).

En estado normal el suelo contiene sustancias hidrofóbicas como: hidrocarburos, lixiviados de los horizonte orgánicos (Doerr et al., 2000; Horne y McIntosh, 2000). La concentración de estas sustancias hidrófobas depende de la vegetación y de las características del suelo, pero generalmente se encuentran bajas o nulas concentraciones de estas sustancias por debajo de los primeros centímetros del suelo.

El fuego puede inducir repelencia al agua sobre suelos que previamente no la presentaban. Autores como Robichaud y Hungerford (2000) observaron que al someter a diferentes tipos de suelo a calentamiento en laboratorio, los gradientes de temperatura provocan la redistribución de las sustancias hidrofóbicas en el suelo, también observaron que otros factores como la temperatura alcanzada, la cantidad y tipo de hojarasca consumida y la humedad del suelo previa al incendio pueden intensificar o reducir la repelencia al agua en suelos.

Así pues, la repelencia al agua es una propiedad del suelo particularmente afectada por el fuego (Soto et al., 1991). Es importante porque regula los principales procesos hidrológicos del suelo (DeBano, 1991). La repelencia al agua natural del suelo es generalmente más intensa cerca de la superficie, donde la presencia de sustancias orgánicas hidrófobas es más usual. La mayoría de los estudios indican que

el calentamiento de los suelos forestales modifica su humectabilidad, y los cambios en la repelencia al agua están relacionados con las temperaturas alcanzadas. La repelencia al agua inducida por el fuego es causada por la combustión parcial de la materia orgánica. En la superficie del suelo se encuentran sustancias orgánicas que son hidrófobas, con el calor del fuego se volatilizan. Pero hay una proporción variable que, en respuesta del gradiente de temperatura, se mueven hacia abajo hasta condensarse, recubriendo así las partículas minerales del suelo en las capas más frías y profundas (DeBano et al., 1970).

En el mediterráneo, se ha demostrado que la repelencia del suelo al agua es común entre una amplia gama de tipos de suelos y comunidades vegetales, tanto en terreno quemado como sin quemar (Martínez-Zavala et al., 2009).



*Fotografía 3: Gota de agua en la superficie de un agregado de suelo repelente al agua.*

*Autor: David Badía*

EP y Clases de repelencia	Profundidad suelo					
	Horizonte O		Ah 1 cm		Ah 2 cm	
	Control	Quemado	Control	Quemado	Control	Quemado
<b>0%: Muyhidrofilico (1)</b>	0	<b>6</b>	0	<b>9</b>	0	<b>9</b>
<b>5%: Hidrofilico (2)</b>	0	<b>3</b>	0	0	<b>5</b>	0
<b>8.5%: Ligeramentehidrofóbico (3)</b>	0	0	<b>6</b>	0	<b>3</b>	0
<b>13%: Moderadamentehidrofóbico (4)</b>	0	0	<b>3</b>	0	0	0
<b>18%: Fuertementehidrofóbico (5)</b>	0	0	0	0	<b>1</b>	0
<b>24%: Muyfuertementehidrofóbico (6)</b>	<b>5</b>	0	0	0	0	0
<b>36%: Extremadamentehidrofóbico (7)</b>	<b>4</b>	0	0	0	0	0

EP, Porcentaje de etanol.

Tabla 4: Tabla de frecuencias de la hidrofobicidad del agua del suelo.

#### 4.3. Densidad aparente:

La densidad aparente (Da) va en aumento conforme aumenta la profundidad del suelo. El fuego provoca un aumento significativo ( $p<0,05$ ) de la Da en todos los espesores muestreados del horizonte Ah (Tabla 5).

Densidad aparente (Kg/cm <sup>3</sup> )	Control	Quemado	P
<b>Horizonte O</b>	<b>160±27,2c</b>	<b>134±3,3c</b>	<b>0,394</b>
<b>Ah 0-1cm</b>	<b>450±15,28b</b>	<b>550±284,8b</b>	<b>&lt; 0,001</b>
<b>Ah 1-2cm</b>	<b>5666±39,3b</b>	<b>720±34,6b</b>	<b>0,043</b>
<b>Ah 2-3cm</b>	<b>873±5,04a</b>	<b>1140±81,4a</b>	<b>0,050</b>

Tabla 5: Efecto del fuego en la densidad aparente (Kg/cm<sup>3</sup>) a diferentes profundidades. El valor p, indica las diferencias debidas al fuego a diferentes profundidades. Las diferentes letras de cada columna indican diferencias significativas entre las profundidades (Test Tukey).

La densidad aparente del suelo depende de varios factores como la densidad de las partículas del suelo mineral, la cantidad de materia orgánica, la compactación del suelo, las actividades de los animales y la abundancia de raíces de plantas.

A mayores densidades, las porosidades son más bajas lo que tiene gran repercusión en el comportamiento del suelo frente al agua (Mataix-Solera et al., 2011). Las altas temperaturas que se alcanzan en un incendio destruyen la estructura del suelo provocando cambios en la distribución de tamaño de poros en los horizontes superficiales (DeBano et al., 1998). El descenso de macro poros en la superficie del suelo reduce la tasa de infiltración y aumenta la formación de flujo superficial.

La densidad aparente aumenta como resultado del colapso de los agregados orgánico-minerales (Giovannini et al., 1988). Esto puede provocar una disminución en la capacidad de retención de agua del suelo (Boyer y Miller, 1994; Boix-Fayos, 1997) y un aumento de la escorrentía que conduce generalmente a una mayor erosión (Martin et al., 2001). Como consecuencia de la ruptura de los agregados, los sedimentos fácilmente erosionables pueden estar expuestos a la erosión de la superficie después de que se elimine por el fuego la cubierta de vegetación. También Mataix-Solera et al. (2011) señalan como la degradación de la estructura del suelo después de un calor intenso puede conducir a la disminución de la cohesión de los agregados del suelo aumentando la erosión del mismo.

#### 4.4 Estabilidad estructural:

La estabilidad estructural (EE) en el suelo control es elevada y no varía significativamente en profundidad. En el suelo quemado aparecen diferencias significativas ( $p<0.01$ ) en la superficie del horizonte Ah (0-1 cm). El fuego ha provocado un incremento en la EE (Tabla 6).

EE (%)	Control	Quemado	P
<b>Horizonte O</b>	/	/	/
<b>Ah 0-1cm</b>	88,79±0,94a	95,71±0,96a	0,007
<b>Ah 1-2cm</b>	84,92±5,38a	89,54±2,61ab	0,500
<b>Ah 2-3cm</b>	80,99±6,28a	85,5±0,22b	0,510

*Tabla 8: Efecto del fuego en la estabilidad estructural (EE, %) a diferentes profundidades. El valor P indica las diferencias debidas al fuego para cada profundidad. Las diferentes letras de cada columna indican diferencias significativas entre las profundidades (Test Tukey).*

El calor puede producir este aumento en la estabilidad estructural si las temperaturas son suficientes para producir la fusión térmica de las partículas. La recristalización de minerales conduce a la formación de agregados más resistentes y a la condensación de sustancias hidrófobas en los agregados (Mataix-Solera et al., 2011).

Además, este incremento parece deberse a que las arcillas son capaces de fusionar en agregados del tamaño arena, a temperaturas superiores a 170 °C. El fuego deja los agregados más estables que también pueden ser unidos por esos procesos de cementación (Arcenegui et al., 2008).

En este experimento, los datos del % de arena en el primer centímetro son superiores en el caso de las muestras quemadas en comparación con las muestras no quemadas, ocurriendo lo contrario en el segundo centímetro.

	Control			Quemados		
	Bloque 1	Bloque 2	Bloque 3	Bloque Q1	Bloque Q2	Bloque Q3
1Ah	11,69	9,97	9,61	19,32	20,75	20,4
2Ah	11	4,99	9,14	7,43	3,24	8

*Tabla 9: % de arena (0,05-2 milímetros) en cada uno de los bloques en 1 y 2 cm de profundidad.*

Mataix-Solera et al. (2011) sugieren que la quema mejora la estabilidad del suelo en las zonas mediterráneas, además los efectos que tiene el fuego en la estabilidad estructural dependen de su intensidad y se relaciona con propiedades como el contenido de materia orgánica, la microbiología, la repelencia al agua y la mineralogía (Mataix et al., 2004; 2010).

Al igual que en este, en otros estudios, la estabilidad estructural es muy elevada en suelos control (Kemper et al., 1996.) y no varía significativamente en profundidad.

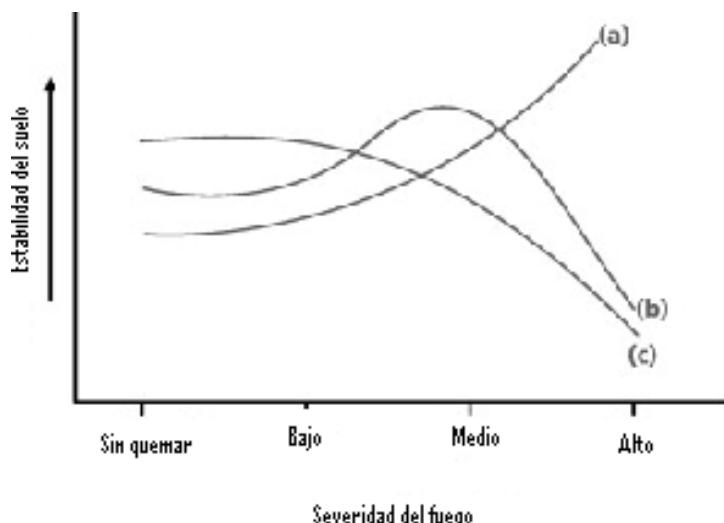
En la literatura, hay discrepancias sobre el efecto del fuego en la estabilidad de los agregados. Hay trabajos en los que se observa una disminución en la estabilidad estructural de los suelos afectados por un incendio intenso o por un calentamiento en el laboratorio (Sanroque et al., 1985, Giovannini et al., 1987; Úbeda et al., 1990). En cambio, en otros trabajos esa EE aumenta a causa de la quema (Giovannini et al., 1976<sup>a</sup>; Giovannini et al., 1976<sup>b</sup>, Ibañez et al., 1983; Díaz-Fierros et al., 1987). Esta variabilidad es debida a las diferentes características de los suelos. En este sentido, Mataix et al. (2011) señalan que, si los estudios no tienen en cuenta otras propiedades del suelo (por ejemplo, materia orgánica del suelo, repelencia al agua, textura) y los factores implicados (la severidad del fuego, por ejemplo), puede surgir una interpretación errónea sobre la respuestas de los agregados del suelo frente al fuego. De la combinación de estos factores, se pueden esperar tres patrones diferentes de la estabilidad estructural (Figura 6).

A diferencia de este trabajo, DeBano et al (1988), observan que la estabilidad de los agregados del suelo se reduce por el fuego, produciendo un suelo más fácilmente erosionable. Sin embargo hay que tener en cuenta la naturaleza pedregosa de algunos suelos propensos a incendios en zonas del mediterráneo ya que su estabilidad estructural no se ve afectada por el calor, debido a las pequeñas proporciones de arcillas en muchos suelos mediterráneos o el tipo de vegetación, que puede también influir en la estabilidad estructural a través de la influencia de la materia orgánica del suelo (Pardini et al., 2006).

Se ha encontrado que los agregados de los suelos mediterráneos, tienen respuestas complejas frente a los incendios. A bajas temperaturas, los agregados se

hacen más resistentes a la humectación mediante la retención de un recubrimiento repelente al agua alrededor de los agregados (Mataix-Solera y Doerr, 2004). Mientras que a mayores temperaturas, se pueden observar diferentes patrones: o bien una disminución de la estabilidad de los agregados que se produce como resultado de la combustión de materia orgánica, o cuando hay un aumento de las temperaturas altas, donde el tamaño de los agregados de arcilla habrían fusionado para producir nuevos agregados (Giovannini, 1994).

Badía y Martí (2003), estudiando el efecto del fuego en los suelos del Valle del Ebro (NE España) a través de quemas controladas en el laboratorio, determinaron que en suelos yesosos (Gipsisoles) y en calizos (Regosoles calcáricos) se redujo la estabilidad estructural a temperaturas de 250°C, en comparación con muestras sin quemar. Esta reducción fue mucho mayor cuando las temperaturas de suelo alcanzaron los 500°C, momento en el que se consumió casi completamente la materia orgánica y el contenido de arcilla se redujo significativamente.



*Figura 5: Tres patrones diferentes de cambios en la estabilidad de los agregados en relación con la gravedad de los incendios: a) un suelo con un alto contenido de arcilla, carbonato de calcio, óxidos de Fe y Al como principales sustancias cementantes, b) suelo con materia orgánica como el agente de unión principal y originalmente hidrofílico o con repelencia al agua bajo, y c) un suelo de arena que es altamente repelente al agua y la materia orgánica tiene como agente ligante principal (Mataix et al., 2011).*

#### 4.5. Carbono orgánico:

Se puede apreciar como el carbono orgánico es significativamente mayor en superficie que en profundidad, en el caso de las muestras control (tabla 7). Esto es habitual puesto que en suelos forestales los aportes de residuos vegetales se dan en superficie. Sin embargo no se observan diferencias significativas entre la superficie y la profundidad en el suelo quemado. Teniendo en cuenta las diferencias entre las muestras control y quemado, son significativas tanto en el horizonte O como en el 1er cm del horizonte Ah ( $p<0,05$ ).

C orgánico (%)	Control	Quemado	P
<b>Horizonte O</b>	$19,83 \pm 1,57$ a	$4,73 \pm 1,32$ a	0,002
<b>Ah 0-1cm</b>	$6,4 \pm 0,61$ b	$3,07 \pm 0,88$ a	0,036
<b>Ah 1-2cm</b>	$4,9 \pm 0,25$ b	$3,27 \pm 0,84$ a	0,136
<b>Ah 2-3cm</b>	$3,53 \pm 0,95$ b	$2,7 \pm 0,61$ a	0,500

*Tabla 10: Efecto del fuego en el carbono orgánico (%) a diferentes profundidades. El valor p, indica las diferencias debidas al fuego para cada profundidad. Las diferentes letras de cada columna indican diferencias significativas ( $p<0,05$ ) entre las profundidades (Test Tukey).*

Los cambios cuantitativos de SOM son una ramificación de dos efectos de fuego: Por un lado, la eliminación de la mayor parte o la totalidad de la capa de hojarasca y algunos compuestos orgánicos de los primeros centímetros superiores del suelo mineral, los únicos que realmente sufren las altas temperaturas. Por otro lado, la entrada de materiales carbonizados ( Alexis et al., 2007 )

Como consecuencia directa del fuego, se produce la modificación de compuestos de C preexistentes, incluyendo sustancias repelentes al agua (Knicker et al., 2005 ). Estos cambios conducen a la formación de sustancias con propiedades débiles coloidales y una mayor resistencia a la degradación química y biológica (Almendros et al., 1992; Doerr et al., 2000 ; Knicker et al., 2005 ). La composición de

lípidos del suelo es particularmente propensa a sufrir alteraciones rápidas y significativas durante un incendio, ya que es una fracción lábil de materia orgánica.

Dependiendo de la severidad del fuego, el impacto sobre la materia orgánica puede variar entre la volatilización de algunos componentes poco importantes, la carbonización o la oxidación completa. Los residuos orgánicos comienzan a alterarse a temperaturas entre 200 y 250°C, y se pierden por completo entorno a los 400-450°C (Giovannini et al., 1998; DeBano, 1990), temperatura que, en nuestro estudio, sólo se alcanza en la capa más superficial.

#### 4.6. Carbono pirolizado:

El carbono pirolizado varía significativamente con respecto a la profundidad, obteniéndose que los valores son más altos en superficie que en profundidad (Tabla 8).

C. pirolizado (%)	Control	Quemado	P
<b>Horizonte O</b>	<b>35,76±5,59a</b>	<b>3,76±0,67b</b>	<b>0,005</b>
<b>Ah 0-1cm</b>	<b>12,57±1,91b</b>	<b>4,14±0,69b</b>	<b>0,014</b>
<b>Ah 1-2cm</b>	<b>9,55±1,24b</b>	<b>7,55±2,03ab</b>	<b>0,447</b>
<b>Ah 2-3cm</b>	<b>10,33±0,56b</b>	<b>12,3±0,98a</b>	<b>0,156</b>

*Tabla 11: Efecto del fuego en el carbono pirolizado (%) a diferentes profundidades. El valor p indica las diferencias debidas al fuego. Las diferentes letras de cada columna indican diferencias significativas entre las profundidades (Test Tukey).*

En el caso de las muestras quemadas, también existen diferencias significativas. Entre los diferentes tratamientos la única diferencia significativa ( $p<0,05$ ) que se encuentra es en la superficie y en el primer centímetro, por lo cual se puede afirmar

que es en el nivel superficial donde la quema controlada afecta significativamente al contenido en carbono pirolizado.

Sabemos que la materia orgánica se encuentra en los horizontes más superficiales, por lo que se encuentra directamente expuesta al fuego. Tras el contacto con el fuego, la pérdida más apreciable es sobre la materia orgánica, como indican nuestros datos. Además, en los incendios de baja severidad, se pueden producir ligeros aumentos en la materia orgánica por la incorporación de material vegetal que no se ha quemado totalmente (Notario, 2007; Carballas et al., 2009).

#### 4.7. Carbono inorgánico:

Respecto al Carbono inorgánico, los datos que se observan en el caso de las muestras control son totalmente diferentes al caso de las muestras quemadas (Tabla 9). Puesto que en el primer caso el carbono inorgánico aumenta de forma significativa conforme aumenta la profundidad, produciéndose el efecto contrario en las muestras quemadas (aunque esta vez no de forma significativa). Además no se observan diferencias significativas entre las muestras control y las muestras quemadas.

C inorgánico (%)	Control	Quemado	P
<b>Horizonte O</b>	$1,83 \pm 0,55$ b	$3,77 \pm 0,45$ a	0,055
<b>Ah 0-1cm</b>	$3,5 \pm 0,21$ a	$3,90 \pm 0,38$ a	0,605
<b>Ah 1-2cm</b>	$3,5 \pm 0,58$ a	$3,53 \pm 0,54$ a	0,954
<b>Ah 2-3cm</b>	$3,2 \pm 0,26$ a	$2,83 \pm 0,65$ a	0,628

Tabla 12: Efecto del fuego en el carbono inorgánico (%) a diferentes profundidades. El valor p, indica las diferencias debidas al fuego. Las diferentes letras de cada columna indican diferencias significativas entre las profundidades (Test Tukey).

De manera general, el carbono inorgánico se mantiene más o menos constante, viéndose diferencias significativas entre los datos de la muestra control. El

incremento en profundidad del carbono inorgánico (carbonatos) se relaciona con el lavado a que se somete el suelo con la lluvia. En el suelo quemado, el aporte de cenizas en superficie, ricas en carbonatos (Pereira et al, 2012) rompe esa dinámica.

Los suelos calizos analizados han tenido valores altos de carbonatos debido a la herencia del material parental subyacente y a procesos de formación secundaria de carbonatos. En cambio, los suelos yesosos han tenido valores más altos de carbonatos en el horizonte superior. Este mayor contenido de carbonatos relativo en los horizontes de superficie podría ser debido a deposición de carbonato por lluvia y procesos eólicos (Khademi y Mermut, 2003), o en un escenario más probable, debido al enriquecimiento por la migración del carbonato del yeso (Florea y Al-Joumaa, 1998).

#### 4.8. Relación entre parámetros.

	Repelencia al agua	Estabilidad estructural	Carbono pirolizado	Carbono inorgánico	Carbono orgánico
Repelencia al agua	1	0,03	0,89**	-0,58**	0,94**
Estabilid. estructural		1	0,49*	0,56*	0,14
Carbono pirolizable			1	-0,75**	0,92**
Carbono inorgánico				1	0,60**
Carbono orgánico					1

Tabla 13: Semi-matriz de los parámetros estudiados. \* $p<0,005$  y \*\*  $p<0,001$  ( $n=18$  o  $n=24$ )

La positiva y significativa correlación existente entre la hidrofobicidad y el carbono orgánico es una prueba más de la importancia de las sustancias orgánicas en la repelencia al agua ( $R=0.94$ ;  $n=24$ ;  $p<0.01$ ). No obstante Cerda et al. (2005) indican que con el tiempo se tiende de nuevo a las condiciones hidrofóbicas previas al fuego, ya que se produce la nueva incorporación de materia orgánica.

El tratamiento de quema causó una reducción significativa en la proporción de carbono orgánico sólo en la superficie del suelo (horizonte O) y hasta 1 cm de

profundidad (Ah). El comportamiento de la fracción de carbono inorgánico es inverso, observándose un aumento significativo en los porcentajes de carbono inorgánico en superficie. Esto puede deberse a que la combustión de la madera hace que se produzca la mineralización de los elementos básicos, con la creación de óxidos que se convierten en carbonatos e hidróxidos con la exposición al ambiente (Etiegni y Campbell, 1991). Bajo las condiciones del experimento más del 75 % del CO desaparece por efecto del fuego, ya sea mineralizado o volatilizado. El carbono pirolizable está relacionado positivamente con el carbono orgánico ( $R=0,92$ ;  $n=24$ ;  $p<0,01$ ).

## CONCLUSIONES GENERALES

## 5. CONCLUSIONES GENERALES:

Del estudio efectuado se desprende que los cambios de mayor magnitud se producen en la parte más superficial del suelo, horizonte O y superficie del Ah 1cm. En concreto:

1. La repelencia al agua, elevada en la superficie (horizonte O) del suelo control, desaparece en los suelos quemados.
2. La estabilidad de los agregados del 1er cm del horizonte Ah aumenta significativamente con la quema, no viéndose alterados a los 2 y 3 cm de profundidad.
3. La quema del suelo causó una reducción significativa en la proporción de carbono orgánico en la superficie del suelo (horizonte O) y hasta 1 cm de profundidad (Ah), no viéndose afectado a mayor profundidad.
4. La pérdida de carbono orgánico en los suelos estudiados asciende a 54,87 t/ha; el 20,70% de esa pérdida se produce en el horizonte O y el 22,32% en el primer centímetro del Ah.
5. Se ha obtenido una positiva y significativa correlación entre la hidrofobicidad y el carbono orgánico ( $R=0,94$ ;  $n=24$ ;  $p<0,01$ ) en una prueba más de la importancia de las sustancias orgánicas en la repelencia al agua.

	Horizonte O		Ah 1 cm		Ah 2 cm		Ah 3 cm	
	Control	Quema	Control	Quema	Control	Quema	Control	Quema
<b>Repelencia (Clase EP)</b>	6,33	1,33	3	1	2	1	1	1
<b>EE (%)</b>	-	-	88,5	95,4	86,9	89,3	87,0	85,8
<b>C inorgánico (%)</b>	1,83	3,73	3,50	3,77	3,5	3,53	3,20	2,83
<b>C orgánico (%)</b>	19,83	4,73	6,40	3,07	4,90	3,27	3,53	2,70
<b>C pirolizable (%)</b>	35,76	3,67	12,57	4,14	9,55	7,55	10,33	12,31

Tabla 14: Resumen de los datos obtenidos.

## BIBLIOGRAFÍA

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- Alexis, M.A., Rasse, D.P., Rumpel, C., Bardoux, G., Péchot, N., Schmalzer, P., Drake B., Mariotti A., 2007. Fuego impacto sobre las pérdidas de C y N y la producción de carbón vegetal en un ecosistema de matorral de roble. Biogeoquímica, 82:201-216.
- Almendros, G., González-Vila, F.J., Martín, F., Fründ, R., Lüdemann, H.D., 1992. Solid state NMR studies of fire-induced changes in the structure of humic substances. The Science of the Total Environment, 117 (118): 63–74.
- Arcenegui, V., Mataiz-Solera, J., Guerrero, C., Zornoza, R., Mataix-Beneyro, J. y García-Orenes, F., 2008. Inmediate effects of wildfires on water repellency and aggregate stability in Mediterranean calcareous soils. Catena, 74:219-226.
- Atanassova, I., Doerr, S.H., 2011. Changes in soil organic compound composition associated with heat-induced increases in soil water repellency. European Journal of Soil Science, 62: 516-532.
- Ayache, F., Baeza M.J., Santana, V., 2012. Temperatura del suelo y consumo de combustible en especies mediterráneas como una medida de la severidad del fuego. V Simposio Nacional sobre Incendios Forestales. La Nucía (Alicante).
- Aznar, J.M., Badía, D., Gonzalez-Pérez, Martí, C. Conesa, M., 2012. Variaciones en profundidad de las propiedades de un suelo yesoso forestal bajo quema controlada IV Internacional FuegoRED Meeting. Puerto de la Cruz (Tenerife, Spain).
- Badía, D., Martí, C., 2003. Plant ash and heat intensity effects on chemical and physical properties of two contrasting soils. Arid Land Research and Management, 17: 23-41.

- Badía, D., Martí, C., 2009. Zonas afectadas por incendios forestales. Estudio de Casos en el Valle medio del Ebro. Capítulo 3.3, 158-183 pp. En: Cerdá, A. y Mataix, J. (Eds.). Efectos de los incendios forestales sobre los suelos en España. Universitat de València. 529 pp. Valencia.
- Badía, D., Martí, C.; Charte, R. 2011. Soil Erosion and Conservations Measures in Semiarid Ecosystems Affected by Wildfires.5: 87-110. In: Soil Erosion Studies. Godone, D. and Stanchi, S. (Eds). INTECH Open Access Publisher.
- Badía, D., Aguirre J.A., Martí, C., Márquez, M.A., 2012. Sieving effect on the intensity and persistence of water repellency at different soil depths and soil types from NE-Spain. *Catena* (in press).
- Badía D., Martí C., Aznar J.M., León J., 2011. Influence of slope and parent rock on soil genesis and classification in semiarid mountainous environments. *Geoderma*, 193-194: 13-21.
- Baeza, M.J., Santana, V.M., Pausas, J.G. Vallejo, V.R., 2011. Successional trends in standing dead biomass in Mediterranean basin species. *Journal of Vegetation Science*, 22: 467-474.
- Batjes, NH. 1996 Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *Eur J Soil Sci*; 47:151-163.
- Bento-Gonçalves, A., Vieira, A., Úbeda, X., Martin, D., 2012. Fire and soils: Key concepts and recent advances. *Geoderma* (in press).
- Bodí, M., Mataix-Solera, J., Doerr, S., Cerdá, A., 2011. The wettability of ash from burned vegetation and its relationship to Mediterranean plant species type, burn severity and total organic carbon content. *Geoderma*, 160: 599-607.
- Boix-Fayos, C., 1997. The roles of texture and structure in the water retention capacity of burnt Mediterranean soils with varying rainfall. *Catena*, 31: 219-236.

- Bond, W.J., Keeley, J.E., 2005. Fire as a global 'herbivore': the ecology and evolution of Flammable ecosystems. *Trends in Ecology and Evolution*, 20: 387-394.
- Boyer, W.D., Miller, J.H., 1994. Effects of burning and brush treatments on nutrient and soil physical properties in young longleaf pine stands. *Forest Ecology and Management*, 70: 311-318.
- Campbell, G.S, Jungbauer,Jr J.D., Bristow, K.L., Hungerford, R.D., 1995. Soil temperature and water content beneath a surface fire. *Soil Sci*, 159: 363-374.
- Carballas, T., Martín, A.; Díaz-Raviña, M., 2009. Efecto de los incendios forestales sobre suelos de Galicia. 3.6: 271-301. En Cerdá, A. y Mataiz, J. (Eds.). *Efectos de los incendios forestales sobre suelos en España*. Universitat de Valencia. 529. Valencia.
- Cerdá, A., Doerr, S.H., 2005. Influence of vegetation recovery on soil hidrology and erodibility following fire: an eleven-year investigation. *International Journal of Wildland Fire*, 14:423-437.
- Certini, G. 2005. Effects of fire on properties of forest soils: a review. *Ecologia*, 143: 1-10.
- Chandler, C., Cheney, Ph., Thomas, Ph., Trabaud, L.; Williams, D. 1983. Fire in the forestry. Volumen I. En: Chandler, C., Cheney, Ph., Thomas, Ph., Trabaud, L. and Williams, D. (Eds), *Forest fire behavior and effects*. J. Wiley and Sons, New York, pp. 171-202.
- Cofer, III WR, Koutzenogii, KP, Kokorin A, Ezcurra, A., 1997. Biomass burning emissions and the atmosphere. In: Clark JS, Cachier H, Goldammer JG, Stocks B, editors. *Sediment records of biomass burning and global change*. NATO ASI Series, vol. I. Berlin, Germany: Springer. p. 51.
- Coelho, C.O.A., Ferreira, A.J.D., Boulet, A.K., Keizer, J.J., 2004. Overland flow generation processes, erosion yields and solute loss following different

intensity fires. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 37: 233-240.

- DeBano, L.F.;Letey. J., 1969. Water-Repellent Soils. Proceedings of Symposium on Water-Repellent Soils. University of California, Riverside, CA, March 1968. Univ. of California, Riverside, CA.
- DeBano, L.F., Mann, L.D., Hamilton, D.A., 1970. Translocation of hydrophobic substances into soil by burning organic litter. Soil Science Society of America Journal, 34:130-133.
- DeBano, L.F., Savage, S.M., Hamilton, D.A., 1976. The transfer of heat and hydrophobic substances during burning. Soil Science Society of America Proceedings, 40:779 - 782.
- DeBano, L.F., 1991. The effects of fire on soil properties. US Department of Agriculture Forest Service General Technical Report, INT-280:151-156.
- DeBano, L.F., Neary, D.G., Ffolliott, P.F., 1998. Fire's Effects on Ecosystems. John Wiley & Sons, New York pp. 352.
- DeBano, L.F., 2000. The role of fire and soil heating on water repellency in wildland environments: a review. J Hydrol; 231/232:195-206.
- DeBano, L.F., Neary, D.G., Ffolliott, P.F., 2005. Soil physical properties. Wildland Fire in Ecosystems. Effects of Fire on Soil and Water. General Technical Report RMRS-GTR-42, Volume 4. USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, pp. 29–52.
- De la Rosa, J.M., González-Pérez, J.A., González-Vázquez, R., Knicker, H., López-Capel, E., Manning, D.A.C., González-Vila, F.J., 2008. Usefulness of thermal analysis to monitor fire induced changes in forest soils. Catena 74: 296-303.
- De la Rosa, J.M., Araújo, M.F., González-Pérez, J.A. , González-Vila, F.J., Soares, A.M., Martins, J.M., Leorri, E., Corbett, R., Fatela, F., 2012 Organic

matter sources for tidal marsh sediment over the past two millennia in the Minho River estuary (NW Iberian Peninsula) Organic Geochemistry.

- Díaz-Fierros, F., Benito Rueda, E., Pérez Moreira, R., 1987. Evaluation of the U.S.L.E. for the prediction of erosion in burnt forest areas in Galicia (NW-Spain). *Catena* 14: 189-199.
- Doerr, S.H. 1998. On standardising the “Water Drop Penetration Time” and the “Molarity of an Ethanol Droplet” techniques to classify soil water repellency: a case study using medium soils. *Earth Surface: Processes and Landforms*, 23: 663-668.
- Doerr, S.H., Shakesby, R.A., Walsh, R.P.D., 2000. Soil water repellency: its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance. *Earth-Science Reviews* 51: 33-65.
- Doerr, S.H., Blake, W.H., Shakesby, R.A., Stagnitti, F., Vuurens, S.H., Humphreys, G.S., Wallbrink, P. 2004. Heating effects on water repellency in Australian eucalypt forest soils and their value in estimating wildfire soil temperatures. *International Journal of Wildland Fire* 13 (2), 157–163. doi:10.1071/WF03051
- Doerr, S.H., Llewellyn, C.T., Douglas, P., Morley, C.P., Mainwaring, K.A., Haskins, C., Johnsey, L., Ritsema, C.J., Stagnitti, F., Allinson, G., Ferreira, A.J.D., Keizer, J.J., Ziogas, A.K., Diamantis, J. 2005. Extraction of compounds associated with water repellency in sandy soils of different origin. *Australian Journal of Soil Research* 43 (3): 225-237.
- Doerr, S.H., Shakesby, R.A., Blake, W.H., Chafer, C.J. Humphreys, G.S., Wallbrink, P.J., 2006Effects of differing wildfire severities on soil wettability and implications for hydrological response *Journal of Hydrology*.
- Doerr, S.H., Skakesby, R.A. 2009. Soil water repellency. Principles, causes and relevance in fire-affected environments. En: A. Cerdà y J Mataix-Solera (Eds.). *Efectos de los incendios forestales sobre los suelos en España*. El

estado de la cuestión visto por los científicos españoles. Universitat de València. Valencia.

- Doerr, S.H., Shakesby, R.A., 2009. Soilwater repellency: principles, causes, and relevance infire-affected environments. In: Cerdà, A., Mataix-Solera, J. (Eds.), *Efectos de los incendios forestales sobre los suelos de España*. Universitat de València, pp. 57-75.
- Etiégni, L., Campbell, A.G., 1991. Physical and chemical characteristics of wood ash. *Bioresource Technology* 37: 173-178.
- Ferreira, A.J.D., Coelho, C.O.A., Boulet, A.K., Leighton-Boyce, G., Keizer, J.J., Ritsema, C.J., 2005. Influence of burning intensity on water repellency and hydrological processes at forest and shrub sites in Portugal. *Australian Journal of Soil Research* 43: 327-336.
- Ferreira, A.J.D., Prats S.A., Ferreira C.S.S., Malar M.C., Cohelo C.O.A., Carreiras M., 2009. Los incendios forestales en Portugal. Aportes para la compresión del impacto en la degradación de suelos y aguas. *Efectos de los incendios forestales sobre los suelos de España. El estado de la cuestión visto por los científicos españoles*. Cátedra Divulgación de la Ciencia. Universidad de Valencia.
- Fox, D.M., Darboux, F., Carrega, P., 2007. Effects of fire-induced water repellency on aggregate stability, splash erosion, and saturated hydraulic conductivity for different size fractions. *Hydrological Processes* 21: 2377-2384.
- Florea, N., Al-Joumaa, K., 1998. Genesis and classification of gypsiferous soils of the Middle Euphrates Floodplain, Syria. *Geoder* 87: 67-85.
- García-Corona, R., Benito, E., de Blas, E., Varela, M.E., 2004. Effects of heating on some soil physical properties related to its hydrological behaviour in two north-western Spanish soils. *International Journal of Wildland Fire* 13: 195-199.

- Gracia, C., 2005. La flora de Zuera y sus pinares. Ed. Prames. Zaragoza.
- Guerrero, C., Mataix-Solera, J., Navarro-Pedreño, J., García-Orenes, F., Gómez, I., 2001. Different patterns of aggregate stability in burned and restored soils. *Arid Land Res.Manag.* 15: 163-171.
- Giovannini, G., Sequi, P., 1976<sup>a</sup>. Iron and aluminium as cementing substances of soil aggregates. Acetylacetone in benzene as an extractant of fractions of soil iron and aluminium. *Journal of Soil Science* 27: 140-147.
- Giovannini, G., Sequi, P., 1976<sup>b</sup>. Iron and aluminiumas cementing substances of soil aggregates. II. Changes in stability of soil aggregates following extraction of iron and aluminium by acetylacetone in a no polar solvent. *Journal of Soil Science* 27: 148-153.
- Giovannini, G., Lucchesi, S., Giachetti, M., 1987. The natural evolution of a burnt soil: a three-year investigation. *Soil Science* 143: 220-226.
- Giovannini, G., Lucchesi, S., Giachetti, M., 1988. Effects of heating on some physical and chemical parameters related to soil aggregation and erodibility. *Soil Science* 146: 255-262.
- Giovannini, G., 1994. The effect of fire on soil quality. In: Sala, M., Rubio, J.L. (Eds.), *Soil Erosion as a Consequence of Forest Fires*. Geoforma Ediciones, Logroño, pp. 15-29.
- Giovannini, G., Lucchesi, S., 1997. Modifications induced in soil physico-chemical parameters by experimental fires at different intensities. *Soil Science* 162: 479-486.
- González-Pérez, J.A., González-Vila, F.J., Almendros, G., Knicker, H., 2004. The effect of fire on soil organic matter: a review. *Science direct*.
- Hatcher, PG, Spiker, EC., 1988. Selective degradation of plant biomolecules. *Humic substances and their role in the environment*. New York: Wiley; p. 59-74.

- González-Vila, F.J., Tinoco, P., Almendros, G., Martin, F., 2001. Pyrolysis-GC-MS analysis of the formation and degradation stages of charred residues from lignocellulosic biomass. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 49:1128-1131.
- Horne, D.J. and McIntosh, J.C. 2000. Hydrophobic compounds in sands in New Zealand-estraction, characterization and proposed mechanisms for repellency expression. *J Hydrol.* 231-232:35-46.
- Ibáñez, J.J., Lobo, M.C., Almendros, G., Polo, A., 1983. Impacto del fuego sobre algunos ecosistemas edáficos de clima mediterráneo continental en la zona centro de España. *Boletín de la Estación central de Ecología* 24: 755-777.
- Imeson, A.C., 1984. An eco-geomorphological approach to the soil degradation and erosion problem. In: Fantechi, R., Margaris, N.S. (Eds.), *Desertification in Europe*. D. Reidel publishing Co., Dodrecht, pp. 110-125.
- Jaiyeoba, I.A., Ologe, K.O., 1990. Soil erosibility measurements in Nigeria. *Zeitschriftfür Geomorphologie* 34: 307-312.
- Jarauta, E., 1989. Modelos matemáticos de régimen de humedad de los suelos. Aplicación ala determinación del régimen de humedad de los suelos del área meridional de Lleida. Tesis Doctoral, UPC. Barcelona.
- Jordán, A., Zavala, L; Bárcenas, G.; Mataix, J., 2010. Repelencia al agua en suelos afectados por incendios: métodos sencillos de determinación e interpretación, pp. 45-183. En: Cerdá, A. y Jordán, A. 2010. Actualización en Métodos y Técnicas para el Estudio de los Suelos Afectados por Incendios Forestales. Cátedra Divulgación de la Ciencia. Universidad de Valencia.
- Josa, R., Arias, X., Solé, A., 1994. Effects of slash burning on some soil physical properties in an holm-oak coppice. In: Sala, M., Rubio, J.L. (Eds.), *Soil Erosion and Degradation as a Consequence of Forest Fires*. Geoforma, Logroño, pp. 29-41.

- Kandeler, E., Murer, E., 1993. Aggregate stability and soil microbial processes in a soil with different cultivation. *Geoderma*, volume 56. Pages 503–513.
- Khademi, H., Mermut, A.R., 2003. Micromorphology and classification of Argids and associated gypsiferous Aridisols from central Iran. *Catena* 54, 439-455.
- Kemper, W.D., Rosenau, R.C., 1986. Aggregate stability and size distribution. *Methods of Soil Analysis, Part 1*. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, pp. 425-442.
- Kemper W.D., Koch, E.J., 1996. Aggregate stability of soils from Western United States and Canada. Pp 1-52 *Colorado Agric. Exp. Stn. Bull* 1355.
- Levine, JS., 1994 Biomass burning and the production of greenhouse gases. Climate biosphere interaction: biogenic emissions and environmental effects of climate change. New York, USA: John Wiley & Sons; p. 139-59.
- Levine, JS., 1996a FireSat and the global monitoring of biomass burning. *Biomass Burning and Global Change*, vol. 1. Cambridge (MA): The MIT Press; p. 107-32.
- Llovet, J., Josa R., Vallejo.V.R., 2008. Thermal shock and rain effects on soil surface characteristics: A laboratory approach. *Catena* 74: 227-234.
- Llovet, J., Bautista, S., Mayor, A.G., Serrasolses, I., Alloza, J.A., Bellot, J., Vallejo, R., 2009. Factores de control de la hidrología y erosión post-incendio en suelos mediterráneos. *Desde la parcela al paisaje*, capítulo 3.10, pp.385-403 Universitat de València. Valencia.
- Martin, D.A., Moody, J.A., 2001. Comparison of soil infiltration rates in burned and unburned mountainous watersheds. *Hydrological Processes* 15: 2893-2903.

- Mataix-Solera, J., Doerr, S.H., 2004. Hydrophobicity and aggregate stability in calcareous top soils from fire-affected pine forests in south-eastern Spain. *Geoderma* 118: 77-88.
- Mataix-Solera, J., Cerdá, A., 2009. Incendios forestales en España. Ecosistemas terrestres y suelos. Efectos de los incendios forestales sobre los suelos de España. El estado de la cuestión visto por los científicos españoles. Cátedra Divulgación de la Ciencia. Universitat de València.
- Mataix-Solera, J., Benito, E., Andreu, V., Cerdà, A., Llovet, J., Úbeda, X., Martí, Cl., Varela, E., Gimeno, E., Arcenegui, V., Rubio, J.L., Campo, J., García-Orenes, F., Badía, D., 2010. Cómo estudiar la estabilidad de agregados en suelos afectados por incendios. Métodos e interpretación de resultados. Actualización en métodos y técnicas para el estudio de los suelos afectados por incendios forestales. Cátedra Divulgació de la Ciència-FUEGORED. Universitat de València, Valencia, pp. 105–141.
- Mataix-Solera, J., Cerdà A., Arcenegui, V., Jordan, A., Zavala, L.M., 2011. Fire effects on soil aggregation: a review. *Earth-Science Reviews* 109: 44-60.
- Martínez-Zavala, L., Jordán-López, A., 2009. Influence of different plant species on water repellency in Mediterranean heathland soils. *Catena* 76, 215–223.
- McCauley, J.D., Engel, B.A., Scudder C.E., Morgan, M.T., Elliot P.W., 1993. Assessing the Spatial Variability of Organic Matter. An ASAE Meeting Presentation, paper No. 93-1555. ASAE, St.Joseph, MI, USA.
- Moreno, J.M., Vázquez, A., Vélez, R., 1998. Recent history of forest fires in Spain. In: Moreno, J.M. (Ed.), Large Forest Fires. Backhuys Publishers, Leiden, pp. 159-185.
- Murer, E.J., Baumgarten, A., Eder G., Gerzabek, M.H., Kandeler, E., Rampazzo, N. 1993, An improved sieving machine for estimation of soil aggregate stability (SAS). *Geoderma*, volume 56: 539-547.

- Notario, J.S., 2007. Temporal evolution of organic carbon and nitrogen forms in volcanic soils under broom scrub affected by wildfire. *Science of the Total Environment.* 378:247-252.
- Pardini, G., Gispert, M., Dunjo, G., 2004. Relative influence of wildfire on soil properties and erosion processes in different Mediterranean environments in NE Spain. *Sci. Total Environ.* 328 (1–3), 237-246.
- Pardini G., Gispert M., 2006. Impact of land abandonment on water erosion in soils of the Eastern Iberian Peninsula. *Agrochimica* 50: 13-24.
- Pausas J.G., Llovet J., Rodrigo A., Vallejo V.R., 2008. Are wildfires a disaster in the Mediterranean basin? A review. *International Journal of Wildland Fire* 17: 713-723.
- Pereira, P., Úbeda, X., Martin, D.A., 2012. Fire severity effects on ash chemical composition and water-extractable elements. *Geoderma.* 191: 104-114.
- Robichaud, P.R.; Hungerford, R.D., 2000. Water repellency by laboratory Burning of four northern Rocky Mountain forest soils. *Journal of Hydrology* 231-232:207-219.
- Sanroque, P., Rubio J.L., Mansanet, J., 1985. Changes in soil properties, floristic composition and water erosion following mediterranean forest fire in Valencia (Spain). *Revue d'Ecologie et Biologie du Sol* 22 : 131-147.
- Schwilk, D.D., 2003. Flammability is a niche construction trait: canopy architecture affects fire intensity. *American Naturalist.* 162: 725-733.
- Shakesby, R.A., Coelho, C.de.O.A., Ferreira, A.D., Terry, J.P., Walsh, R.P.D., 1993. Wildfire impacts on soil erosion and hydrology in wet Mediterranean forest, Portugal. *International Journal of Wildland Fire.* 3: 95–110.
- Shakesby, R.A., Doerr, S.H., 2006. Wildfire as a hydrological and geomorphological agent. *Earth-Science Reviews* 74: 269-307.

- Shakesby, RA., 2011. Post-wildfire soil erosion in the Mediterranean: Review and the future research directions. *Earth-Science Reviews*. 105:71-100.
- Simkovic, L., Dlapa, P., Doerr, S.H., Mataix-Solera, J., Sasinkova, V. 2008. Thermal destruction of soil water repellency and associated changes to soil organic matter as observed by FTIR spectroscopy. *Catena*, 74: 205-211.
- Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S., Denef, K., 2004. A history of research on the link between(micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics (Review). *SoilTillage Res.* 79 (1): 7-31.
- Soto, B., Benito, E., Diaz-Fierros, F., 1991. Heat-induced degradation processes in forest soils. *International Journal of Wildland Fire* 1: 147-152.
- Tate R.L., 1987. Soil organic matter. Biological and ecological effects. Wiley. New York.
- Terefe, T., Mariscal-Sancho, I., Peregrina, F., Espejo R., 2008. Influence of heating on various properties of six Mediterranean soils. A laboratory study. *Geoderma* 143:273-280.
- Trabaud, L., 2002. Post-fire vegetation recovery and dynamics in the Mediterranean area. In: Pardini, G., Pinto, J. (Eds.), *Fire, Landscape and Biodiversity: an Appraisal of the Effects and Effectiveness*. UdG, Girona, Diversitas, pp. 39-55.
- Tinoco, P., Almendros, G., Sanz, J., González-Vázquez, R., González-Vila, F., 2006. Molecular descriptors of the effect of fire on soils under pine forest in two continental Mediterranean soils. *Organic Geochemistry* 37: 1995-2018.
- Úbeda, X., Sala M., Imeson, A., 1990. Variaciones en la estabilidad y consistencia de un suelo forestal antes y después de ser sometido a un incendio. I Reunión Nacional de Geomorfología, Teruel, pp. 677-685.
- Úbeda, X., Pereira, P., Outeiro, L., Martin, D., 2009. Effects of fire temperature on the physical and chemical characteristics of the ash from

two plots of cork oak (*Quercus suber*). Land Degradation and Development 20: 589-608.

- Varela M.E., Benito E., de Blas E., 2005. Impact of wildfires on surface water repellency in soils of NW Spain. Hydrological Processes 19: 3649-3657. doi:10.1002/hyp.5850.
- Varela, M.E., 2007. Efectos de los incendios forestales en la degradación física de los suelos de Galicia. PhD Thesis. Universidad de Vigo.
- Viscarra, R.A., Minasny B., Roudier, P., Mcbratney, A.B., 2006. Colour space models for soil science. Geoderma, 133:320-337.
- Watson, C.L., Letey, J., Mustafa M.A., 1971. The influence of liquid surface tension and liquid soil contact on liquid entry into porous area. University of California.

**Páginas web consultadas:**

- Agencia Estatal de Meteorología: <http://www.aemet.es>
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente: <http://www.magrama.gob.es>

## RESUMEN

## 7. RESUMEN:

El fuego afecta a la materia orgánica y sus propiedades. Pero se producen variaciones dependiendo de su intensidad, el tipo de suelo, la vegetación, etc. (González-Peréz et al., 2004). Este proyecto tiene como objetivo determinar las variaciones en profundidad de diferentes propiedades del suelo (Color, hidrofobicidad, densidad aparente, estabilidad estructural, carbono orgánico, carbono inorgánico y carbono pirolizado). Para llevarlo a cabo, se diseñó un experimento de quema controlada en el laboratorio con seis bloques de suelo inalterados.

La zona escogida para la extracción de los bloques fueron los Montes de Zuera, dónde se cogieron seis bloques inalterados y de la capa más superficial, representativos de un suelo yesoso forestal (Gipsisol hipergípsico). A continuación se secaron al aire y tres de ellos se sometieron a una quema controlada siguiendo el método de LLovet et al., 2008. Se registró la temperatura del suelo mediante termopares. Después se han determinado el color (método Munsell), la repelencia al agua Doerr y Shakesby, 2009), densidad aparente, estabilidad estructural (Kemper y Kotch, 1966) y contenido de carbono (TOC). Todo esto, se analizó a tres profundidades (Horizonte O, 1cm Ah y 2 cm Ah) y por triplicado.

El efecto del fuego en el color del suelo es aparente sólo por encima de los 2 cm del perfil del suelo es en esta profundidad también dónde la repelencia al agua cambia de “muy hidrofóbica” en la superficie del suelo a “ligeramente hidrofóbica”. Respecto a la densidad aparente, va aumentando conforme aumenta también la profundidad del suelo, siendo significativo en todos los espesores muestreados del horizonte Ah. La estabilidad estructural es elevada y no varía en profundidad, en este caso, la quema ha provocado un incremento. El carbono orgánico, es significativamente mayor en la superficie que en la profundidad en las muestras control ocurriendo lo contrario don el carbono inorgánico, ya que va aumentando de forma significativa conforme lo hace la profundidad. Además se ha obtenido una positiva significancia y correlación entre la hidrofobicidad y el carbono orgánico.

## ANEXOS

## 8. ANEXOS:

### 8.1:Temperaturas alcanzadas:

#### 8.1.1. Temperaturas alcanzadas en el bloque 1:

Hora Minutos	A1 °C	A2 °C	Hora Minutos	A1 °C	A2 °C
0	23,57	22,91	46	98,29	104,23
1	24,09	22,88	47	95,45	101,88
2	51,47	24,59	48	92,77	99,63
3	73,51	37,72	49	90,29	97,47
4	78,31	52,66	50	87,98	95,45
5	99,64	62,13	51	85,78	93,46
6	138,35	68,96	52	83,75	91,56
7	178,69	74,44	53	81,83	89,72
8	215,55	78,73	54	80,1	87,97
9	244,88	84,4	55	78,39	86,3
10	261,44	93,33	56	76,75	84,72
11	273,32	103,36	57	75,19	83,22
12	282,57	113,46	58	73,71	81,79
13	287,51	122,99	59	72,29	80,39
14	290,46	131,58	60	70,92	79,06
15	293,22	139,17	61	69,6	77,78
16	295,61	146,03	62	68,34	76,54
17	297,25	152,3	63	67,13	75,35
18	297,46	157,98	64	65,98	74,21
19	295,84	163,11	65	64,87	73,11
20	292,47	167,62	66	63,82	72,02
21	287,51	171,45	67	62,8	70,98
22	280,49	174,45	68	61,83	69,96
23	270,36	176,48	69	60,9	69
24	256,57	177,2	70	60,02	68,06
25	241,93	176,37	71	59,15	67,15
26	227,62	174,08	72	58,3	66,26
27	214,4	170,84	73	57,5	65,41
28	202,65	167,04	74	56,7	64,6
29	192,16	162,92	75	55,97	63,81
30	182,73	158,73	76	55,24	63,03
31	174,15	154,53	77	54,52	62,27
32	166,3	150,41	78	53,85	61,56
33	158,99	146,35	79	53,18	60,83
34	152,18	142,35	80	52,53	60,13
35	145,84	138,47	81	51,91	59,44

36	139,91	134,73	82	51,34	58,81
37	134,4	131,1	83	50,76	58,17
38	129,19	127,58	84	50,19	57,53
39	124,31	124,2	85	49,65	56,92
40	119,72	120,93	86	49,12	56,34
41	115,48	117,8	87	48,6	55,77
42	111,53	114,81	88	48,12	55,22
43	107,86	111,95	89	47,64	54,66
44	104,44	109,26	90	47,17	54,12
45	101,28	106,7	91	46,72	53,6

[REDACTED] Temperatura máxima a cada profundidad.

### **8.1.2.Temperaturas alcanzadas en el bloque 2:**

Hora	A1	A2	Hora	A1	A2
Minutos	°C	°C	Minutos	°C	°C
0	24,77	25,03	53	138,7	113,16
1	24,69	24,87	54	135,56	111,68
2	27,77	24,66	55	132,6	110,23
3	44,65	24,82	56	129,76	108,78
4	61,45	26,36	57	127,03	107,33
5	71,16	30,43	58	124,41	105,9
6	76,56	36,9	59	121,89	104,47
7	81,83	44,16	60	119,44	103,08
8	91,17	50,89	61	117,1	101,7
9	105,44	56,83	62	114,82	100,35
10	119,91	62,29	63	112,61	99,03
11	132,28	67,2	64	110,47	97,74
12	143,71	71,5	65	108,38	96,47
13	154,97	75,19	66	106,35	95,21
14	167,82	78,35	67	104,4	94
15	182,26	80,99	68	102,49	92,81
16	195,79	83,2	69	100,6	91,64
17	207,86	85,29	70	98,79	90,5
18	218,85	87,51	71	97,04	89,37
19	228,42	90,11	72	95,37	88,28
20	236,3	93,04	73	93,76	87,21
21	243,94	96,16	74	92,22	86,17
22	252,23	99,71	75	90,72	85,14
23	259,14	103,12	76	89,28	84,13
24	263,25	106,31	77	87,89	83,13
25	264,72	109,41	78	86,55	82,17
26	264,94	112,47	79	85,25	81,22
27	264,56	115,32	80	84	80,29
28	263,67	117,96	81	82,79	79,39
29	262,57	120,37	82	81,62	78,5
30	261,16	122,58	83	80,48	77,63
31	259,26	124,66	84	79,37	76,77
32	256,35	126,58	85	78,28	75,92
33	252,19	128,28	86	77,22	75,09
34	246,72	129,72	87	76,2	74,29
35	239,98	130,76	88	75,21	73,51
36	232,46	131,38	89	74,25	72,73
37	224,66	131,61	90	73,3	71,96
38	216,87	131,48	91	72,39	71,21
39	209,35	131,02	92	71,5	70,48

40	202,17	130,3	93	70,61	69,74
41	195,36	129,43	94	69,74	69,02
42	188,93	128,4	95	68,87	68,31
43	182,86	127,28	96	68,05	67,62
44	177,14	126,06	97	67,26	66,95
45	171,75	124,76	98	66,48	66,28
46	166,71	123,4	99	65,73	65,64
47	161,96	122,01	100	64,99	65
48	157,49	120,56	101	64,27	64,37
49	153,26	119,09	102	63,57	63,77
50	149,28	117,61	103	62,89	63,18
51	145,6	116,13	104	62,23	62,58
52	142,05	114,65	105	61,59	62,02

[REDACTED] Temperatura máxima a cada profundidad.

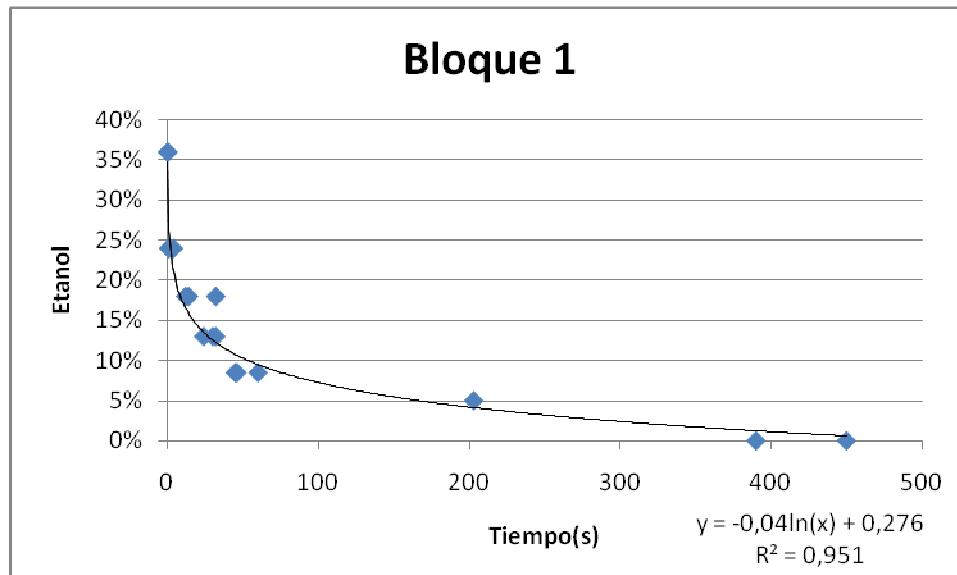
### **8.1.3.Temperaturas alcanzadas en el bloque 3:**

Hora Minutos	1A °C	2A °C	Hora Minutos	1A °C	2A °C
0	15,22	14,44	61	219,6	84,61
1	15,35	14,41	62	215,97	84,99
2	15,96	14,34	63	212,39	85,35
3	18,09	14,31	64	208,83	85,69
4	24,13	14,29	65	205,32	86,03
5	32,4	14,33	66	201,95	86,34
6	42,65	14,34	67	198,45	86,64
7	51,66	14,37	68	195,02	86,92
8	65,18	14,55	69	191,58	87,18
9	73,52	14,59	70	188,14	87,42
10	88,17	15,15	71	184,73	87,63
11	93,94	16,07	72	181,31	87,82
12	97,27	16,96	73	177,95	87,99
13	100,99	17,96	74	174,62	88,13
14	105,06	18,95	75	171,32	88,24
15	114,07	20,29	76	168,04	88,32
16	124,03	21,86	77	164,77	88,37
17	132,52	23,51	78	161,52	88,4
18	138,99	25,47	79	158,22	88,38
19	145,1	27,62	80	154,97	88,34
20	151,75	29,95	81	151,77	88,28
21	156,76	32,58	82	148,63	88,18
22	152,41	35,44	83	145,54	88,06
23	148,31	38,2	84	142,49	87,91
24	150,89	40,75	85	139,49	87,73
25	155,67	43,76	86	136,61	87,52
26	160,36	46,46	87	133,82	87,29
27	167,12	49,3	88	131,13	87,03
28	171,57	52,01	89	128,49	86,74
29	176,1	54,49	90	125,95	86,44
30	181,42	56,79	91	123,5	86,11
31	187,9	58,9	92	121,13	85,76
32	195,54	60,79	93	118,86	85,4
33	202,4	62,52	94	116,66	85,03
34	211,6	64,11	95	114,49	84,63
35	217,33	65,64	96	112,37	84,24
36	222,34	67,01	97	110,33	83,82
37	227,08	68,23	98	108,3	83,42
38	231,46	69,39	99	106,4	82,99

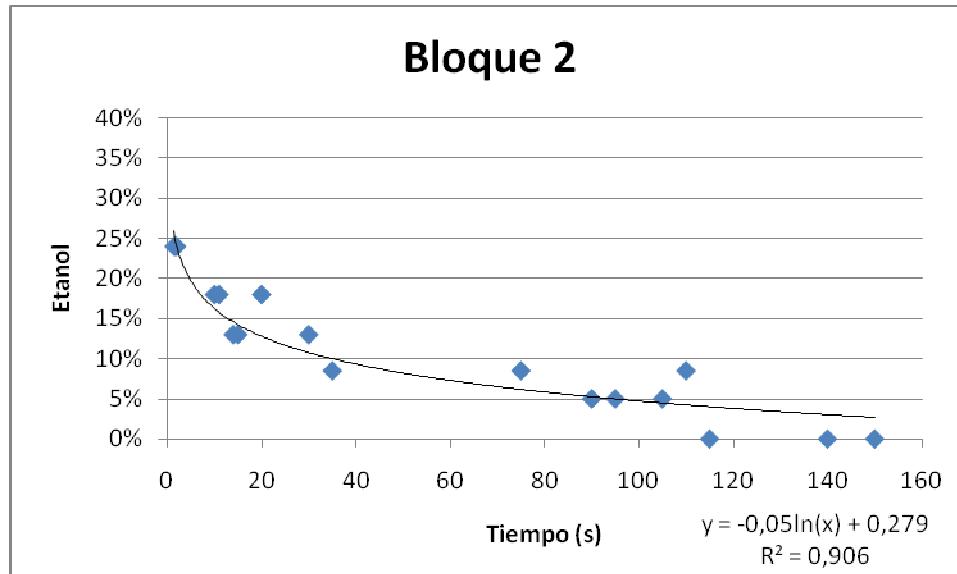
39	234,99	70,44	100	104,71	82,55
40	238	71,46	101	103,03	82,11
41	240,64	72,42	102	101,3	81,65
42	243,5	73,3	103	99,63	81,19
43	246,92	74,18	104	98,03	80,73
44	249,6	75	105	96,46	80,27
45	252,12	75,8	106	94,92	79,8
46	254,34	76,62	107	93,44	79,34
47	255,74	77,3	108	92	78,88
48	256,42	77,89	109	90,59	78,41
49	256,17	78,5	110	89,22	77,94
50	254,9	79,13	111	87,87	77,47
51	252,8	79,73	112	86,52	77,44
52	250,12	80,32	113	85,23	77,56
53	247,15	80,91	114	84,02	77,26
54	243,97	81,44	115	82,84	76,76
55	240,66	81,95	116	81,67	76,26
56	237,26	82,45	117	80,51	75,74
57	233,82	82,93	118	79,39	75,25
58	230,29	83,37	119	78,28	74,74
59	226,74	83,8	120	77,19	74,23
60	223,18	84,21	121	76,16	73,76

Temperatura máxima a cada profundidad.

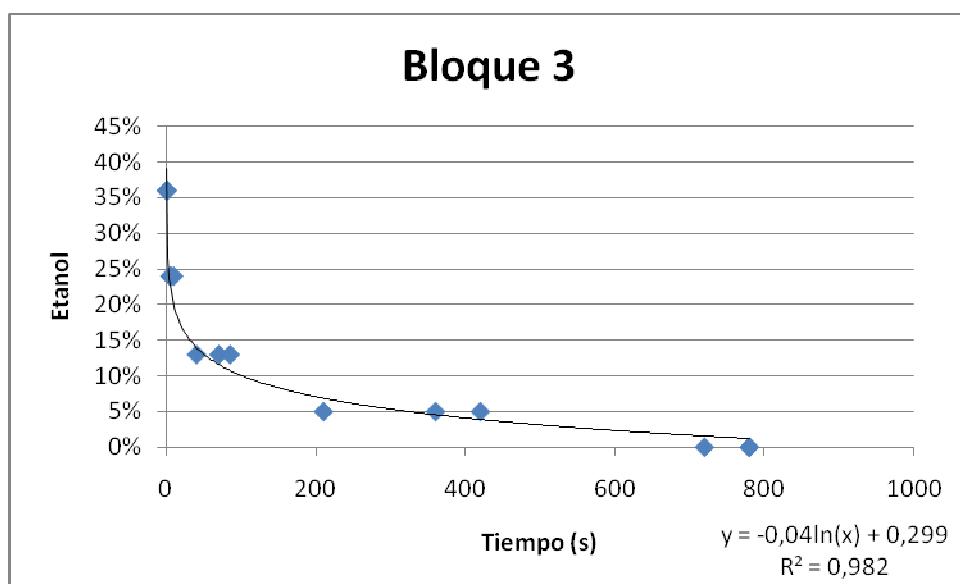
**8.2. Evolución logarítmica de la hidrofobicidad en los suelos respecto a la concentración de etanol en la disolución acuosa de la gota precipitada.**



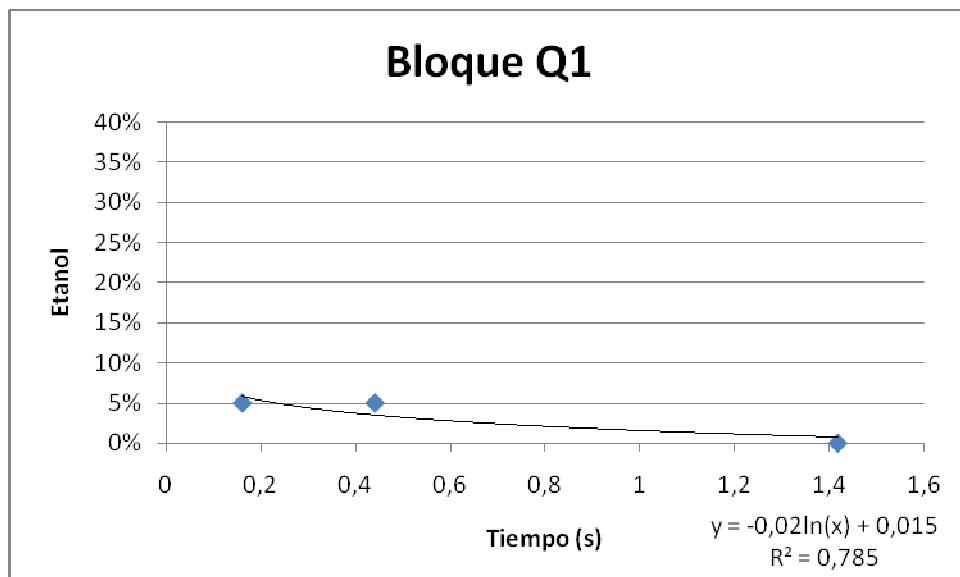
Gráfica 1: Horizonte O, bloque control 1.



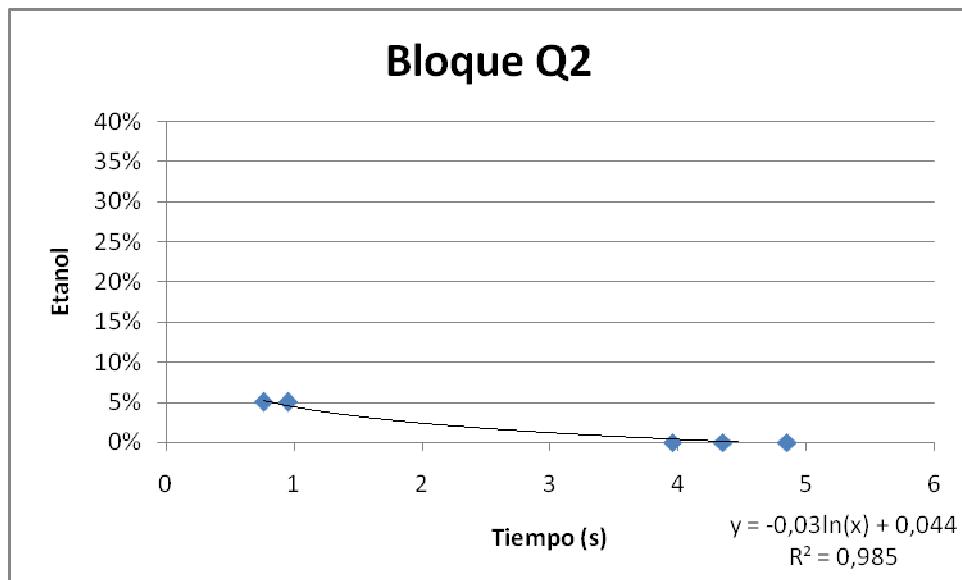
Gráfica 2: Horizonte O, bloque control 2.



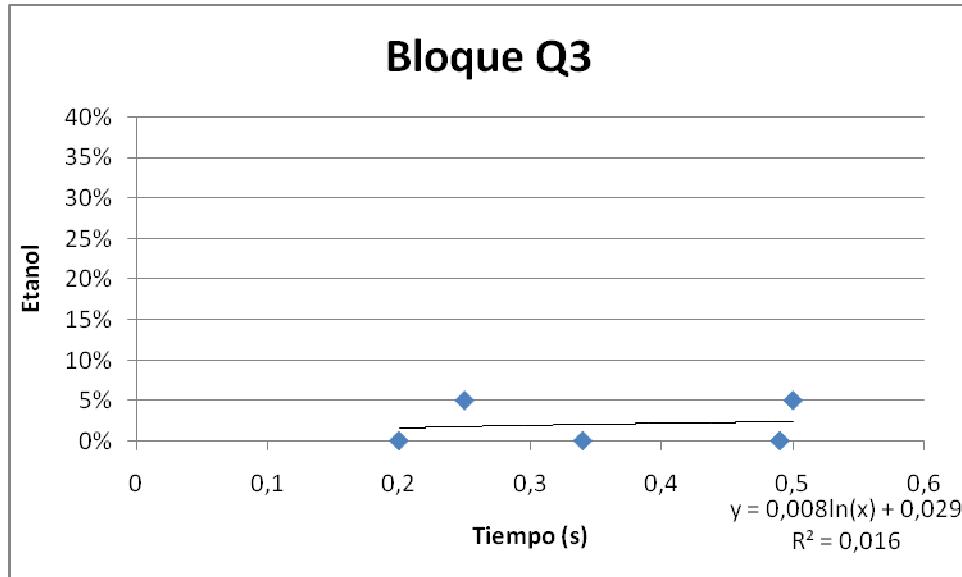
Gráfica 3: Horizonte O, bloque control 3.



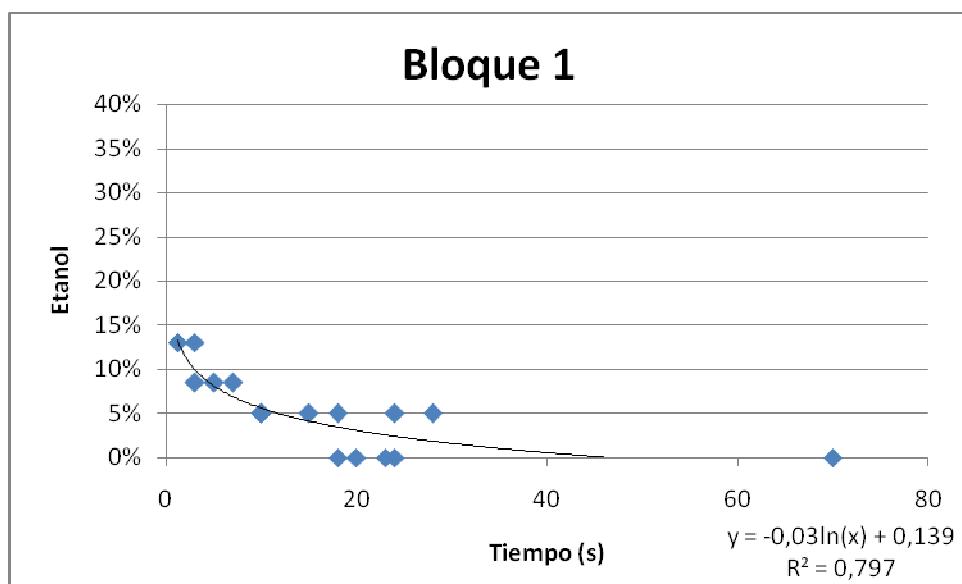
Gráfica 4: Horizonte O, bloque quemado 1.



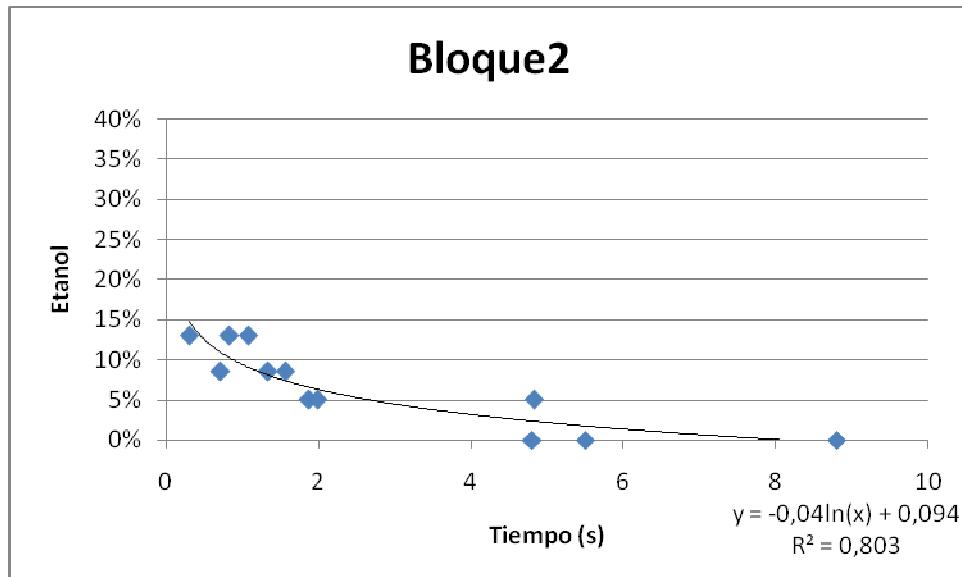
Gráfica 5: Horizonte O, bloque quemado 2.



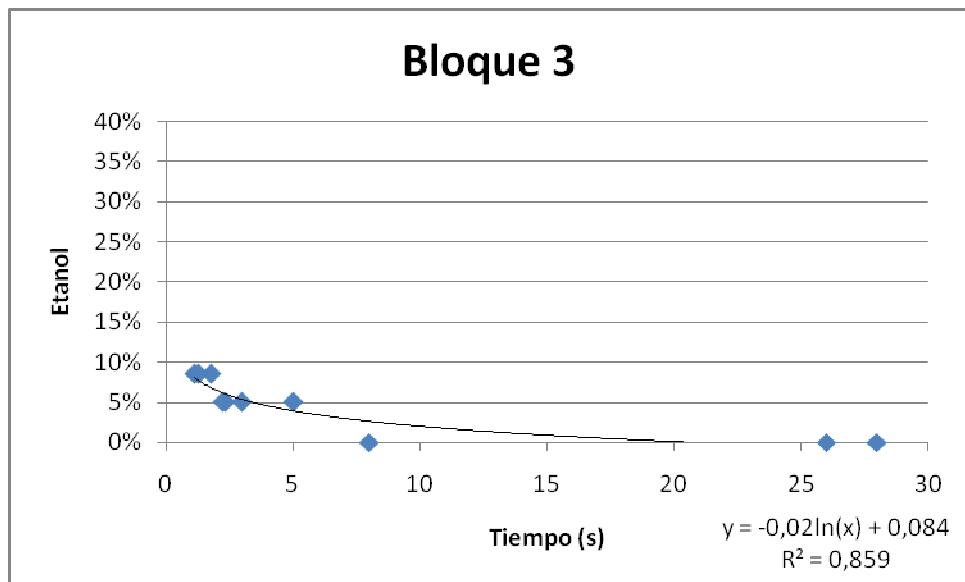
Gráfica 6: Horizonte O, bloque quemado 3.



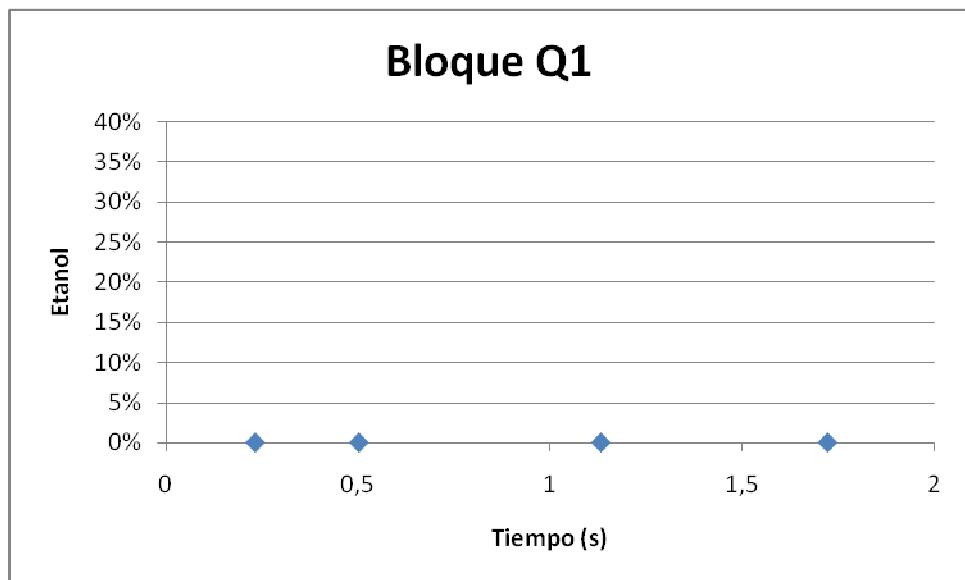
Gráfica 7: Ah 1 cm. Bloque control 1.



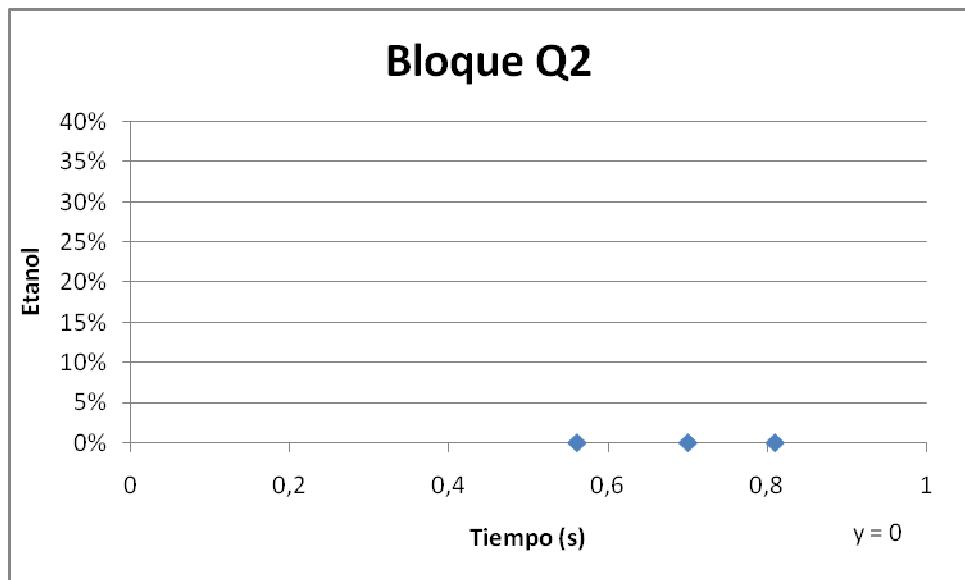
Gráfica 8: Ah 1 cm. Bloque control 2.



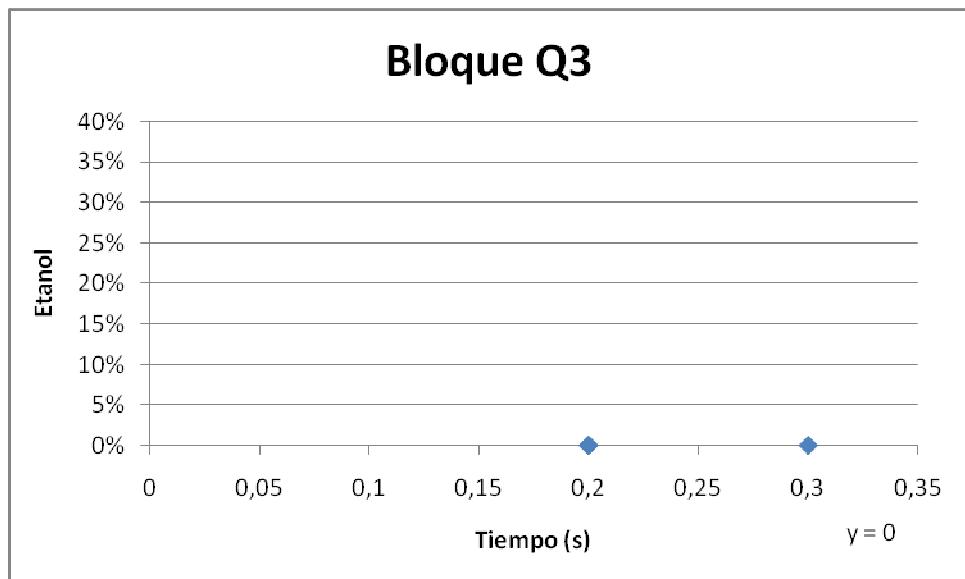
Gráfica 9: Ah 1cm. Bloque control 3.



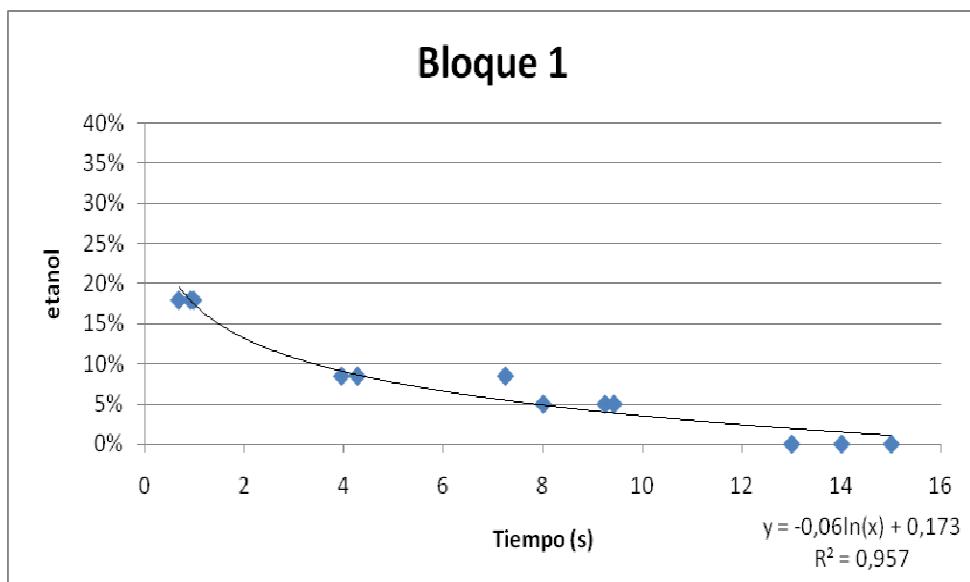
Gráfica 10: Ah 1cm. Bloque quemado 1.



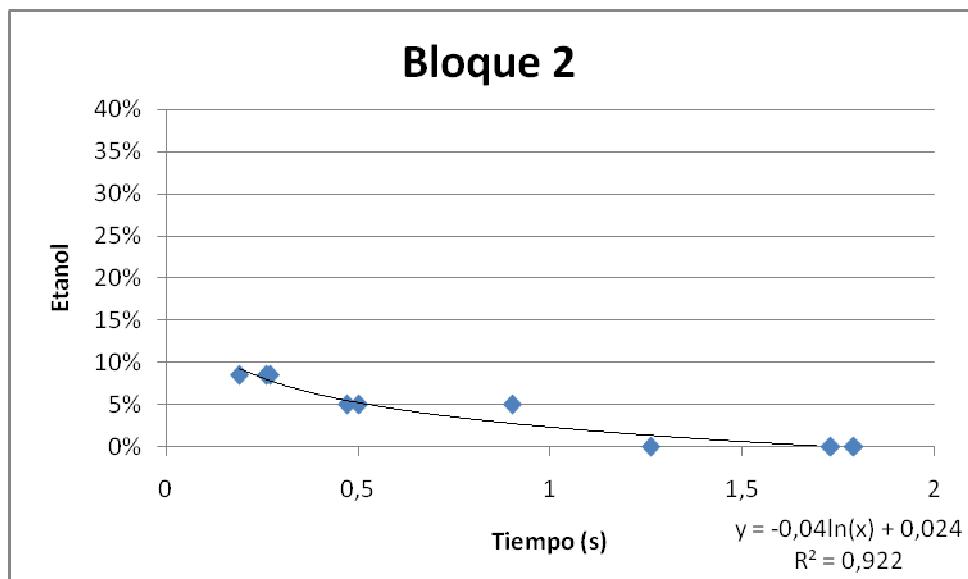
Gráfica 11: Ah 1cm. Bloque quemado 2.



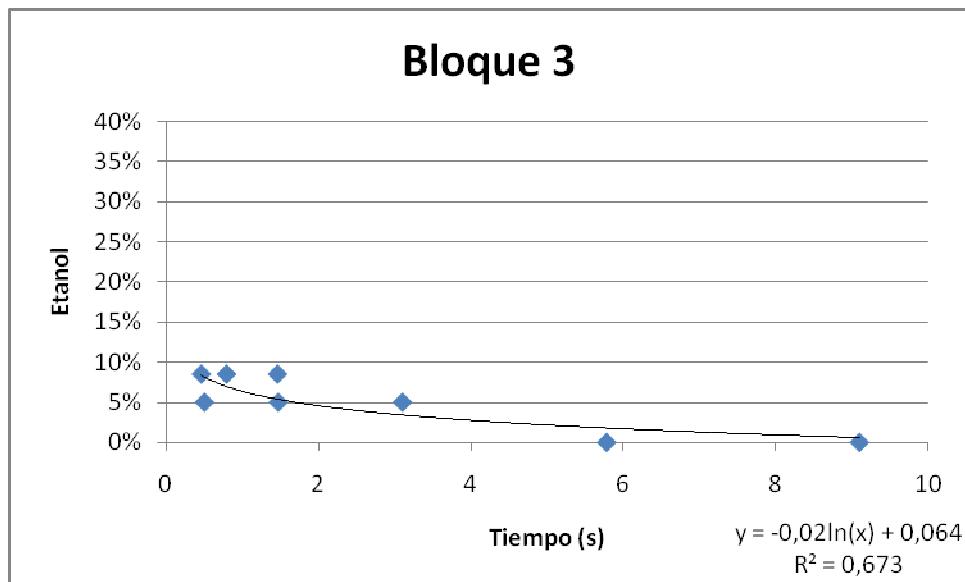
Gráfica 12: Ah 1cm. Bloque quemado 3.



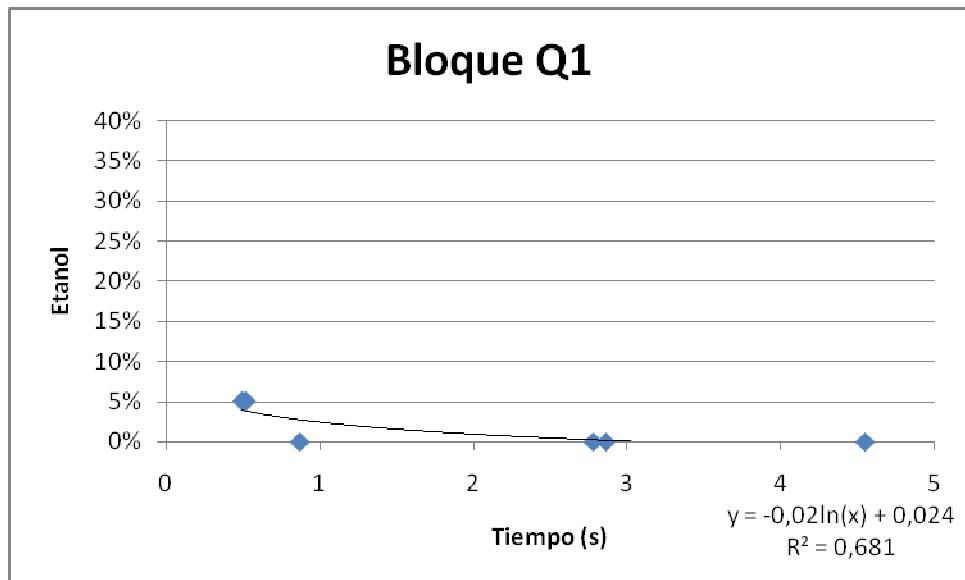
Gráfica 13: Ah 2cm .Bloque quemado 1.



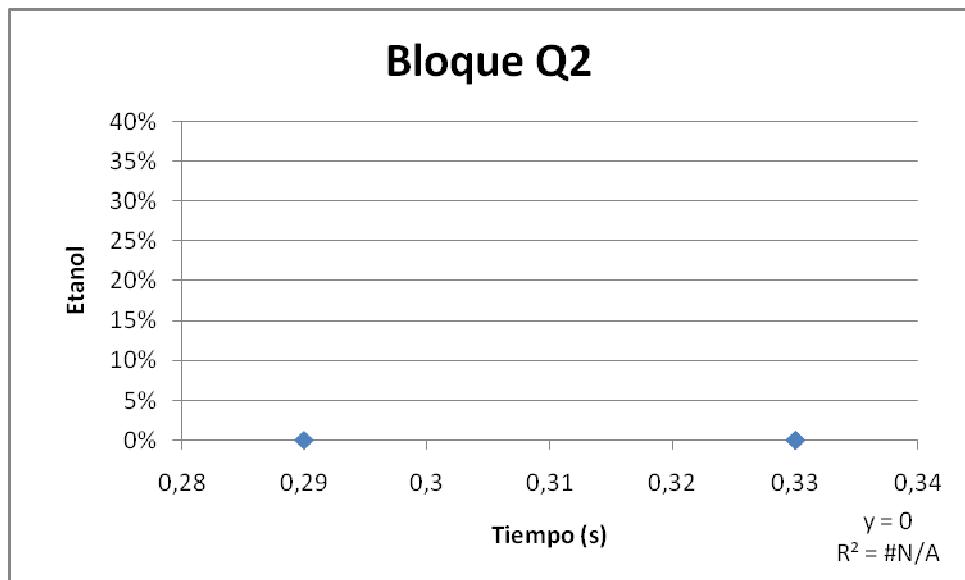
Gráfica 14: Ah 2cm. Bloque control 2.



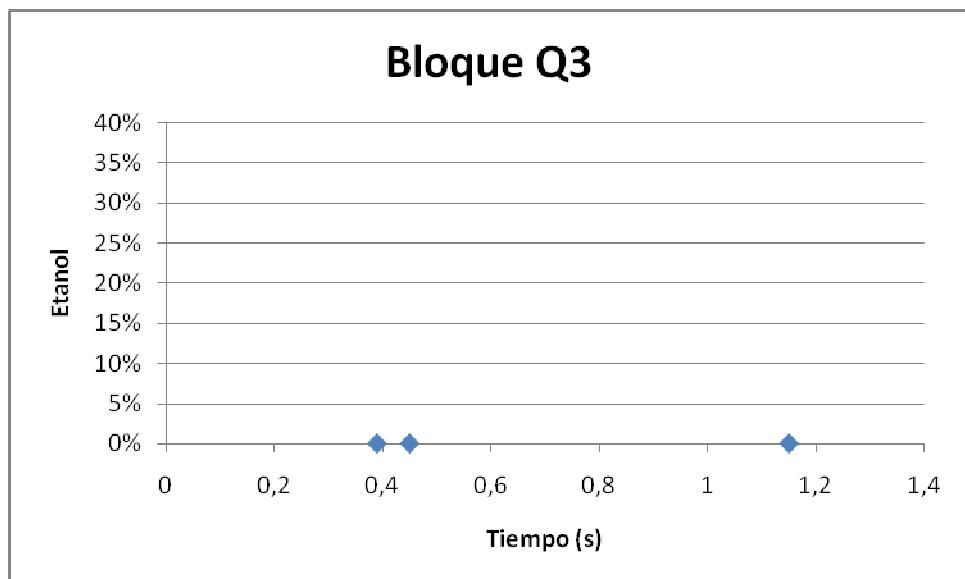
Gráfica 15: Ah 2cm. Bloque control 3.



Gráfica 16: Ah 2cm. Bloque quemado 1.



Gráfica 17: Ah 2cm. Bloque quemado 2.



Gráfica 18: Ah 2cm. Bloque quemado 3.

### 8.3. Densidad Aparente:

BLOQUE		ÁREA (cm2)	ESPESOR(cm)	VOLUMEN(cm3)	PESO(gr)	DENSIDAD(gr/cm3)
1	Horizonte 0	265,625	0.857	227.64	44.5	0.1955
	Da 1cm	265,625	1	265,625	116.73	0.443
	Da 2 cm	265,625	1	265,625	131,33	0,49
	Da 3 cm	265,625	1	265,625	226	0,85
2	Horizonte 0	499.5	0.3857	192.66	20.7	0,11
	Da 1cm	499.5	1	499.5	212.18	0.425
	Da 2 cm	499.5	1	499,5	295,02	0,59
	Da 3 cm	499.5	1	499,5	398	0,80
3	Horizonte 0	348	0.5	174	30.47	0.175
	Da 1cm	348	1	348	167.59	0.4815
	Da 2 cm	348	1	348	217,04	0,62
	Da 3 cm	348	1	348	338	0,97
Q1	Horizonte 0	326.25	0.664	216.63	29.43	0.136
	Da 1cm	326.25	1	326.25	162.76	0.499
	Da 2 cm	326.25	1	326,25	216,19	0,66
	Da 3 cm	326.25	1	326,25	328	1,01
Q2	Horizonte 0	367.5	0.664	244.02	34.95	0.143
	Da 1cm	367.5	1	367.5	215.89	0.587
	Da 2 cm	367.5	1	367,5	265,08	0,72
	Da 3 cm	367.5	1	367,5	475	1,29
Q3	Horizonte 0	258.65	0.664	174.33	21.63	0.124
	Da 1cm	339.25	1	339.25	197.13	0.58
	Da 2 cm	339.26	1	339,25	266,04	0,78
	Da 3 cm	339.27	1	339,25	381	1,12

#### 8.4. Elementos gruesos:

<b>BLOQUE</b>		<b>Tierra fina</b>	<b>Elementos gruesos</b>	<b>% E.G.</b>
1	Horizonte 0	41,87	2,49	5,95
	1cm			13,79
	2 cm	124,77	6,2	4,97
	3 cm	209	17	8,13
2	Horizonte 0	20,27	0,2	0,99
	1cm	199,58	11,13	5,58
	2 cm	271,79	22,75	8,37
	3 cm	388	7	1,80
3	Horizonte 0	30,69	0,19	0,62
	1cm	154,51	13,12	8,49
	2 cm	188,03	27,11	14,42
	3 cm	301	35	11,63
Q1	Horizonte 0	28,27	0,12	0,42
	1cm	141,56	19,87	14,04
	2 cm	206,2	8,74	4,24
	3 cm	318	8	2,52
Q2	Horizonte 0	29,27	0,09	0,31
	1cm	189,41	14,56	7,69
	2 cm	255,85	7,8	3,05
	3 cm	467	6	1,28
Q3	Horizonte 0	26,97	0,29	1,08
	1cm	172,6	10,69	6,19
	2 cm	240,74	22,98	9,55
	3 cm	355	24	6,76

### 8.5 .Estabilidad estructural:

<b>BLOQUE</b>		<b>M1</b>	<b>W</b>	<b>M2</b>	<b>M3</b>	<b>SAS (%)</b>
1	Horizonte 0	-	-	-	-	-
	Da 1cm	4,02	2,62	6,19	3,08	87,36
	Da 2 cm	3,06	3,18	6,01	3,47	91,7
	Da 3 cm	3,07	4,01	6,79	4,75	87,55
2	Horizonte 0	-	-	-	-	-
	Da 1cm	4,01	2,64	6,18	3,1	86,76
	Da 2 cm	4,02	3,11	6,32	3,34	78,63
	Da 3 cm	2,63	4,03	6,25	3,96	84,81
3	Horizonte 0	-	-	-	-	-
	Da 1cm	4,01	2,65	6,3	3	90,16
	Da 2 cm	3,97	3,08	6,78	3,43	92,54
	Da 3 cm	2,64	4,04	6,41	4,47	87,78
Q1	Horizonte 0	-	-	-	-	-
	Da 1cm	3,01	2,91	5,84	3,6	96,55
	Da 2 cm	3,94	2,93	6,64	3,23	93,68
	Da 3 cm	2,61	4,05	6,38	4,92	83,91
Q2	Horizonte 0	-	-	-	-	-
	Da 1cm	3,99	2,65	6,42	3,4	93,21
	Da 2 cm	4,01	2,66	6,04	2,73	84,01
	Da 3 cm	2,62	4	6,24	4,32	83,48
Q3	Horizonte 0	-	-	-	-	-
	Da 1cm	4,01	3,1	6,96	3,8	95,47
	Da 2 cm	4	2,65	6,27	2,98	89,65
	Da 3 cm	2,62	4,05	6,36	4,54	85,45

<b>BLOQUE</b>		<b>M1</b>	<b>W</b>	<b>M2</b>	<b>M3</b>	<b>SAS (%)</b>
1	Horizonte 0	-	-	-	-	-
	Da 1cm	4,02	2,64	6,27	3,12	88,98
	Da 2 cm	3,11	3,09	6	3,48	92,65
	Da 3 cm	2,62	4,06	6,4	4,91	84,18
2	Horizonte 0	-	-	-	-	-
	Da 1cm	4,01	3,11	6,65	3,45	87,19
	Da 2 cm	4	3,13	6,12	3,3	73,63
	Da 3 cm	3,06	4	6,69	3,91	88,25
3	Horizonte 0	-	-	-	-	-
	Da 1cm	4	3,12	6,77	3,54	90,22
	Da 2 cm	3,8	3,11	6,64	3,47	92,15
	Da 3 cm	2,61	4	6,33	3,97	89,39
Q1	Horizonte 0	-	-	-	-	-
	Da 1cm	2,99	2,63	5,53	3,1	96,43
	Da 2 cm	4	2,62	6,39	2,91	93,80
	Da 3 cm	3,07	4,04	6,82	4,78	87,55
Q2	Horizonte 0	-	-	-	-	-
	Da 1cm	3,92	2,73	6,46	3,62	93,73
	Da 2 cm	4,02	3,18	6,64	3,37	85,38
	Da 3 cm	3,08	4,05	6,73	4,13	86,67
Q3	Horizonte 0	-	-	-	-	-
	Da 1cm	3	3,09	6,02	3,79	96,96
	Da 2 cm	4	2,91	6,52	3,22	89,43
	Da 3 cm	2,61	4	6,27	4,19	85,95

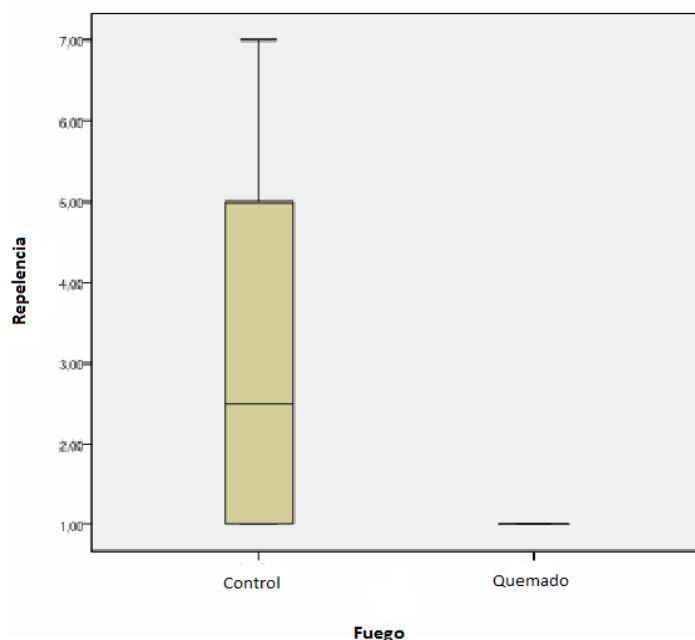
<b>BLOQUE</b>		<b>SAS (%)</b>	<b>SAS (%)</b>	<b>SAS (media)</b>
1	Horizonte 0	-	-	
	Da 1cm	87,36	88,98	88,17
	Da 2 cm	91,70	92,65	92,17
	Da 3 cm	87,55	84,18	85,87
2	Horizonte 0			
	Da 1cm	86,76	87,19	86,98
	Da 2 cm	78,63	73,63	76,13
	Da 3 cm	84,81	88,25	86,53
3	Horizonte 0			
	Da 1cm	90,16	90,22	90,19
	Da 2 cm	92,54	92,15	92,35
	Da 3 cm	87,78	89,39	88,59
Q1	Horizonte 0			
	Da 1cm	96,55	96,43	96,49
	Da 2 cm	93,68	93,80	93,74
	Da 3 cm	83,91	87,55	85,73
Q2	Horizonte 0			
	Da 1cm	93,21	93,73	93,47
	Da 2 cm	84,01	85,38	84,69
	Da 3 cm	83,48	86,67	85,07
Q3	Horizonte 0			
	Da 1cm	95,47	96,96	96,21
	Da 2 cm	89,65	89,43	89,54
	Da 3 cm	85,45	85,95	85,70

**8.6: Resultados TOC.**

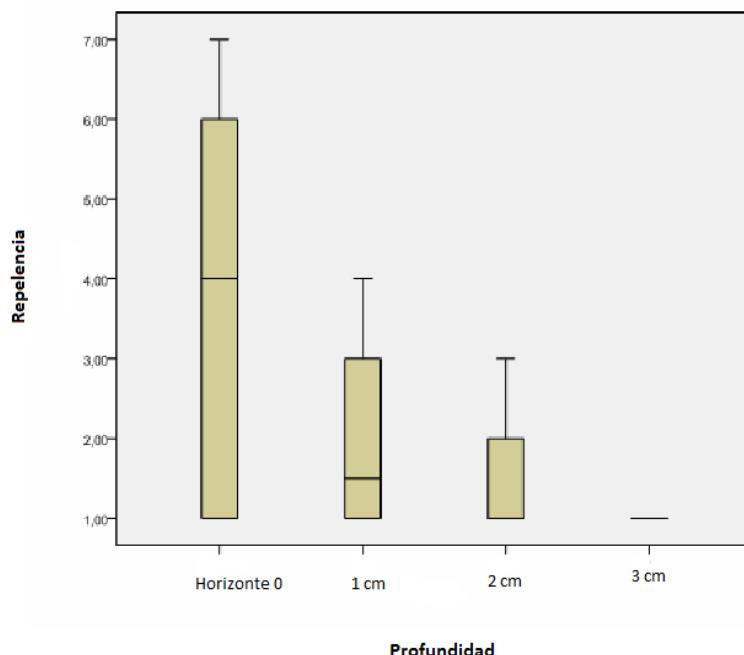
Registro	Muestra	Nº muestra	Carbono inorgánico (%)	Carbono orgánico total (%)	Carbono total (%)
SU-05372	J1CO	1	1.1	21.1	22.3
SU-05373	J1C1	2	3.2	7.5	10.7
SU-05374	J1C2	3	3.6	5.2	8.8
SU-05375	J1C3	4	3.3	5.4	8.7
SU-05376	JQ1CO	5	3.5	7.2	10.7
SU-05377	JQ1C1	6	3.5	4.8	9.1
SU-05378	JQ1C2	7	3.8	4.8	8.6
SU-05379	JQ1C3	8	3.1	3.4	6.4
SU-05380	J2CO	9	2.9	16.7	19.6
SU-05381	J2C1	10	3.9	5.4	9.3
SU-05382	J2C2	11	3.4	4.4	7.8
SU-05383	J2C3	12	2.7	2.3	5.0
SU-05384	JQ2CO	13	3.1	4.3	7.5
SU-05385	JQ2C1	14	3.2	2.5	5.7
SU-05386	JQ2C2	15	2.5	1.9	4.4
SU-05387	JQ2C3	16	1.6	1.5	3.1
SU-05388	J3CO	17	1.5	21.7	23.2
SU-05389	J3C1	18	3.4	6.3	9.7
SU-05390	J3C2	19	3.5	5.1	8.7
SU-05391	J3C3	20	3.6	2.9	6.5
SU-05392	JQ3CO	21	4.6	2.7	7.3
SU-05393	JQ3C1	22	4.6	1.9	6.5
SU-05394	JQ3C2	23	4.3	3.1	7.4
SU-05395	JQ3C3	24	3.8	3.2	7.0
SU-05396	JB1C3	25	4.1	13.8	17.9
SU-05397	JB2C3	26	4.5	12.3	16.8
SU-05398	JB3C3	27	4.7	10.7	15.4
SU-05399	JB4C3	28	4.0	11.9	15.9
SU-05400	JB5C3	29	4.3	9.7	14.0
SU-05401	JB6C3	30	5.1	8.8	13.9

### 8.7. Gráficas de los resultados obtenidos:

- Hidrofobicidad:

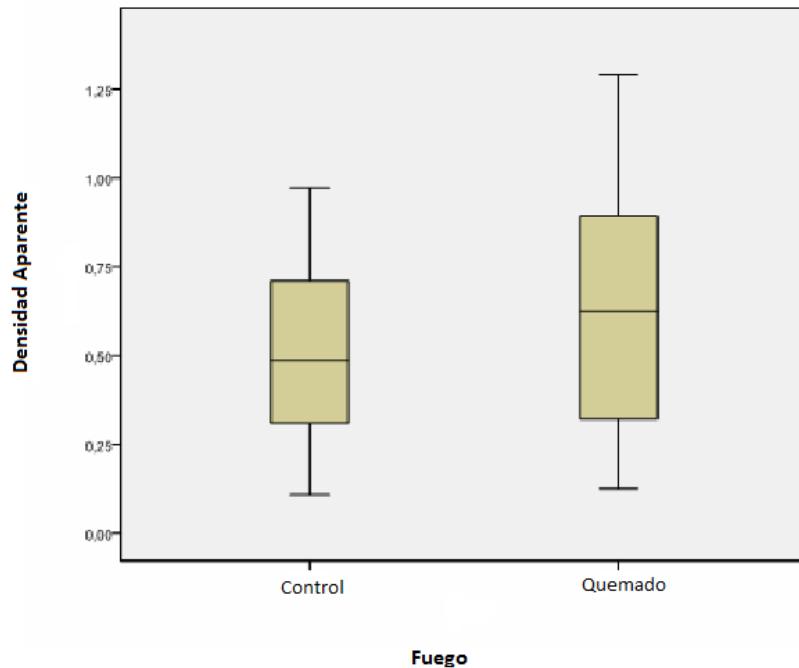


*Gráfica 1: relación de los datos control y quemado con respecto a la hidrofobicidad del agua.*

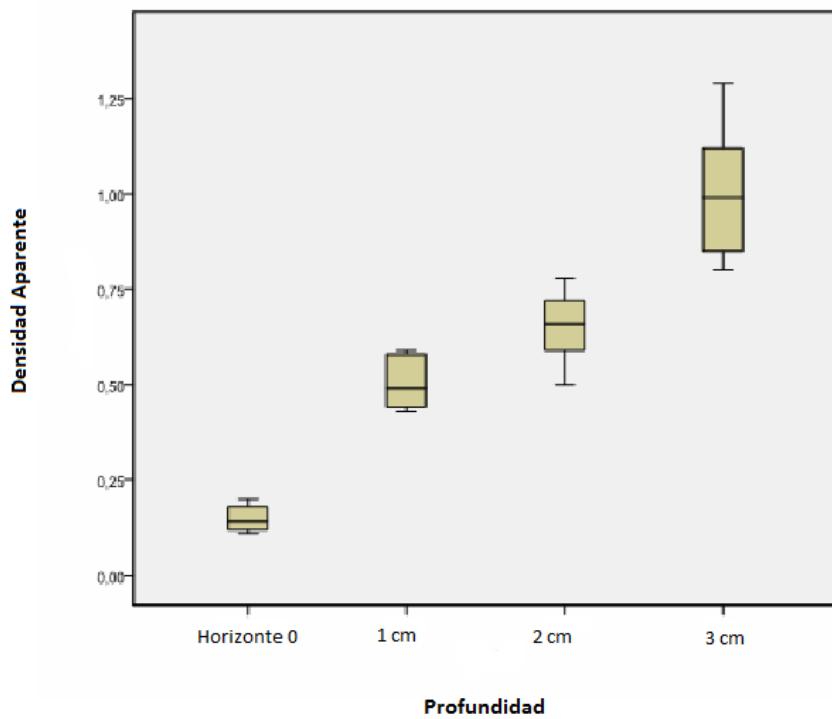


*Gráfica 2: Relación de las diferentes profundidades con la hidrofobicidad del suelo.*

- Densidad aparente:

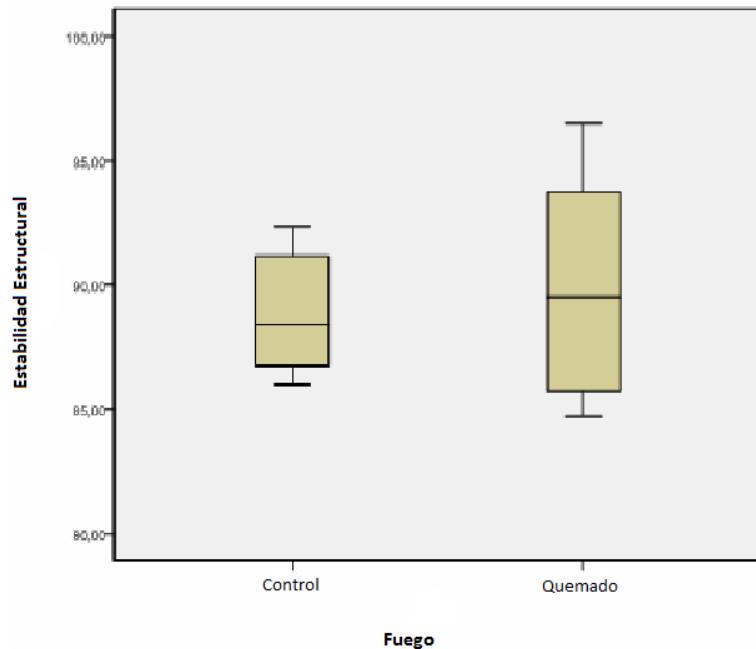


*Gráfica 3: relación de los datos control y quemado con respecto la densidad del suelo.*

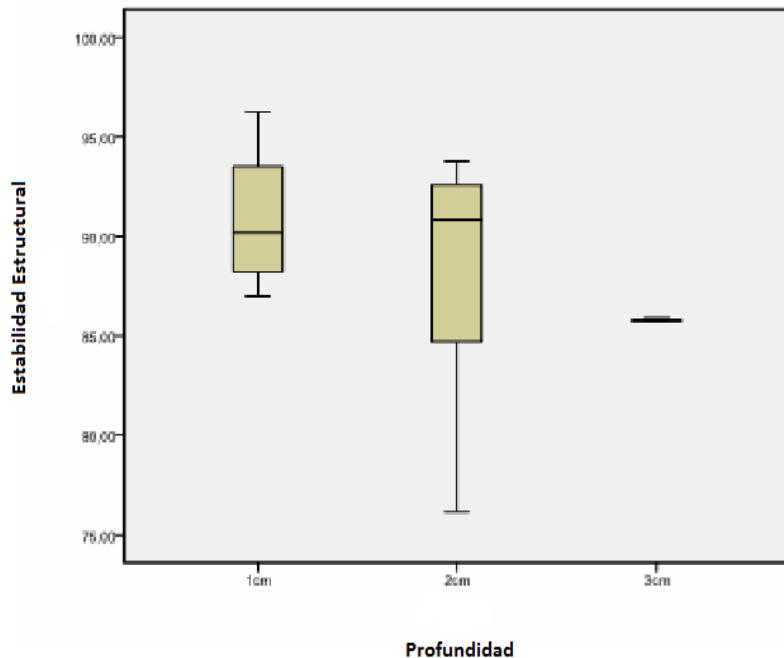


*Gráfica 4: Relación de las diferentes profundidades con la densidad del suelo.*

- Estabilidad estructural:

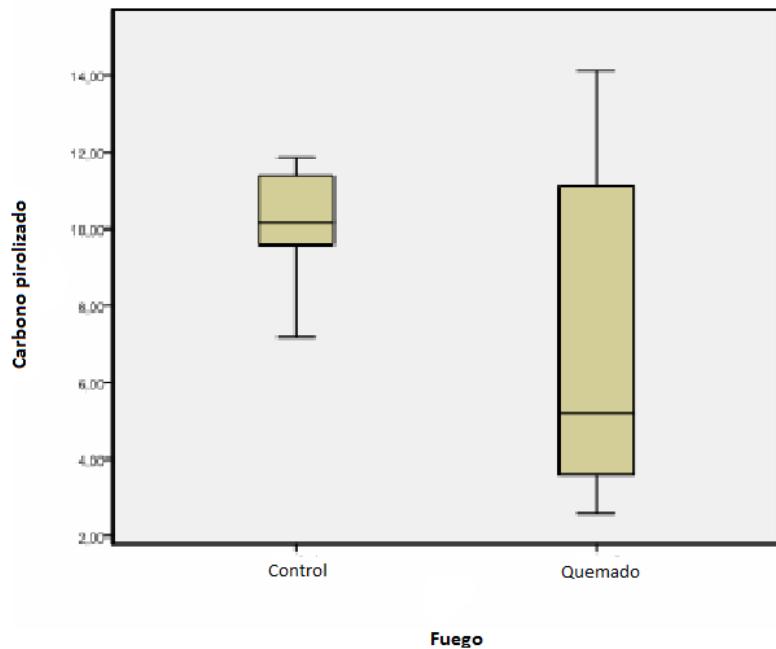


*Gráfica 5: Relación de las diferentes profundidades con la estabilidad estructural.*

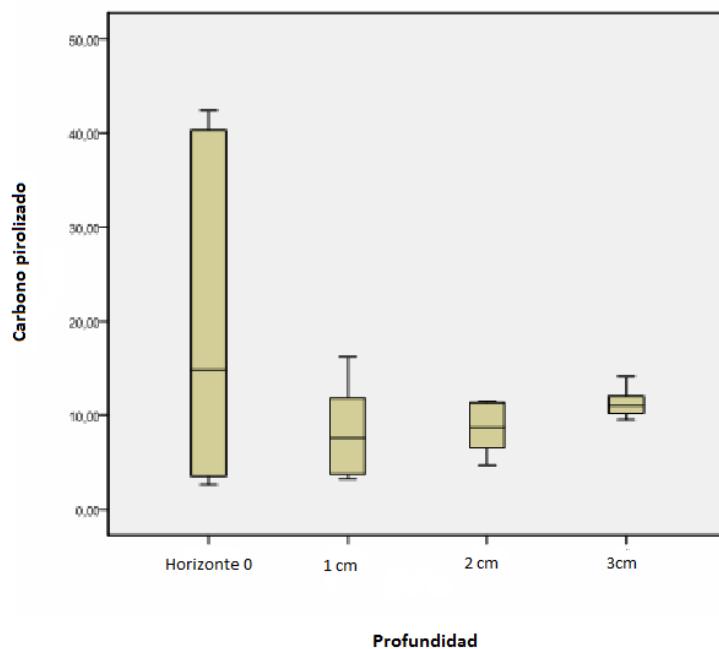


*Gráfica 6: relación de los datos control y quemado con respecto la estabilidad estructural.*

- *Carbono pirolizado:*

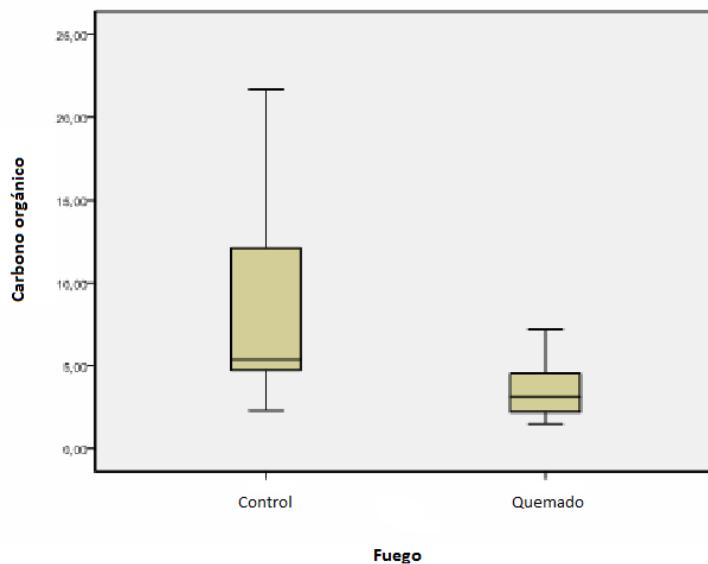


Gráfica 7: Relación de los datos control y quemado con respecto al Carbono pirolizado.

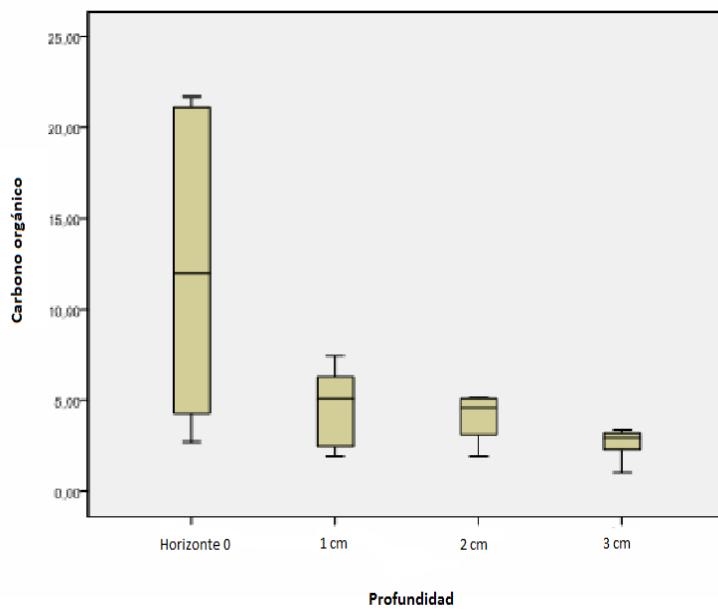


Gráfica 8: Relación de las diferentes profundidades con el Carbono pirolizado.

- Carbono orgánico:

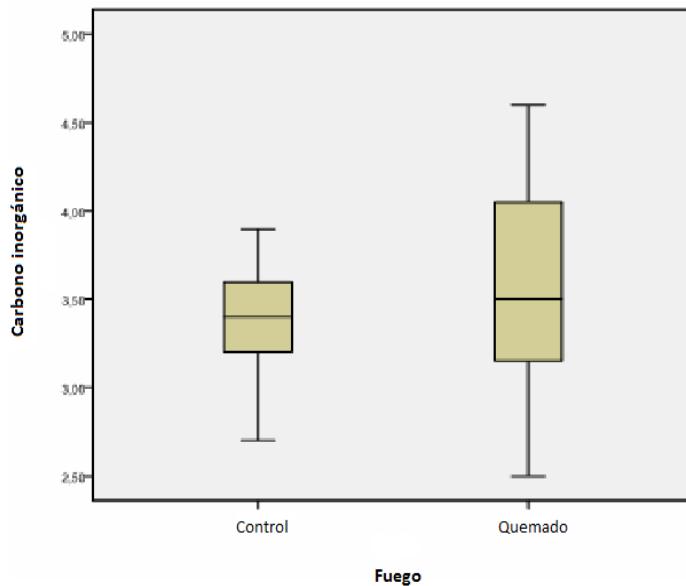


*Gráfica 9: relación de los datos control y quemado con respecto al Carbono orgánico.*

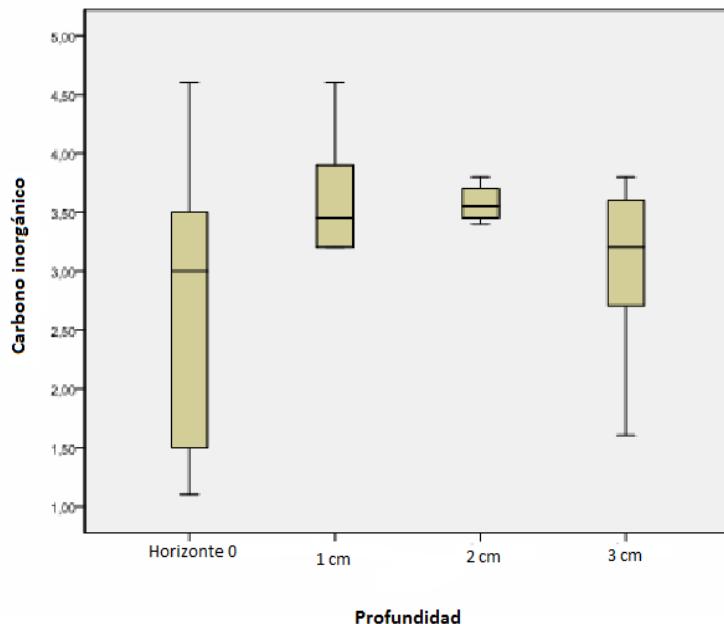


*Gráfica 10: Relación de las diferentes profundidades con el carbono orgánico.*

- Carbono inorgánico:



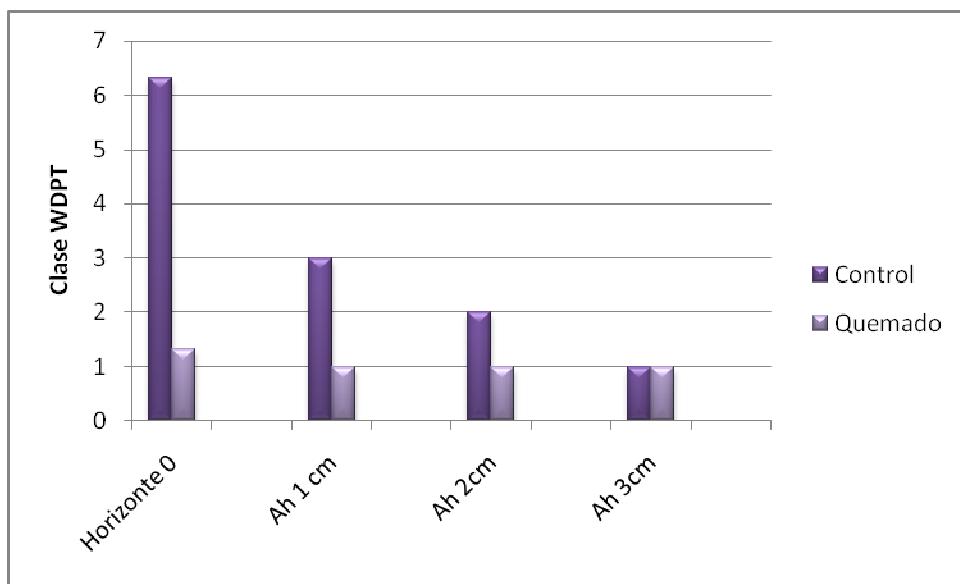
*Gráfica 11: relación de los datos control y quemado con respecto al carbono inorgánico.*



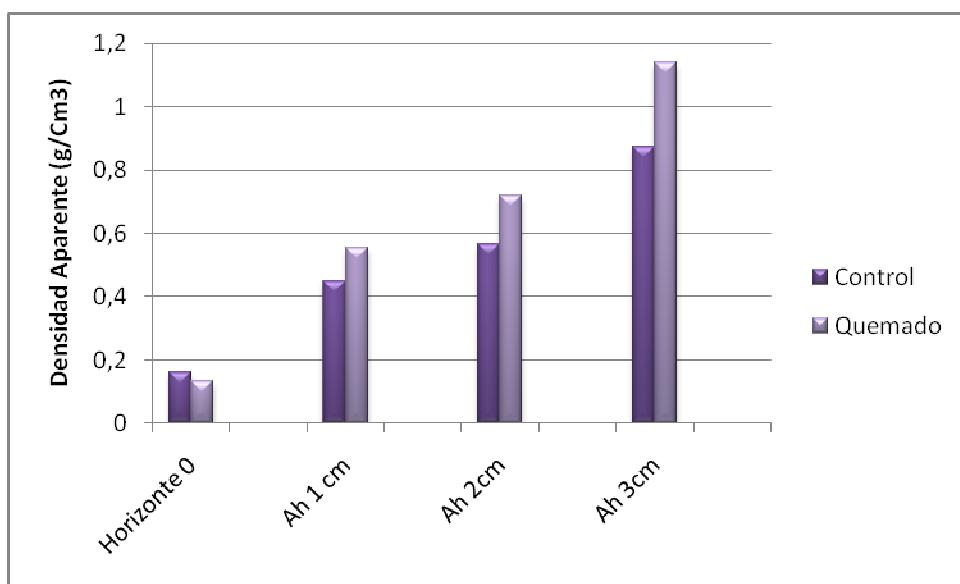
*Gráfica 12: Relación de las diferentes profundidades con el carbono inorgánico.*

### 8.8. Gráficas resumen de datos:

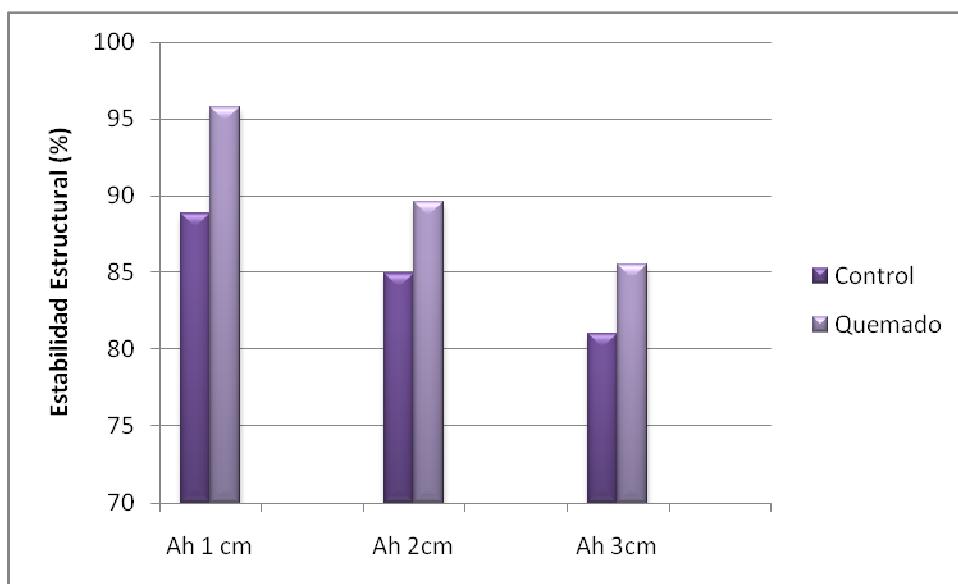
- Hidrofobicidad:



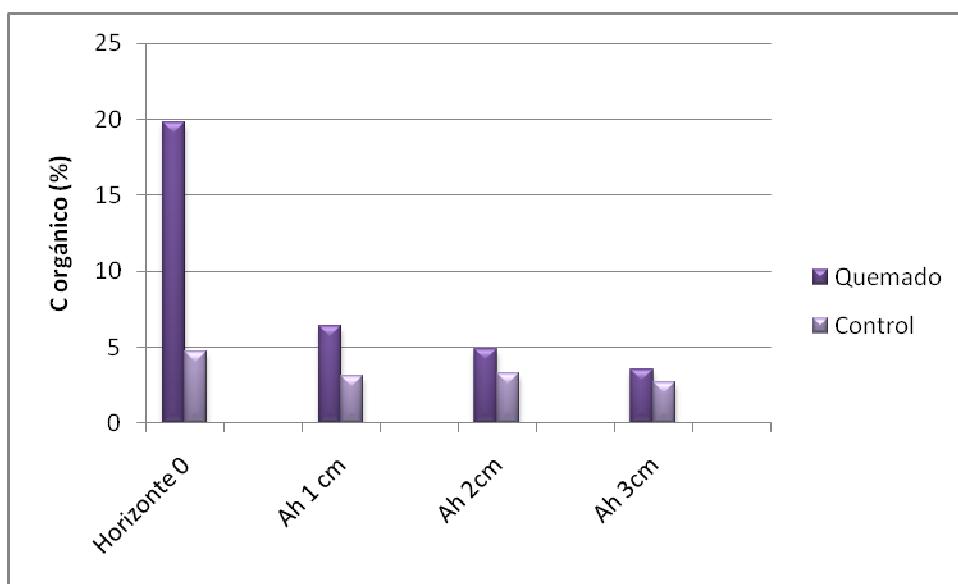
- Densidad Aparente:



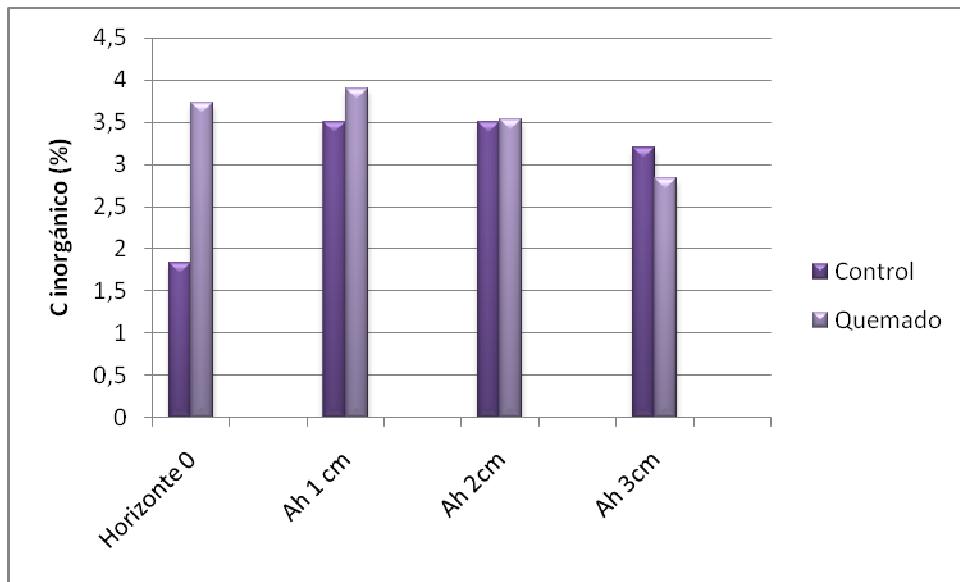
- Estabilidad estructural:



- Carbono orgánico::



- Carbono inorgánico:



- Carbono pirolizado:

