



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ciencias Ambientales

Efectos de la composición y la humedad de un suelo en la transmisión de calor durante quemas controladas.

Effects of composition and moisture of soil in heat transfer during controlled burns.

Autor

Sergio López García

Director

David Badía Vilas

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

2021

Agradecimientos

Gracias a las siguientes personas, por las cuales ha sido posible este trabajo.

- Al Dr. David Badía Villas, director de este trabajo, por su inmensa paciencia y tolerancia en estos años y por su amabilidad.
- A Antonio Girona García y Oriol Ortiz Perpinyá por la colaboración durante la recogida de muestras en las Ripas de Lupiñén.
- A mis amigos, Itziar y Raúl, por acompañarme a la recogida de muestras en el Pinar de Zuera y animarme a terminarlo.
- Y, sobre todo, a mis padres por apoyarme y animarme.

Gracias a todos.

Resumen

Las quemas prescritas tratan de efectuarse en condiciones que minimicen los efectos directos sobre el suelo. Una de estas condiciones es el alto contenido de humedad del combustible en la hojarasca y en el propio suelo, que debería limitar la transferencia de calor con la profundidad del suelo. También se sabe que los componentes del suelo (contenido de materia orgánica, porosidad, etc.) pueden afectar a esta transferencia. Precisamente, el objetivo de este trabajo es averiguar cómo se ve afectada la transferencia de calor en dos suelos de composición contrastada (horizontes ócricos versus móllicos) y diferente humedad (seco al aire *versus* suelo húmedo en capacidad de campo). Se tomaron muestras cuidadosamente de nueve monolitos inalterados de dos suelos distintos de la capa superior del suelo del campo con un cilindro (15 cm de diámetro x 6,5 cm de profundidad) y se transportaron cuidadosamente al laboratorio. Se secaron al aire tres bloques de cada suelo inalterado hasta peso constante en el laboratorio y otros tres se humedecieron hasta alcanzar la capacidad de campo antes de quemarlos, los tres restantes son el control. Luego, cada monolito se quemó individualmente en un túnel de combustión al aire libre con un soplete (10 cm de diámetro) colocado a 0,4 metros sobre cada bloque de suelo inalterado. La temperatura se midió continuamente (cada 5 segundos) con termopares tipo K (1 mm de diámetro) colocados en cuatro niveles: en la superficie del horizonte Ah, y a 1, 2 y 3 cm de profundidad. La llama se mantuvo encendida durante 15 'y se registró la temperatura hasta que el suelo se enfrió (~ 120'). Se han calculado la temperatura máxima (T_{max}) y la intensidad de carbonización (CI).

Entre los resultados obtenidos, es destacable como tanto la T_{max} como la CI son significativamente más bajas ($P < 0.0001$) en suelos húmedos que en suelos secos; el horizonte ócrico alcanza valores más altos ($P = 0.0100$) de T_{max} y CI y en capas más profundas que el móllico. La interacción de "humedad del suelo x profundidad del suelo" fue altamente significativa tanto para T_{max} como para CI, mientras que la interacción "humedad del suelo x tipo de suelo" también fue altamente significativa para CI, lo que sugiere que CI podría ser un parámetro más sensible que T_{max} . En conclusión, el alto contenido de humedad del suelo, variable para cada tipo de suelo estudiado, ralentiza la transferencia de calor al suelo.

Palabras clave: Humedad edáfica, tunes de quema, intensidad de quema, temperatura, Regosol vs Phaeozem.

Abstract

Prescribed burnings are conducted under conditions that minimize the direct effects on soil. One of these conditions is the high soil moisture content in fuel, litter and soil, which should limit the heat transfer with soil depth. It is also known that the components of soil (organic matter content, porosity, etc.) can affect this transfer. The aim of this work is to find out how soil moisture influences the heat transfer on two contrasted topsoils (ochric versus mollic horizons) and different humidity (air-dry versus field capacity). Nine unaltered monoliths per topsoil were carefully sampled from two different soils with a still cylinder (15 cm diameter x 6.5 cm depth) from the field and transported in closed containers to the laboratory. Three blocks of each undisturbed soil were air-dried until constant weight in the laboratory and other three were moistened to field capacity before burning, the remaining three are the control. Every monolith was then burned individually in an outdoor combustion tunnel applying thermal shock with a blowtorch (10 cm diameter) placed 0.4 meters over each unaltered soil block. Temperature was continuously measured (every 5 seconds) with type-K thermocouples (1 mm diameter) placed at four levels: in the Ah horizon surface, and at 1, 2 and 3 cm depths. The flame was kept on during 15' and the temperature recorded until soil cooling (~120'). The maximum temperature (T_{max}) and the charring intensity (CI) have been calculated.

Among the results obtained, it is remarkable how both, T_{max} and CI, are significantly lower ($P < 0.0001$) in moist soils than dried ones; the ochric horizon reaches higher ($P = 0.0100$) T_{max} and CI values and at deeper layers than the mollic one. The interaction of "soil moisture x soil depth" was highly significant for both T_{max} and CI, while the interaction "soil moisture x topsoil type" was also highly significant for CI, suggesting CI could be a more sensitive parameter than T_{max} . In conclusion, high soil moisture content slows the heat transfer into the soil.

Key words: soil moisture, tunnel burning, charring intensity, temperature, Regosol vs Phaeozem

Contenido

Agradecimientos	2
Resumen.....	3
Abstract.....	4
Contenido.....	5
1 Introducción.....	7
1.1 Antecedentes históricos.....	7
1.2 Quemas controladas e incendios forestales.....	15
1.3 Parámetros de un incendio forestal o quema controlada.....	16
2 Objetivos	17
2.1 Objetivo general	17
2.2 Objetivos específicos:.....	18
3 Metodología.....	18
3.1 Proceso experimental:.....	18
3.2 Muestras.....	19
3.2.1 Áreas de estudio	19
3.2.2 Método de muestreo.....	20
3.3 Montaje del ensayo	21
3.4 Método	23
3.4.1 Temperaturas y tiempo.....	23
3.4.2 Preparación de las muestras	24
3.4.3 Análisis	25
4 Resultados y discusión.....	26
4.1 Datos y análisis:.....	26
4.1.1 Temperaturas máximas alcanzadas.....	26
4.1.2 Índice de quema a 100° (CI100).....	29
4.1.3 Índice de quema a 200° (CI200).....	31
4.1.4 Índice de quema a 300° (CI300).....	33
4.1.5 Densidad aparente.....	36
4.1.6 Densidad corregida	41
4.1.7 Hidrofobicidad (WDPT)	44
4.1.8 Hidrofobicidad (EPT)	47
4.1.9 Carbonatos.....	49

4.1.10	Carbono inorgánico(mineral):.....	51
4.1.11	Carbono oxidable (orgánico).....	54
4.1.12	Carbono total:.....	57
4.1.13	Nitrógeno total:.....	60
4.1.14	pH al agua 1:2.5.....	63
4.1.15	pH al agua 1:5.....	65
4.1.16	Conductividad eléctrica.....	68
5	Conclusiones.....	71
6	Bibliografía.....	72
7	Anexos.....	75
7.1	Índice de Ilustraciones	75
7.2	Índice de Tablas.....	75
7.3	Índice de Gráficos	77
7.4	Índice de Fotografías.....	79

1 Introducción

1.1 Antecedentes históricos

Son muchos los autores que han estudiado cómo se comportan los suelos ante un incendio forestal.

Sin embargo, la metodología no está estandarizada y cada autor se ingenia su ensayo, por ejemplo sustituyendo la llama de un incendio por lámparas de infrarrojos (Cancelo González et al., 2004), o una resistencia eléctrica (Abu-Hamdeh and Reeder, 2000), o aplicando calor con un soplete (De Luis et al., 1997; Llovet et al., 2008) y otros utilizan material vegetal como combustible para simular un incendio forestal (Hernando Lara et al., 2004; Madrigal et al., 2014). También los hay que realizan quemas en parcelas, utilizando la misma vegetación que tiene el suelo como combustible (Llinares Palacios, 2001; Mataix Solera, 1999)

También se ha estudiado como afectan las temperaturas a las distintas partes de un suelo (Busse et al., 2014; Mataix-Solera et al., 2007).

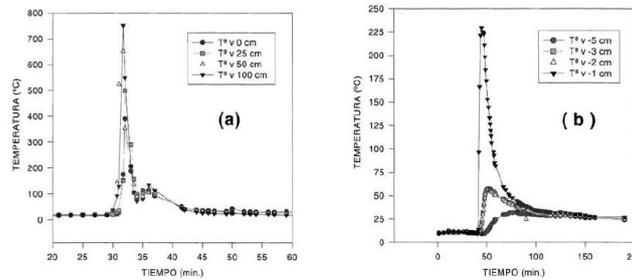


Gráfico 1: a) Ejemplo de las temperaturas registradas en la parte aérea vs tiempo; b) Ejemplo de las T registradas en la parte subterránea vs tiempo. Fuente: De Luis, M.(De Luis et al., 1997)

Registros de temperatura de Jorge Mataix Solera (Mataix Solera, 1999)

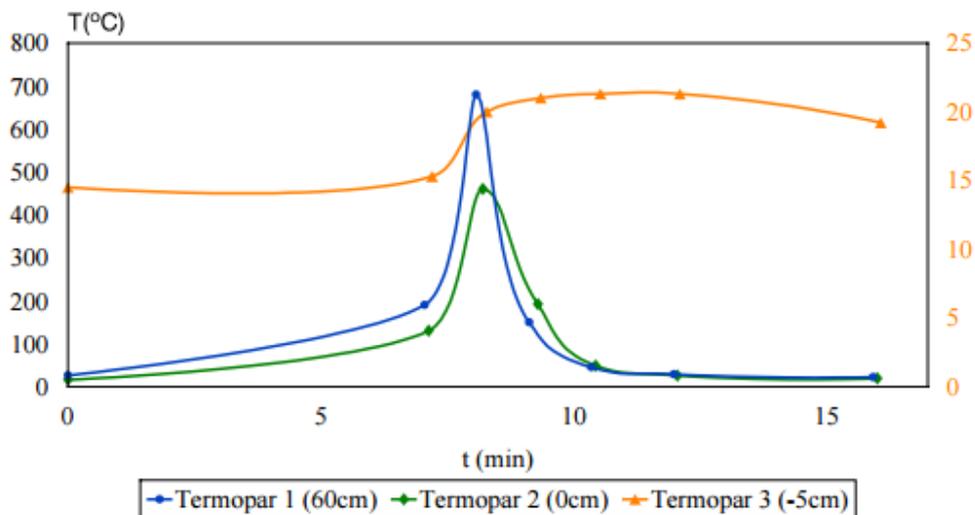


Gráfico 2: Registro de temperatura respecto al tiempo. Grupo 1.(Mataix Solera, 1999)

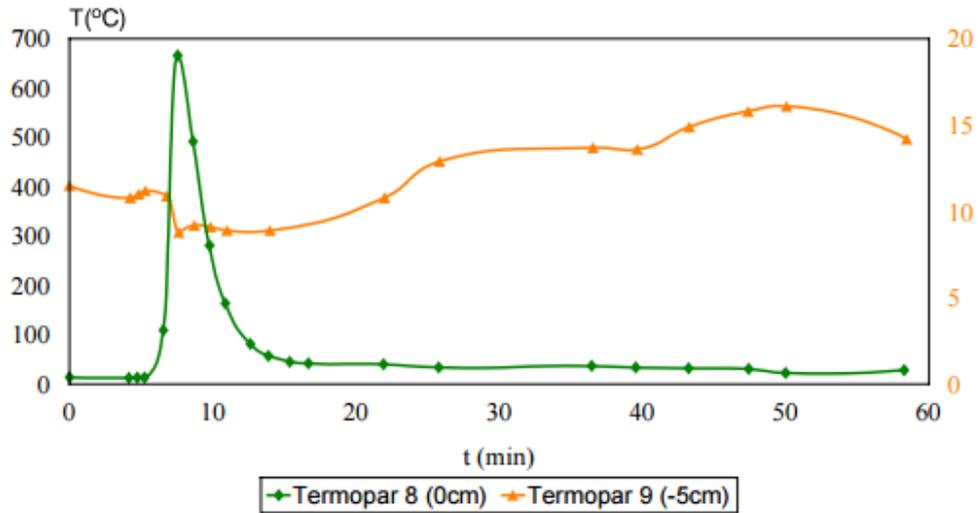


Gráfico 3: Registro de temperatura respecto al tiempo. Grupo 2. (Mataix Solera, 1999)

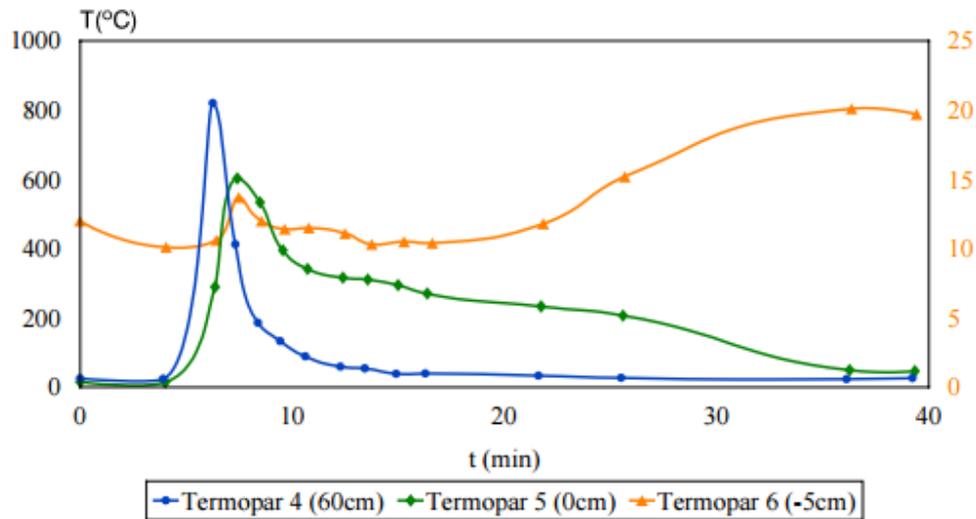


Gráfico 4: Registro de temperatura respecto al tiempo. Grupo 3. (Mataix Solera, 1999)

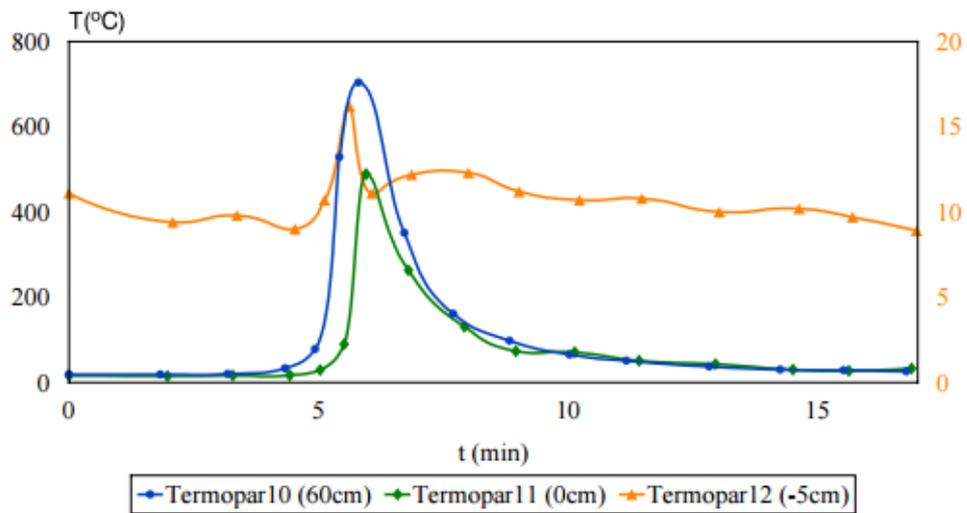


Gráfico 5: Registro de temperatura respecto al tiempo. Grupo 4. (Mataix Solera, 1999)

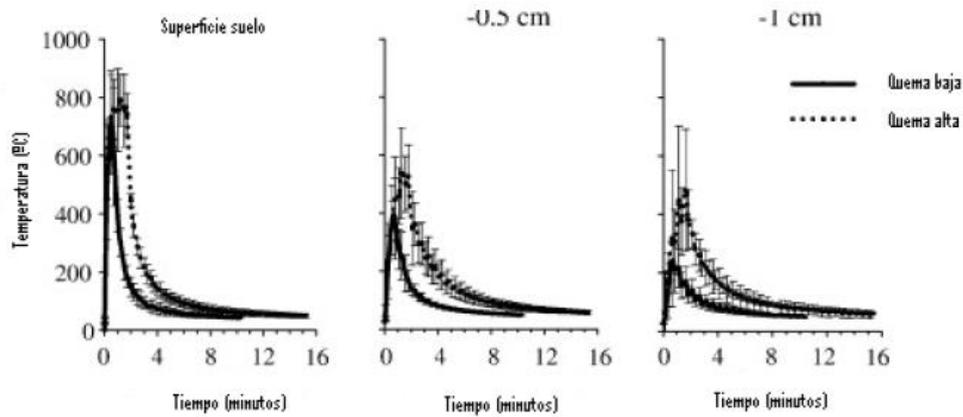


Gráfico 6: Temperaturas registradas en monolitos de suelos bajo quema controlada (valores medios y las desviaciones estándar) por Llovet et al. (2008) (Llovet et al., 2008) Fuente: María Conesa Puente (Conesa Puente, 2012)

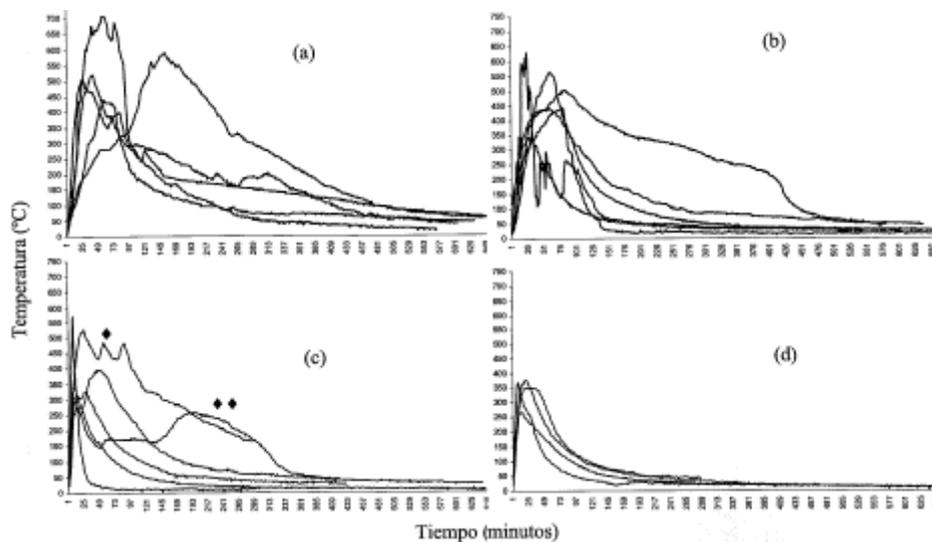


Gráfico 7: Las curvas de temperatura-tiempo obtenidas en suelos con distintas cargas de biomasa y densidades aparentes. Fuente: Tesis "Efectos de la intensidad y evolución a corto plazo de las propiedades físicas, erosionabilidad, humedad y temperatura del suelo" del autor: Josep Vicent Llineres Palacios (Llineres Palacios, 2001) Capítulo 3.

(Cancelo González et al., 2004) registran temperaturas de hasta 450°C en su artículo: "Estudio de la erosión y de la composición química de la escorrentía generada en suelos sometidos a quemas controladas y simulaciones de lluvia en laboratorio"

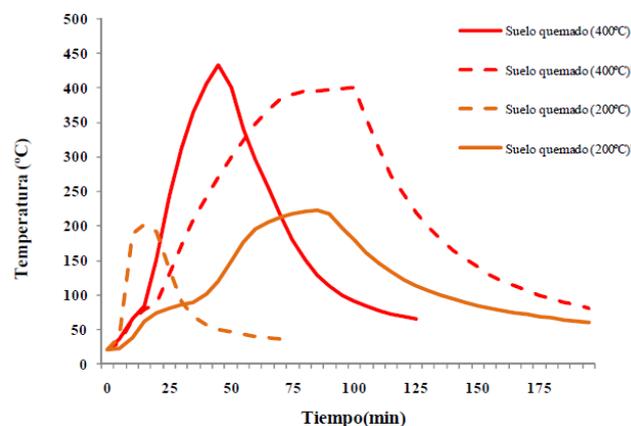


Gráfico 8: Curvas de calentamiento de las muestras durante las quemas (lamparas infrarojas) controladas en laboratorio. (Cancelo González et al., 2004)

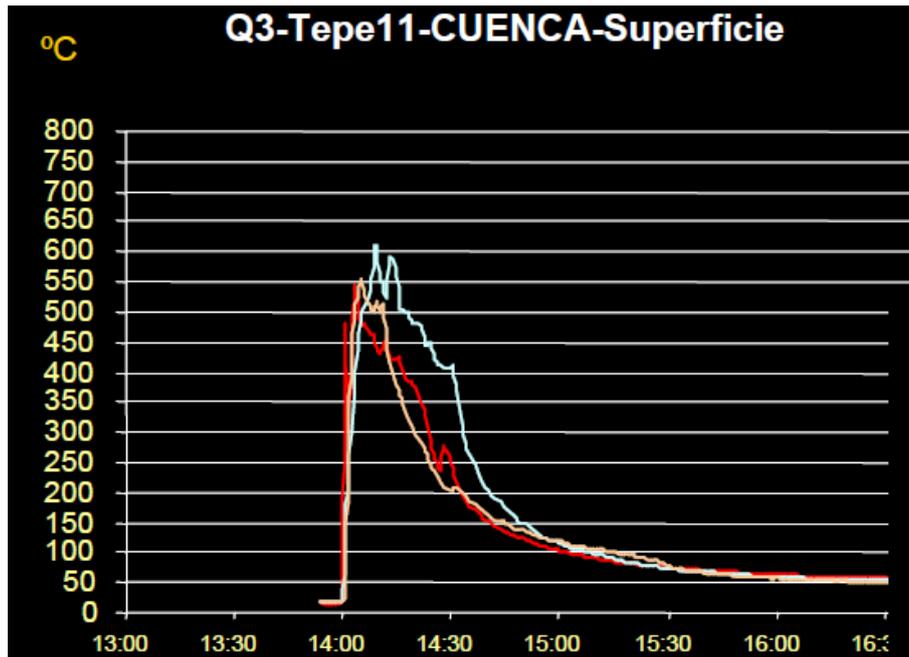


Gráfico 9: Curva de Tiempo-temperatura del laboratorio de incendios forestales para el estudio de afectación del banco de semillas y al suelo por un incendio. Fuente: laboratorio de incendios forestales CIFOR-INIA (Hernando Lara et al., 2004; Madrigal et al., 2014)

Temperaturas durante la quema

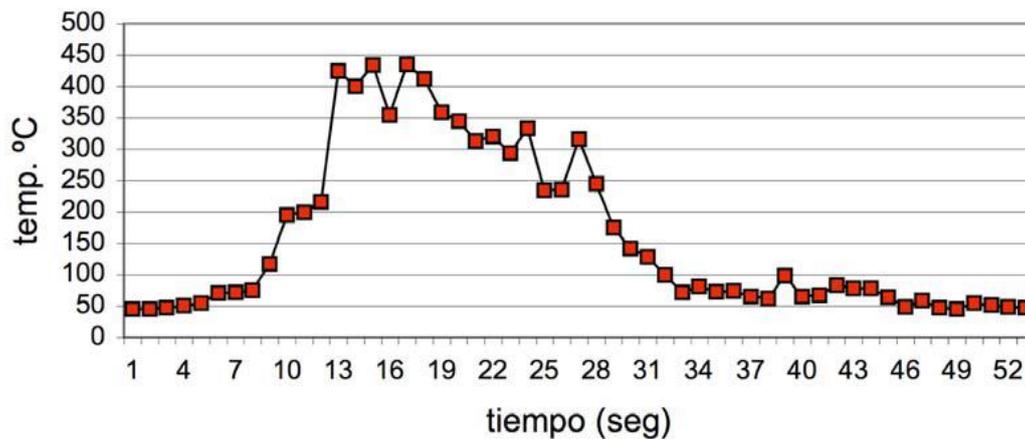


Gráfico 10: Registro de temperatura durante una quema, por Xavier Úbeda y Luis Outeiro (Mataix-Solera et al., 2007; Úbeda and Outeiro, 2007)

Resumen cronológico de diferentes estudios donde se recogen temperaturas del suelo en incendios forestales, elaborada por Úbeda (2000) y actualizada por Mataix-Solera (2001):

Autor (año)	Temp. °C	Profundidad (cm)	Tipo de vegetación
Heyward (1938)	135	0.32-0.64	Pinar
Cook (1939)	550	Superficie	Prado
Beadle (1940)	250	2.5	Bosque denso
	105	7.5	
	60	15	
Sampson (1944)	538	Superficie	Garriga
	149	3.8	
Masson (1949)	700	Superficie	Sabana

Autor (año)	Temp. °C	Profundidad (cm)	Tipo de vegetación
Ugla (1958)	438	Superficie	Bosque de coníferas
	27	3	
	17	7	
Bentley & Fenner (1958)	590	Superficie	Garriga
	399	1	
Bentley & Fenner (1958)	177	Superficie	Prado
	93	1.3	
Ugla (1960)	1150	Superficie	Pinar
	500	3	
Humphreys & Lambert (1965)	900	Superficie	Eucaliptos
	100	5	
Smith & Sparling (1966)	400-200	Superficie	Matorral
Floyd (1966)	510	Superficie	Bosque denso
	44		
Cromer (1966)	666	Superficie	Eucaliptos
	112		
Tothill & Shaw (1968)	245	Superficie	Prado
	68	1.3	
DeBano & Rice (1971)	716	Superficie	Bosque denso (por la tarde)
	166	2.5	
	66	5	
	316	Superficie	Bosque denso (por la noche)
	66	2.5	
43	7.6		
Agee (1973)	93	Superficie	Pinar
Dunn & DeBano (1977)	800	Superficie	Matorral
	500	1	
Trabaud (1979)	250	Superficie	Coscojar
	125	2.5	
	50	5	
DeBano et al. (1979)	700-250	Superficie	Garriga
	200-90	2.5	
Wells (1979)	250	Superficie	Diferentes tipos ceniza negra
	100	2	
Wells (1979)	500-750	Superficie	Diferentes tipos ceniza blanca
	350-450	2	
	150-300	3	
	<100	5	
Biederbeek et al. (1980)	388-442	Superficie	Rastrojos
Rasmussen et al. (1986)	170-330	Superficie	Trigo
Ventura et al. (1994)	700	Superficie	Pinar
	300	15	
Sánchez et al. (1994)	340	Superficie	Pinar
	740	Superficie	Estepa
	280	Superficie	Gramíneas
	51	Superficie	Sin vegetación
Luchessi et al. (1994)	180	Superficie	Matorral
	50	2.5	

Autor (año)	Temp. °C	Profundidad (cm)	Tipo de vegetación
	475	Superficie	Matorral poco denso
	90	2.5	
	40	5	
Úbeda (1998)	600	Superficie	Prado
	50	1	
Mataix-Solera (1999)	702	Superficie	Aulagar (<i>Ulex parviflorus</i>)
	22	5	

Tabla 1: Temperaturas del suelo en incendios forestales. Fuente: Mataix Solera (2007)(Mataix-Solera et al., 2007)

Más datos de temperaturas y tiempo de residencia de las mismas:

Soil depth	Maximum temperature (°C)	Duration (min)			
		<100 °C	100–200 °C	200–300 °C	>300 °C
O horizon	804.2 ± 118.2	76.0 ± 2.8	11.6 ± 2.8	1.5 ± 0.7	17.5 ± 9.2
1 cmAh	272.9 ± 21.7	43.0 ± 10.1	37.3 ± 18.5	26.3 ± 6.8	
2 cmAh	132.4 ± 44.4	81.0 ± 35.9	25.7 ± 22.3		

Tabla 2: Temperaturas máximas (°C) y persistencia (min) del rango de temperaturas (media y desviación estándar) usadas para describir el régimen térmico en tres puntos de medición (O-Ah horizonte de superficie, Ah horizonte 1 cm y Ah horizonte 2 cm) de monolitos quemados(Aznar et al., 2016)

Las temperaturas alcanzadas deberían variar según la humedad que tengan los suelos, así cuanto más humedad tengan menos temperatura se alcanzará (Busse et al., 2014). Como vemos en el trabajo de Busse et al, 2014 a una misma cantidad de un combustible los comportamientos térmicos varían con la humedad.

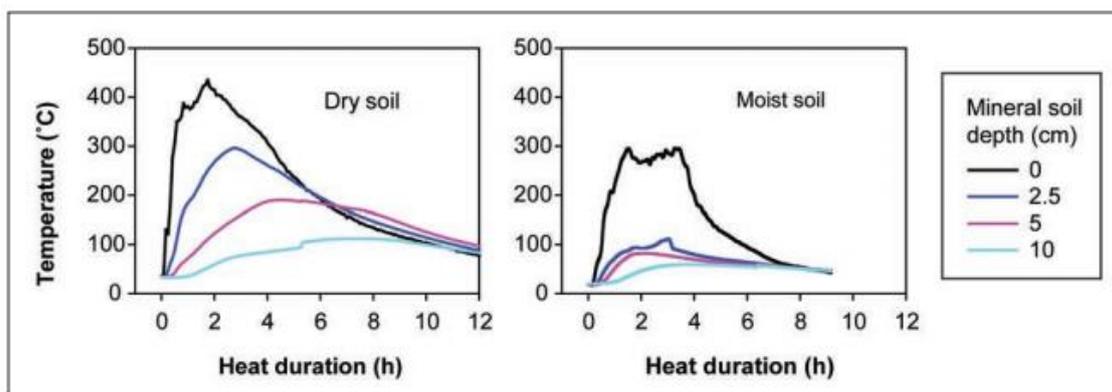


Figure 15—Heat pulse in dry versus moist soil during burning of masticated fuels. Soil moisture contents are 5 percent for dry soil and 27 percent for moist soil. Only soil moisture was varied, as experimental conditions included the same fuel loading (169 Mg ha⁻¹), fuel consumption, and soil type. Adapted from Busse et al. 2005.

Ilustración 1: Diferencia de comportamiento en función de la humedad de un suelo. (Busse et al., 2014)

Por esta razón probaremos a realizar las quemas de las muestras con la variable humedad presente: Muestras secas y muestras a capacidad de campo.

El agua del suelo, es el factor de control de la transferencia de calor considerados como el más importante. La penetración del calor es sustancialmente inferior en muestras húmedas que en muestras secas. El principio básico es que el agua incrementa la capacidad calorífica del suelo, resultando en una disminución de la energía calorífica que soporta el suelo al desviarse la energía aportada por el fuego hacia la evaporación del agua que el suelo

contiene. En consecuencia, aunque el calor viaja más rápido en suelo húmedo que en suelo seco, basado en los principios de conductividad térmica, su movimiento está restringido por el efecto de extinción de energía del agua (Busse et al., 2014).

La intensidad de fuego es un parámetro puramente físico que se mide durante el trascurso de un incendio. Un buen indicador del calor desprendido por el fuego es el tiempo que el sistema está por encima de una temperatura elevada (tiempo de residencia). Una forma alternativa de obtener una información similar es poniendo antes de la quema contenedores metálicos con una cantidad de agua conocida, y cuantificar el agua remanente después del paso del fuego, el agua evaporada es un indicador del tiempo de residencia y calor desprendido.(G. Pausas, 2012)

La severidad de un incendio es un parámetro biológico que se refiere al impacto del fuego en un organismo o ecosistema. Se mide después del trascurso del incendio y es dependiente de la especie o ecosistema en cuestión.(G. Pausas, 2012)

Como afecta al suelo la temperatura*1:

Soil property	Threshold (°C)	Source
Low		
Microbial death:		
Bacteria	50 to 400	Hungerford et al. 1991
Nitrifying bacteria	75 to 140	DeBano et al. 1977
Vesicular arbuscular mycorrhizae	94	Klopatek et al. 1988
Seed mortality	50 to 150	Beadle 1940
Fine-root mortality	40 to 70	Zeleznik and Dickman 2004
Soil water loss	60 to 100	Hungerford 1991
Moderate		
Particle aggregation (e.g., clay conversion to sand)	200 to 500	Terefe et al. 2008
Carbon and organic matter oxidation	200 to 500	Raison et al. 1985
Nitrogen volatilization	300 to 500	Hungerford et al. 1991
Soil structure and aggregate stability loss	300	
Amino acid loss	350	Hungerford et al. 1991
Water repellency	>270 to 300	DeBano and Krammes 1966
Ectomycorrhizal fungi death	100 to 155	Dunn et al. 1985
High		
Nutrient volatilization:		
Potassium	775	Raison et al. 1985
Phosphorus	775	Raison et al. 1985
Calcium	1240 to 1485	Raison et al. 1985
Manganese	1960	Raison et al. 1985

Soil property	Threshold (°C)	Source
Magnesium	1107	DeBano 1991
Sulfur	375 to 900	Tiedemann 1987
Clay structure transformed or destroyed	>550	Certini 2005, Douglas 1986, Ketterings et al. 2000
*1Estos valores no son absolutos y pueden variar en función de la heterogeneidad de los suelos en los sistemas naturales		

Tabla 3: Examples of threshold temperatures for soil physical, chemical, and biological properties. Busse, M. D., Hubbert, K. R. & Moghaddas, E. E. Y. Fuel Reduction Practices and Their Effects on Soil Quality. (Busse et al., 2014)

Temperatura y alteración:

Temperatura °C	Alteración
40-70	Degradación de proteínas y muerte de tejidos biológicos
48-54	Deshidratación de determinadas raíces o muerte
70-90	Muerte de determinadas semillas
50-121	Muerte de microorganismos edáficos
180-300	Destilación destructiva y combustión de alrededor del 85% del horizonte orgánico
200-250	Puede incrementarse la hidrofobicidad del suelo mineral
200-315	Comienza la destilación de la materia orgánica del suelo
270-300	Destrucción de la hidrofobicidad del suelo
200-400	Comienza la destilación de nutrientes (particularmente N)
>300	Los horizontes orgánicos superficiales del suelo son enteramente consumidos
420	Pérdidas de agua en los minerales de la fracción arcilla
≈450	Completo consumo de la materia orgánica
600	Máxima pérdida de fósforo y potasio, oxidación de enlaces metálicos
800	Oxidación de azufre
980	Cambios irreversibles en los minerales de la arcilla
1240	Volatilización del calcio

Tabla 4: Alteraciones en el suelo dependiendo de la temperatura alcanzada. Fuente Mataix et al. 2007 (Mataix-Solera et al., 2007)

Al realizar una búsqueda bibliográfica sobre las quemas prescritas y los incendios y las alteraciones del suelo destacan los siguientes trabajos, estudios, ensayos y artículos con relación directa con ello:

(De Luis et al., 1997) Análisis de las curvas de temperatura-tiempo en fuegos experimentales en aulagares de distintas edades: enfoque alternativo.

(Badía Villas et al., 2014) Changes in water repellency, aggregation and organic matter of a mollic horizon burned in laboratory: Soil depth affected by fire.

(Conesa Puente, 2012) Variaciones en profundidad de las propiedades de un suelo yesoso forestal bajo quema controlada.

(Altemir Codera, 2016) Efectos de las quemas prescritas en el estado del fósforo y en la actividad de la fosfomonoesterasa en suelos de Zuera y de Tella.

(Busse et al., 2014) Fuel Reduction Practices and Their Effects on Soil Quality

(Mataix-Solera and Guerrero, 2007) Efectos de los incendios forestales en las propiedades edáficas.

(Iglesias López, 1993) Efectos de los incendios forestales sobre las propiedades del suelo en un pinar de repoblación (pinus pinaster), en Arenas de San Pedro (Avila)

(Carballas Fernández, 2003) Los incendios forestales en Galicia.

1.2 Quemias controladas e incendios forestales

Las quemias controladas son, como su nombre indica, fuegos bajo supervisión y planificados. Se realizan, en época de bajo peligro de incendio, para hacer limpiezas de matorral y zonas boscosas, eliminando por acción del fuego el exceso de biomasa (combustible) que pudiera arder en época de elevado peligro de incendios. Es una forma de evitar incendios forestales.

Un incendio forestal es un incendio que afecta formaciones boscosas o tierras forestales, definidas como tales de acuerdo a la Ley Nacional Nº 13.273, de Defensa de la Riqueza Forestal. Según las ISO (International Standards Organization, 1987; (Drysdale, 1995)Cox, 1995) se define como un proceso de combustión, caracterizado por la emisión de calor acompañada de humo, llamas o ambos; también se define como combustión que se propaga de manera incontrolada en el tiempo y el espacio.

El término “incendios forestales” se refiere a los incendios que ocurren en los ecosistemas terrestres y que se propagan por la vegetación, sean bosques o de cualquier otro tipo. La rama de la ciencia que estudia el papel de los incendios en los organismos y los ecosistemas se llama ecología del fuego. (G. Pausas, 2012)

De forma general los incendios forestales se clasifican en tres tipos dependiendo de la zona del bosque que arda de manera que tenemos incendios de subsuelo, incendios de superficie e incendios de copa.(Zárate López, 2004) En el tema que nos ocupa nos centraremos en incendios forestales de superficie, ya que, las quemias prescritas y los incendios que afectan al suelo directamente son de este tipo.

A simple vista es muy obvio lo que ocurre en un incendio forestal: destrucción del ecosistema, emisión de humo, daños socioeconómicos y destrucción del paisaje entre otras cosas(García Romero, 2012) pero, ¿qué ocurre en un bosque incendiado a nivel edáfico y qué consecuencias tiene? Se han realizado trabajo que arrojan información sobre estas cuestiones como son:

- Impacto ecológico de los incendios forestales. (Martínez Sánchez et al., 1991)
- Análisis de las curvas de temperatura-tiempo en fuegos experimentales en aulagares de distintas edades: enfoque alternativo. (De Luis et al., 1997)
- Spatial variability of soil hydrophobicity in fire-prone eucalyptus and pine forest, Portugal. (Doerr et al., 1998)
- Fire's effects on ecosystems (DeBano et al., 1998)

- Alteraciones físicas, químicas y biológicas en suelos afectados por incendios forestales. Contribución a su conservación y regeneración (Mataix Solera, 1999)
- Thermal Properties of Soils as affected by Density and Water Content (Abu-Hamdeh, 2003)
- Temperaturas de quema y propiedades físicas y químicas de suelos de la Región Semiárida Pampeana Central (Hepper et al., 2008)

Entre otros.

Pero las quemas controladas, realizadas en épocas de humedad y frío y con una planificación y control deberían afectar de forma más moderada sobre el suelo. La humedad retarda la ignición de formas muy diversas, pero fundamentalmente actúa incrementando la capacidad de calor y la conductividad térmica del combustible. (Ruiz González and Vega Hidalgo, 2007)

Para responder esas preguntas y comprobar esta hipótesis se realiza este experimento en que se han extraído porciones edáficas de dos suelos distintos y sometidos a llamas, simulando un incendio y una quema prescrita. De forma que se ha analizado el comportamiento de los suelos bajo las llamas y los cambios físico-químicos después de las quemas.

1.3 Parámetros de un incendio forestal o quema controlada.

Las características físicas del frente de un incendio son: Velocidad de propagación, Intensidad lineal, Tiempo de residencia del frente de la llama, Temperatura. (Zárate López, 2004)

La temperatura, a pesar del interés de esta variable, es de las más difíciles de medir, ya que en un incendio forestal la temperatura fluctúa permanentemente en el tiempo y el espacio. (Zárate López, 2004)

Temperatura del suelo: Esta temperatura depende de la composición del lecho orgánico y de la composición mineral del suelo. De forma general el aumento de temperatura de esta zona es mínimo, debido a la rapidez con que ocurre el fenómeno y a la mala conductividad térmica del suelo; en la bibliografía se encuentran valores para la superficie del suelo entre 250°C y 300°C. Estos valores disminuyen rápidamente en función de la profundidad. Traubaud (1992) determinó que a 5 centímetros de profundidad las temperaturas medias eran de 50°C y a partir de 10 centímetros de profundidad no detectó ningún aumento de temperatura. Desde un punto de vista del proceso de propagación del incendio y de la lucha contra incendios, la temperatura en el interior del suelo es de poco interés. (Zárate López, 2004)

Temperatura de la zona de combustible: Es la temperatura que se observa en el lecho de combustible, por delante de las llamas en el sentido de la progresión del incendio. Básicamente es una zona precalentada por la radicación. (Zárate López, 2004)

Temperatura de la zona de llamas: Los valores de esta zona se caracterizan por sus rápidas y grandes fluctuaciones, debido a las turbulencias. Las temperaturas oscilan entre 700°C y 1600°C según autores. (Zárate López, 2004)

Otro punto a observar es la columna de convección donde se alcanzan temperaturas de entre 1000°C y 100°C dependiendo de la altura. (Zárate López, 2004)

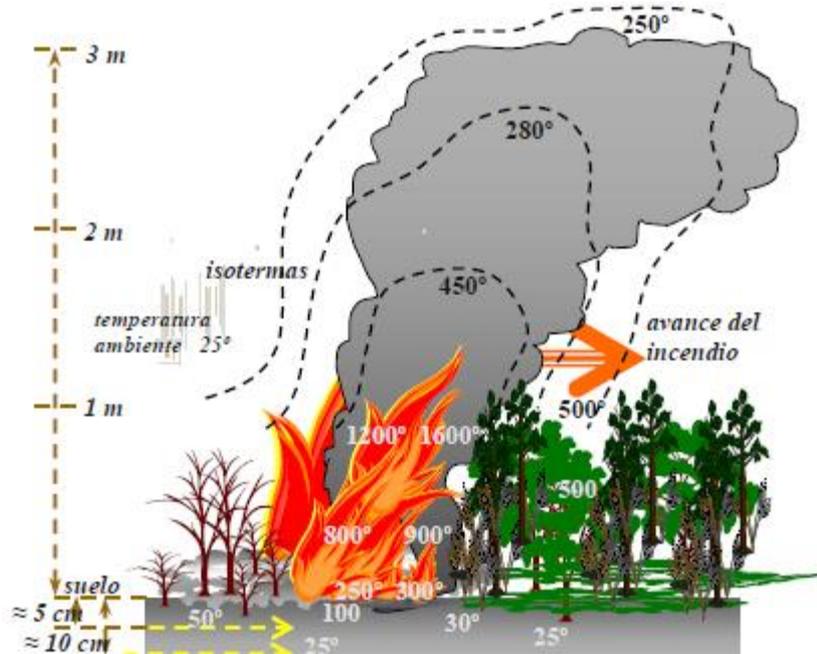


Ilustración 2: Distribución de temperaturas en el frente de un incendio de matorral (Zárate López, 2004)

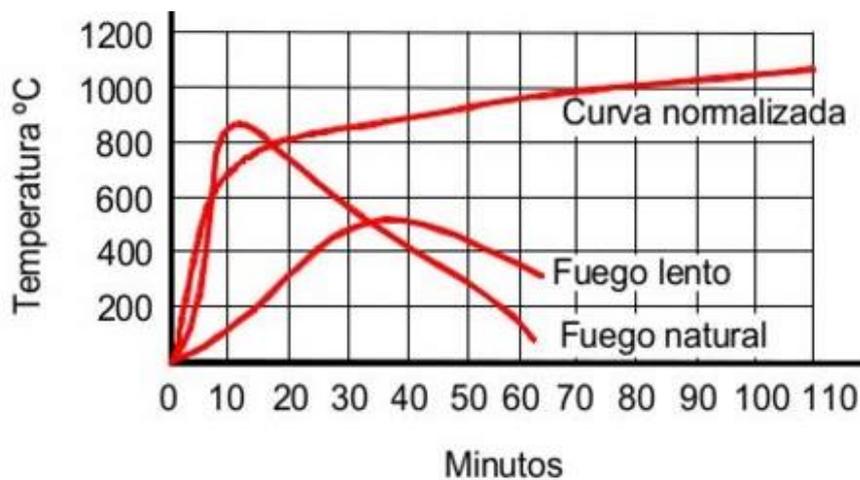


Gráfico 11: Comportamiento de algunos incendios. Fuente Presentación de la Oficina Consultora Técnica.(Oficina Consultora Técnica, 2007)

2 Objetivos

2.1 Objetivo general

Analizar el impacto que la quema controlada de suelos tiene, bajo diferentes condiciones de humedad y tipo de suelo, sobre la variación de la transmisión térmica en profundidad (temperatura máxima e índices de quemas o Charred index) y las propiedades físicas y químicas del suelo.

2.2 Objetivos específicos:

- Comparar cómo varía la transmisión de calor con la profundidad del suelo y las condiciones de humedad (seco al aire *versus* suelo húmedo a capacidad campo) durante una quema controlada.
- Comparar cómo influyen las propiedades iniciales de los suelos (porosidad, elementos gruesos, materia orgánica) en dicha transmisión de calor (temperaturas máximas en profundidad y su tiempo de residencia).
- Analizar los cambios generados sobre diversas propiedades físicas (color, densidad aparente, repelencia al agua) y químicas de los suelos como la conductividad eléctrica o concentración electrolítica (CE), reacción del suelo (pH), carbono y nitrógeno total, a diferentes profundidades.

3 Metodología

La idea principal de este trabajo es el estudio de la transmisión de energía, en forma de calor, en profundidad dependiendo de las características de un suelo. Para determinar este gradiente de temperatura según el espesor de estudio lo primero que debemos hacer es elegir los suelos sobre los que basar el estudio. Para ello realizamos una revisión bibliográfica para obtener información de distintos suelos, como textura, materia orgánica, usos, elementos gruesos, etc. Nos centramos en el primer horizonte de los suelos ya que es donde se produce la transferencia de calor en los incendios forestales.

3.1 Proceso experimental:

1. Diseñar método de muestreo
2. Diseñar ensayo de quema
3. Determinar ensayos físico-químicos
4. Extracción de las muestras
 - 4.1. Búsqueda de suelos
 - 4.2. Utilizar el cilindro muestreador para obtener muestras de suelo
 - 4.2.1. Clavar el cilindro en el suelo de forma perpendicular a la superficie del suelo.
 - 4.2.2. Extraer el cilindro con cuidado y evitando que la muestra se desmorone por la apertura inferior del cilindro.
 - 4.2.3. Limpiar la superficie inferior de la muestra intentado dejarla recta.
 - 4.2.4. Colocar el cilindro en una caja o colocarle una bandeja inferior para poder transportar las muestras.
5. Preparación de las muestras
 - 5.1. Tratamiento seco
 - 5.1.1. Una vez extraídas las muestras del campo, llevar al laboratorio y dejar secar durante varias semanas.
 - 5.2. Tratamiento húmedo

- 5.2.1. Una vez secas las muestras se deben dejar en un recipiente con agua durante un día para que la muestra se sature.
6. Quema
 - 6.1. Control de peso de la muestra
 - 6.2. Control de color en superficie de muestra
 - 6.3. Colocar el cilindro en el quemador
 - 6.4. Insertar las sondas, por los agujeros del cilindro, perpendiculares al lateral y paralelos a la superficie de la muestra.
 - 6.5. Encender el medidor y tomar durante 3 minutos la temperatura base.
 - 6.6. Encender el soplete y mantener hasta alcanzar la temperatura de $575^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$. Mantener durante $2\text{min}\pm 20\text{seg}$. y apagar el soplete.
 - 6.7. Mantener los registros de temperatura hasta que se estabilicen o por un periodo máximo de $5\text{horas}\pm 10\text{min}$.
7. Estudio de las muestras
 - 7.1. Medición del peso post-incendio, cambios en la densidad.
 - 7.2. Registro de cambios en el color.
 - 7.3. Medición de la repelencia al agua post-incendio, comparación con las muestras control.
 - 7.4. pH y conductividad eléctrica.
 - 7.5. Carbón inorgánico, carbono oxidable y carbono total. Y nitrógeno Total
8. Estudio de las temperaturas alcanzadas.
 - 8.1. Temperaturas máximas y tiempo en alcanzarlas
 - 8.2. Tiempos de residencia y Charred index
 - 8.3. Velocidad de enfriamiento y poder calorífico aproximado.
9. Análisis estadístico de los datos

3.2 Muestras.

3.2.1 Áreas de estudio

El principal criterio asociado con incendios forestales es que los suelos deben ser forestales, sea zona arbolada o de matorral.

Para facilitar el trabajo se seleccionan suelos ya caracterizados en trabajos anteriores como el "Itinerarios edáficos por el Alto Aragón" (Badía Villas et al., 2009) y en "Changes in water repellency, aggregation and organic matter of a mollic horizon burned in laboratory: Soil depth affected by fire." (Badía Villas et al., 2014)

Se trata de dos suelos de propiedades contrastadas uno muestreado en las Ripas de Lupiñén (*Regosol háplico*) y otro en los montes de Zuera (*Phaeozem réndzico*). Evolutivamente, el *Regosol háplico* se puede colocar al principio, pues es un suelo joven con menor actividad biológica que el segundo.

3.2.2 Método de muestreo

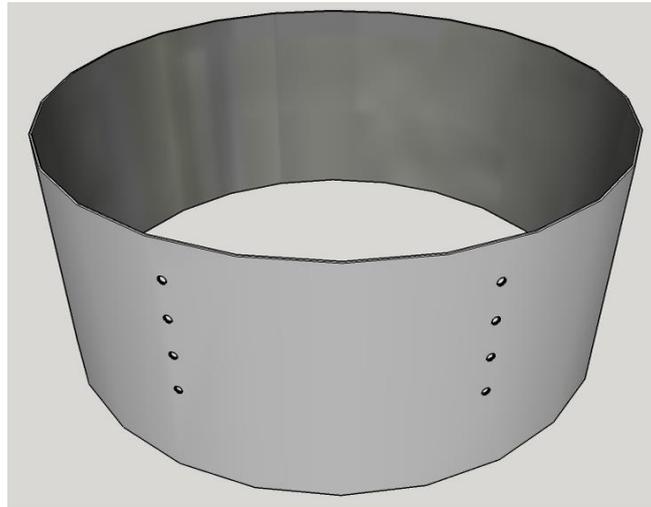


Ilustración 3: Forma del muestreador. Fuente: elaboración propia. Programa: SketchUp Make

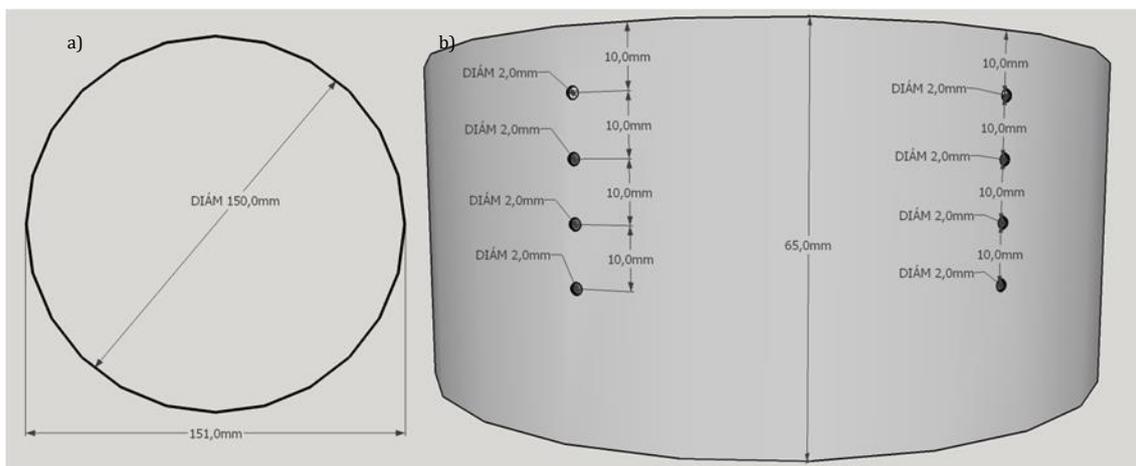


Ilustración 4: Medidas del muestreador, a) Vista superior, b) Vista lateral. Fuente: elaboración propia. Programa: SketchUp Make.

Los cilindros son de 150mm \varnothing x 65mm de altura. Los agujeros para las sondas, por pares, son de 2mm \varnothing y se encuentran, en la vertical, separados por 10mm entre sus centros. El primer agujero para la sonda se encuentra a 10mm del borde superior (superficie de muestra de suelo).

El área de contacto de la muestra de suelo con la llama del soplete es la siguiente:

$$A = \pi r^2 = \pi \cdot 0,75^2 = 1,77\text{dm}^2 = 177\text{cm}^2$$

mientras que el volumen de cada muestra:

$$V = A \cdot h = \pi r^2 h = \pi \cdot 0,75^2 \cdot 0,65 = 1,15\text{dm}^3 = 1,15\text{Litros}$$

El muestreo de cada suelo se realizará por triplicado para cada tratamiento. Los tres tratamientos que se van a realizar son: Quema de suelo seco, quema de suelo saturado, y control, al que no se le someterá a ningún fuego.



Fotografía 1: Algunas muestras de Regosol



Fotografía 2: Algunas muestras de Phaeozem.

3.3 Montaje del ensayo

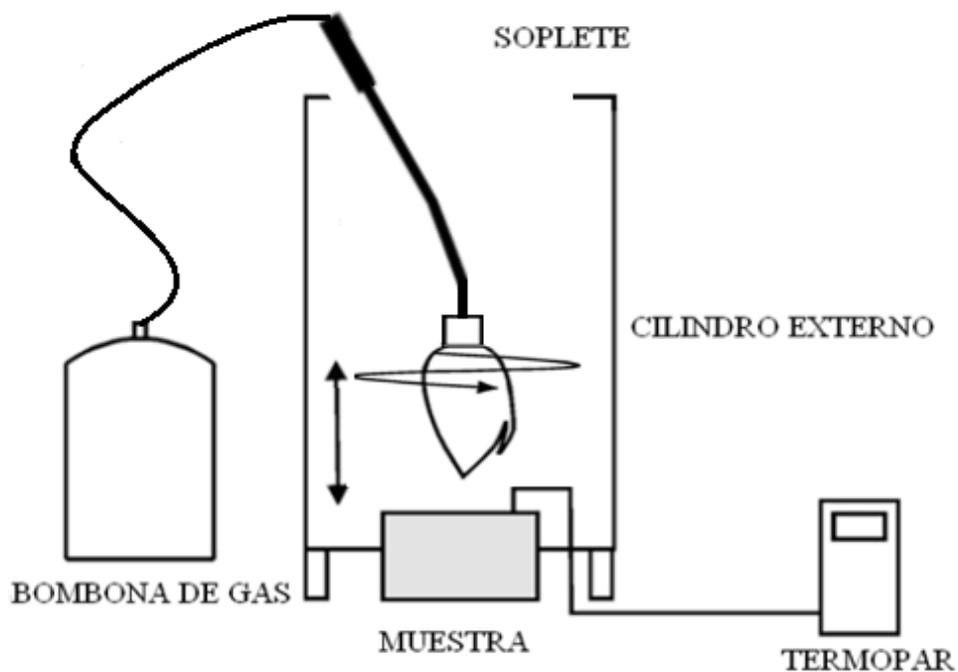


Ilustración 5: Montaje del experimento. Extraído y modificado de *Medición de la repelencia al agua en suelo* (Márquez Lapuente) y tesis *“Degradación del suelo posterior al fuego en condiciones mediterráneas. Identificación de factores de riesgo”* de Joan Llovet López (Llovet López, 2005; Márquez Lapuente et al., 2010)

J.J. Cancelo describe en su artículo “Estudio de la erosión y de la composición química de la escorrentía generada en suelos sometidos a quemas controladas y simulaciones de lluvia en laboratorio” (Cancelo González et al., 2004) recogido en el libro “Fuegored 2010” como utilizó cajas de acero inoxidable evitando alteraciones en la estructura de las muestras de suelo tomadas. Las muestras fueron sometidas a choque térmico, parece ser que dentro de las mismas cajas. Por esta razón, para este experimento se utilizan cilindros metálicos de acero inoxidable con la misma idea. Para poder colocar los termopares se realizan agujeros más holgados que el diámetro de los termopares.



Fotografía 3: Montaje para el tratamiento térmico de las muestras.

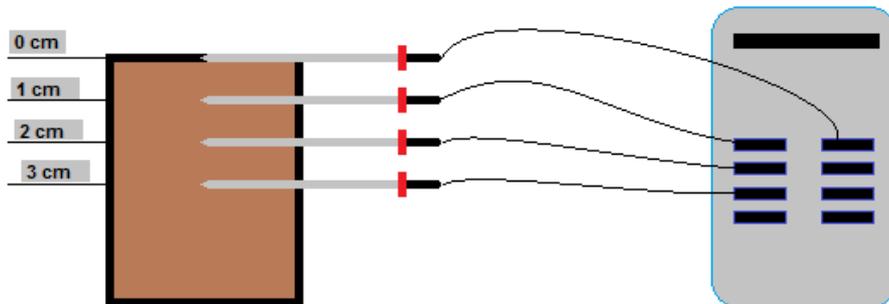


Ilustración 6: Detalle de colocación de los termopares. Fuente: Elaboración Propia.



Fotografía 4: Detalle del "Data Logger" y los termopares.

El modelo de sondas para las profundidades de 1 a 3 cm es el KP04, sonda tipo K, 60mm de largo y 1,5mm de Ø, su rango de temperaturas va de -100°C a 400°C (Tmethermometers, n.d.). Para registrar las temperaturas debe utilizarse un aparato entre los termopares y el ordenador, se trata del "Data Logger" (Tmethermometers, n.d.) que permite registrar las mediciones de hasta 8 termopares a la vez permitiendo la conexión con un USB de los termopares al ordenador.

3.4 Método

La idea es comparar el comportamiento y las afecciones entre un suelo no quemado, un suelo quemado en un incendio y un suelo quemado en una “quema controlada”. Para esto se plantean 3 réplicas para control (Unburned), 3 réplicas para quema seco (Dry burned) y 3 réplicas para quema húmedo (Wet burned).

Suelo seco: Se dejan las muestras en la litoteca hasta que tengan peso estable. Todos los cilindros de muestras, sea cual sea el tratamiento que se vaya a realizar.

Suelo a CC: Para llevar las muestras a capacidad de campo (quema en húmedo) colocaremos una malla o tela que impida el paso del cuerpo de la muestra pero que permita pasar el agua. Usando la ecuación de (Valero Sancho et al., 2001) que relaciona la MO y la Textura con el porcentaje en peso que supone la Capacidad de Campo.

$$\%_{\text{peso C. C.}} = 4,52 \cdot (\%M. O.) + 0,461 \cdot (\%Arcilla) + 0,093$$

Ecuación 1: Determinar la Capacidad de Campo

Control: Como el aumento de humedad no debería afectar a los parámetros que se van a medir realizar un control húmedo y un control seco resulta en una pérdida de tiempo y un mal empleo de las muestras. Por lo que para los ensayos de control se realizaran solo en seco, ya que es más sencillo de trabajar.

3.4.1 Temperaturas y tiempo

Siendo la intención poder comparar los efectos térmicos de una llama sobre un suelo y sus propiedades se debe aportar la misma cantidad de energía térmica en todos los casos de quema. Para esto se deja el soplete a la misma altura durante el mismo tiempo en todos los casos.

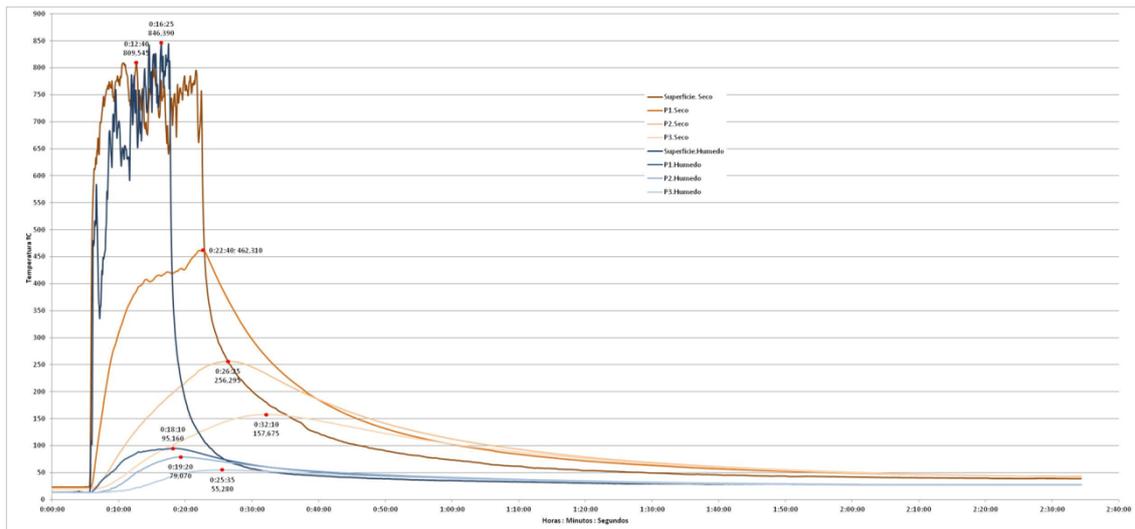


Gráfico 12: Comparativa entre quema en seco y quema en húmedo de dos muestras de un mismo suelo. Se muestran las líneas de temperaturas para ambos suelos en 4 puntos de profundidad: superficie, 1cm, 2, cm y 3cm. Elaboración propia.

Este gráfico (Seco VS Húmedo) es el resultado de referenciar las gráficas de quema de muestra seca (líneas marrones) y húmeda (C.C.) (líneas azules) al momento de encender el soplete.

A la vista de este gráfico podemos afirmar que las muestras se comportan, sin lugar a dudas, de manera diferente si se encuentran secas o a capacidad de campo. El soplete estuvo encendido 12 minutos aproximadamente para la muestra húmeda y 17 minutos aproximadamente para la muestra seca. Considerar 15 minutos (± 1 minuto) como tiempo de incendio creo que sería lo óptimo.

El esquema del control del ensayo es el siguiente:

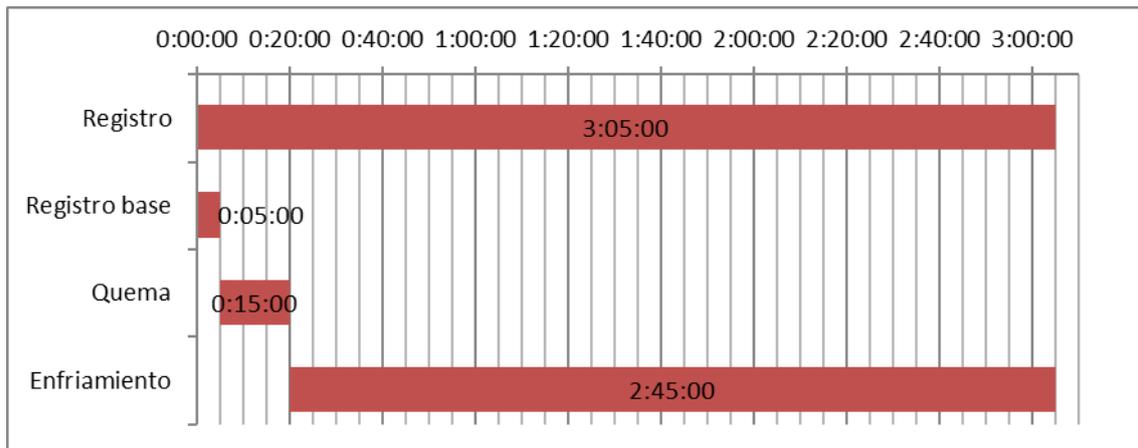


Gráfico 13: Esquema de tiempo del ensayo de quemas de las muestras. Fuente: elaboración propia.

3.4.2 Preparación de las muestras

Los cilindros se dividen en 3 grupos, control, quema en seco y quema en húmedo. Al grupo de control no se les realiza tratamiento térmico. Al grupo de quema en seco se espera a que su peso, y por tanto su humedad se estabilice y se procede a quemarlos. Al grupo en húmedo se procede a encharcarlos introduciéndolos en bandejas con agua, protegidos con una gasa por la parte inferior para permitir el paso del agua y evitar desmoronamientos de la muestra. Cuando la muestra alcanza la capacidad de campo está lista para la quema.

Una vez quemados se vuelven a pesar.

En este punto todos los cilindros serán sometidos a los mismos procesos, que son:

- Separar cada una de las capas que hemos definido de cada cilindro, a saber: 0-1cm, 1-2cm, 3-4cm, resto.
- Cada una de las capas será estudiada para cada análisis:
 - Peso
 - Color
 - Elementos químicos
 - Hidrofobicidad
 - Carbonatos
 - Carbonos
 - Nitrógenos
 - pH
 - Conductividad

3.4.3 Análisis

3.4.3.1 Índice de quemado o Charred index.

El índice de quema mide el área de grafica comprendida por la curva de temperaturas durante la quema y la línea base de los 100, 200 o 300°C.

Por ejemplo, la siguiente grafica muestra un CI a 100°C:

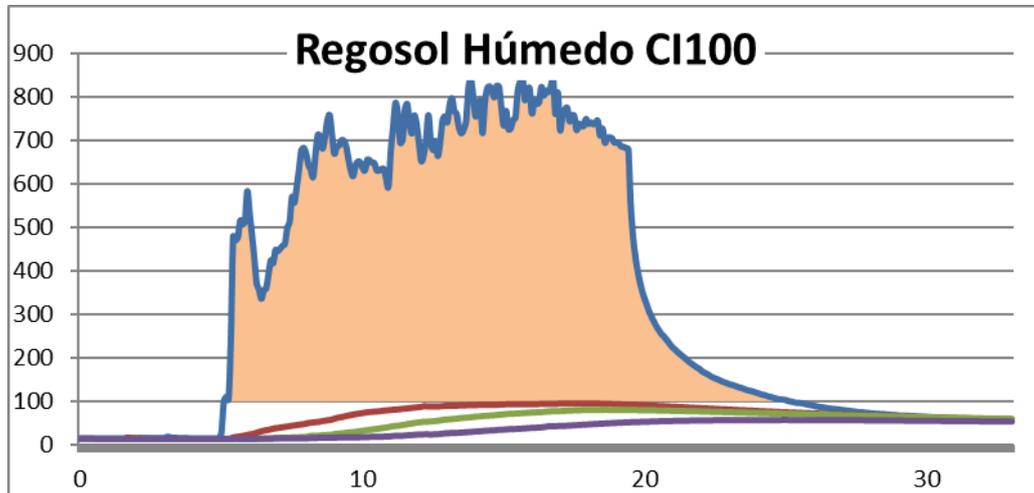


Gráfico 14: Índice de quemado a 100° para una de las muestras. Fuente: elaboración propia.

Y la siguiente es la misma muestra, pero con un CI de 200:

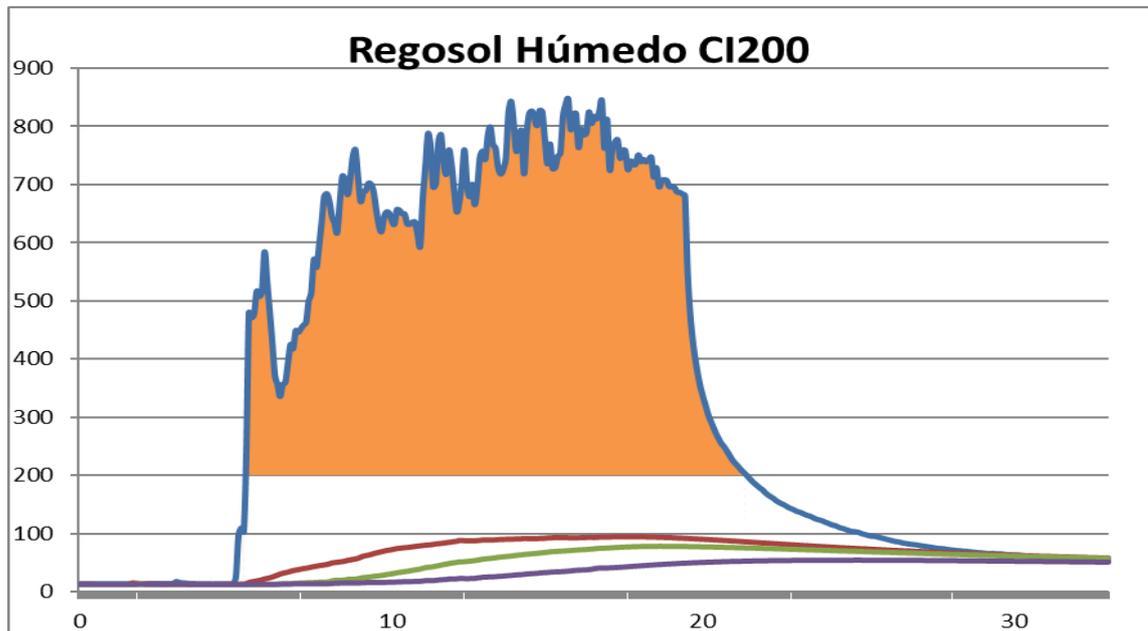


Gráfico 15: Índice de quemado a 200° para una de las muestras. Fuente: elaboración propia.

3.4.3.2 Densidad aparente y densidad corregida.

La densidad es el peso seco en kg partido del volumen en litros. La densidad aparente es con el volumen “natural” de la muestra, con todos los huecos y poros que tiene, mientras que la corregida es el volumen real, sin huecos ni poros y eliminando los elementos gruesos.

3.4.3.3 Hidrofobicidad

La hidrofobicidad se mide con dos métodos el WDPT y EPT. WDPT es el método del tiempo, en segundos, de infiltración de la gota de agua y el EPT es el método del tiempo de infiltración de la gota de etanol, en función de la concentración de etanol en la solución. (Doerr, 1998; Regalado et al., 2003)

3.4.3.4 Carbono inorgánico, orgánico y total.

Análisis químicos realizados por el laboratorio del CSIC de la Alfranca.

El carbono inorgánico está presente como componente mineral, por ejemplo, el bicarbonato. Hablamos de carbono mineral. Carbono orgánico es la materia orgánica. Y la suma de ambos es el carbono total.

3.4.3.5 Carbonatos

Determinados por el Método del Calcímetro Volumétrico. Este método estima la cantidad de carbonato del suelo (como un porcentaje) por digestión con ácido en exceso.

3.4.3.6 Nitrógeno total

Parámetro químico medido mediante Nitrógeno Kjeldahl.

3.4.3.7 Conductividad eléctrica y pH.

Parámetro químico medido mediante conductímetro y pH-metro. El pH se puede medir a 1:5 y a 1:2.5 de relación volumen “muestra:agua”.

4 Resultados y discusión

4.1 Datos y análisis:

A continuación, se muestran los datos de varios parámetros estudiados, así como su análisis básico y las gráficas correspondientes. Se acompaña de una breve explicación de dichos datos.

Los parámetros estudiados son: Temperaturas máximas alcanzadas, Índice de quema a 100° (CI100), Índice de quema a 200° (CI200), Índice de quema a 300° (CI300), Densidad aparente, Densidad corregida, Hidrofobicidad (WDPT), Hidrofobicidad (EPT), Carbono inorgánico, Carbono oxidable (orgánico), Carbono total, Nitrógeno total, pH al agua 1:2.5, pH al agua 1:5, Conductividad eléctrica.

4.1.1 Temperaturas máximas alcanzadas

Tabla 5: Datos brutos de temperaturas máximas.

Suelo	Tratamiento	Superficie	1cm	2cm	3cm
Regosol	Control	25,00	25,00	25,00	25,00
		25,00	25,00	25,00	25,00
		25,00	25,00	25,00	25,00
	Dry Burn	795,96	498,00	231,77	153,72

Suelo	Tratamiento	Superficie	1cm	2cm	3cm
		1035,35	496,76	358,28	197,13
		809,55	462,31	256,30	157,68
	Wet Burn	846,39	95,16	79,07	55,28
		335,63	191,78	91,50	85,62
		373,41	126,60	86,66	68,26
Phaeozem	Control	25,00	25,00	25,00	25,00
		25,00	25,00	25,00	25,00
		25,00	25,00	25,00	25,00
	Dry Burn	609,69	387,81	239,91	121,83
		581,27	443,36	327,42	189,96
		632,48	497,33	156,30	82,73
	Wet Burn	376,60	88,45	59,40	46,72
		512,69	223,26	75,00	56,49
		113,10	60,84	49,19	40,73

Tabla 6: Análisis de los datos de temperaturas máximas.

Suelo	Tratamiento	Superficie	1cm	2cm	3cm		
Regosol	Control	Promedio	25,00	25,00	25,00	25,00	
		Desvest	0,00	0,00	0,00	0,00	
		CV (%)	0,00	0,00	0,00	0,00	
		Error	0,00	0,00	0,00	0,00	
	Dry Burn	Promedio	880,28	485,69	282,11	169,51	
		Desvest	134,46	20,26	67,09	24,00	
		CV (%)	15,27	4,17	23,78	14,16	
		Error	77,63	11,69	38,73	13,86	
	Wet Burn	Promedio	518,48	137,85	85,74	69,72	
		Desvest	284,61	49,28	6,26	15,22	
		CV (%)	54,89	35,75	7,30	21,83	
		Error	164,32	28,45	3,62	8,79	
	Phaeozem	Control	Promedio	25,00	25,00	25,00	25,00
			Desvest	0,00	0,00	0,00	0,00
			CV (%)	0,00	0,00	0,00	0,00
			Error	0,00	0,00	0,00	0,00
Dry Burn		Promedio	607,81	442,83	241,21	131,51	
		Desvest	25,66	54,76	85,57	54,27	
		CV (%)	4,22	12,37	35,47	41,27	
		Error	14,81	31,62	49,40	31,33	
Wet Burn		Promedio	334,13	124,18	61,20	47,98	
		Desvest	203,15	86,91	13,00	7,95	
		CV (%)	60,80	69,99	21,24	16,58	

Suelo	Tratamiento	Superficie	1cm	2cm	3cm
	Error	117,29	50,18	7,50	4,59

Tabla 7: Resumen de los datos de temperaturas máximas.

Tª Max		Superficie	1 cm	2 cm	3 cm
Regosol	Control	25 ± 0	25 ± 0	25 ± 0	25 ± 0
	Seco	880,28 ± 134,46	485,69 ± 20,26	282,11 ± 67,09	169,51 ± 24
	Húmedo	518,48 ± 284,61	137,85 ± 28,45	85,74 ± 3,62	69,72 ± 8,79
Phaeozem	Control	25 ± 0	25 ± 0	25 ± 0	25 ± 0
	Seco	607,81 ± 25,66	442,83 ± 54,76	241,21 ± 85,57	131,51 ± 54,27
	Húmedo	334,13 ± 203,15	124,18 ± 86,91	61,2 ± 13	47,98 ± 7,95

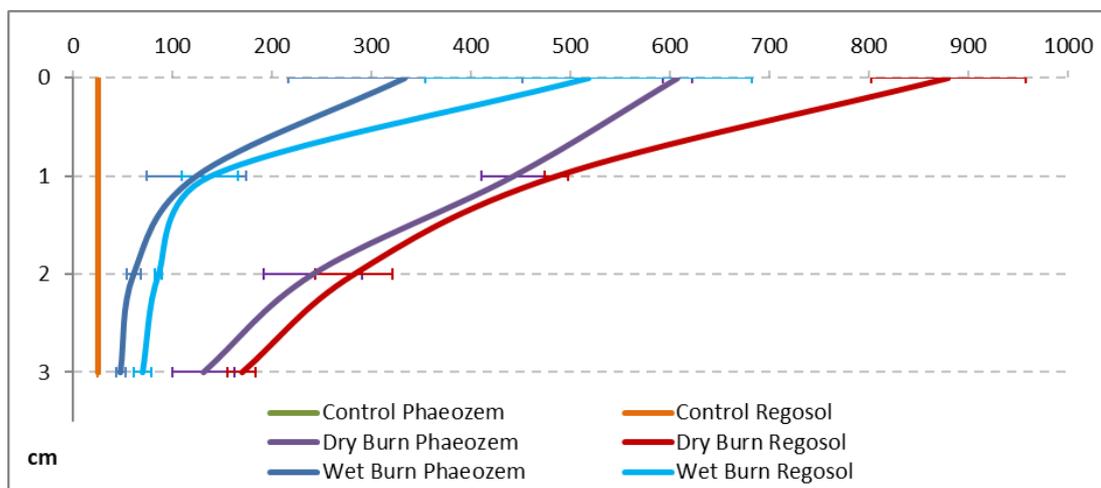


Gráfico 16: Temperatura máxima por profundidad para Phaeozem y Regosol.

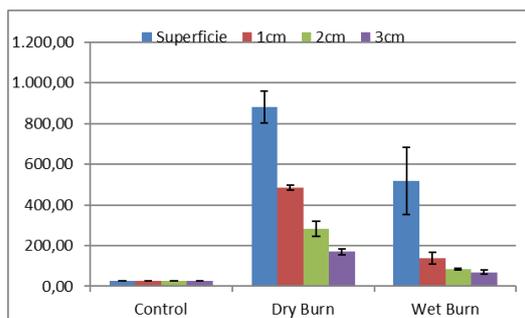


Gráfico 17: Temperaturas máximas. Regosol

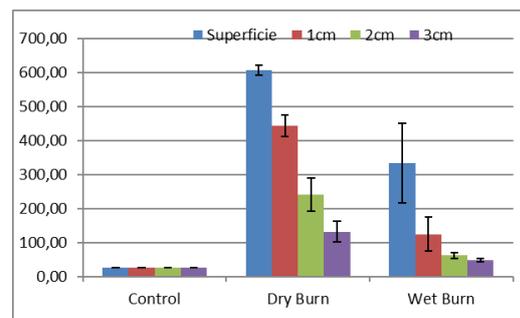


Gráfico 18: Temperaturas máximas. Phaeozem

Con estos datos se puede ver que la presencia de agua en el suelo sí retarda la transferencia de calor desde la superficie hacia el interior.

Con estos datos se puede ver que la presencia de agua en el suelo sí retarda la transferencia de calor desde la superficie hacia el interior.

En el Regosol, el suelo con horizonte menos orgánico, podemos apreciar como el propio suelo aísla de la temperatura y la transferencia de calor, pero en superficie, al ser un suelo muy mineral, alcanza altas temperaturas. Esto demuestra como el comportamiento de

ambos suelos, en las mismas condiciones (secos al aire) se comportan de forma distinta, lo que puede relacionarse con su contrastada porosidad y la capacidad de aislar térmicamente de estos poros.

Aun así, la presencia de agua en este suelo es muy importante para aislar las capas profundas, ya que evita que la temperatura se eleve tanto como en condiciones secas, no solo en superficie, si no en las capas del 1 a 3 cm, haciendo que la temperatura de la capa 1-2 en condiciones húmedas sea más baja que las temperaturas alcanzadas por la capa 3-4 en condiciones secas.

El Phaeozem, un suelo muy orgánico (con horizonte móllico), tiene más capacidad de retener agua a capacidad de campo que el Regosol y esto le permite soportar mejor las temperaturas y los fuegos. Si bien se puede apreciar, en los gráficos Gráfico 17 y Gráfico 18, como el agua juega un papel importante en evitar que el calor se transmita, en el Gráfico 16 se aprecia como el propio suelo tiene capacidad para evitar que el calor avance más profundo de 4 ó 5 centímetros.

Lo que queda demostrado es que la presencia del agua es, en ambos casos, vital para evitar la transferencia de calor en profundidad, así como para evitar altas temperaturas en superficie. Pero que la baja densidad aparente, o lo que es lo mismo, la elevada porosidad de un suelo, les confiere un aislante natural a las temperaturas.

Según Nidal, la conductividad térmica varía con la textura del suelo, el contenido de agua, la concentración de sal y el contenido de materia orgánica. (Abu-Hamdeh and Reeder, 2000)

Como indicó Badía en “Burn effects on soil properties associated to heat transfer under contrasting moisture content”, las Tmax son significativamente menores en el suelo húmedo que en el suelo secado al aire en el primer y segundo centímetros de profundidad. A capacidad de campo, el agua llena una fracción de volumen significativa del medio del suelo, lo que aumenta la capacidad calorífica del suelo. Este aumento permite que el suelo absorba cierta cantidad de calor sin un templado posterior. (Badía et al., 2017)

4.1.2 Índice de quema a 100° (CI100)

Tabla 8: Datos brutos de CI 100

Suelo	Tratamiento	Superficie	1cm	2cm	3cm
Regosol	Control	0,00	0,00	0,00	0,00
		0,00	0,00	0,00	0,00
		0,00	0,00	0,00	0,00
	Dry Burn	15962,14	12588,08	7475,81	4585,53
		14603,84	13007,10	10792,19	6347,00
		16690,83	13766,74	9655,00	5809,94
	Wet Burn	9016,76	0,00	0,00	0,00
		4378,19	2312,94	0,00	0,00
		2838,96	413,66	0,00	0,00
Phaeozem	Control	0,00	0,00	0,00	0,00
		0,00	0,00	0,00	0,00
		0,00	0,00	0,00	0,00

	9725,03	7827,68	4977,38	2242,52
Dry Burn	11390,44	7696,10	6769,20	4148,55
	8860,05	7272,28	2107,50	0,00
	3961,67	0,00	0,00	0,00
Wet Burn	6446,26	2165,44	0,00	0,00
	371,76	0,00	0,00	0,00

Tabla 9: Análisis de los datos de CI 100.

Suelo	Tratamiento	Superficie	1cm	2cm	3cm	
Regosol	Control	Promedio	0,00	0,00	0,00	0,00
		Desvest	0,00	0,00	0,00	0,00
		CV (%)	0,00	0,00	0,00	0,00
		Error	0,00	0,00	0,00	0,00
	Dry Burn	Promedio	15752,27	13120,64	9307,67	5580,82
		Desvest	1059,21	597,47	1685,25	902,81
		CV (%)	6,72	4,55	18,11	16,18
		Error	611,53	344,95	972,98	521,24
	Wet Burn	Promedio	5411,30	908,87	0,00	0,00
		Desvest	3215,86	1233,43	0,00	0,00
		CV (%)	59,43	135,71	0,00	0,00
		Error	1856,68	712,12	0,00	0,00
Phaeozem	Control	Promedio	0,00	0,00	0,00	0,00
		Desvest	0,00	0,00	0,00	0,00
		CV (%)	0,00	0,00	0,00	0,00
		Error	0,00	0,00	0,00	0,00
	Dry Burn	Promedio	9991,84	7598,69	4618,03	2130,36
		Desvest	1286,12	290,24	2351,53	2076,55
		CV (%)	12,87	3,82	50,92	97,47
		Error	742,54	167,57	1357,66	1198,90
	Wet Burn	Promedio	3593,23	721,81	0,00	0,00
		Desvest	3053,96	1250,22	0,00	0,00
		CV (%)	84,99	173,21	0,00	0,00
		Error	1763,21	721,81	0,00	0,00

Tabla 10: Resumen de los datos CI 100.

CI 100		Superficie	1 cm	2 cm	3 cm
Regosol	Control	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
	Seco	15752,27 ± 1059,21	13120,64 ± 597,47	9307,67 ± 1685,25	5580,82 ± 902,81
	Húmedo	5411,3 ± 3215,86	908,87 ± 712,12	0 ± 0	0 ± 0
Phaeozem	Control	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
	Seco	9991,84 ± 1286,12	7598,69 ± 290,24	4618,03 ± 2351,53	2130,36 ± 2076,55

CI 100		Superficie	1 cm	2 cm	3 cm
	Hú- medo	3593,23 ±	721,81 ±	0 ± 0	0 ± 0
		3053,96	1250,22		

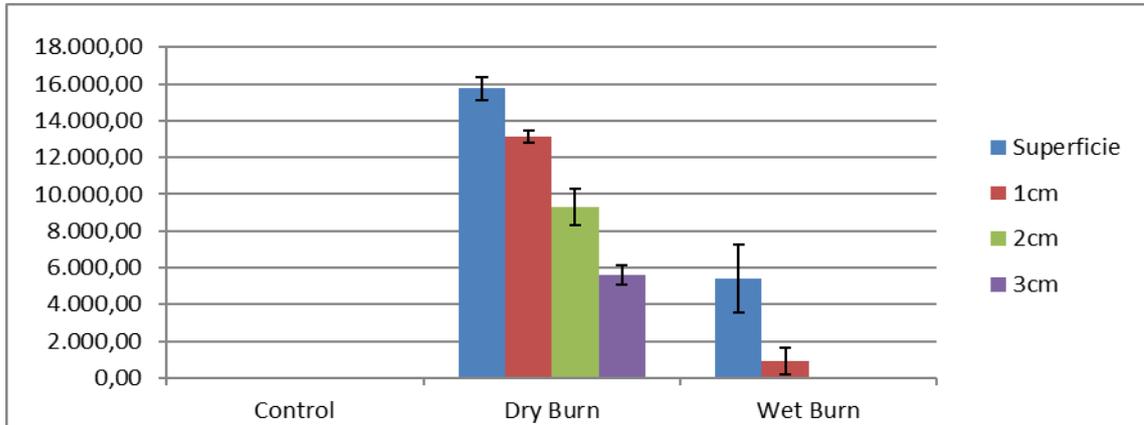


Gráfico 19: Gráfica de CI100 para suelo Regosol

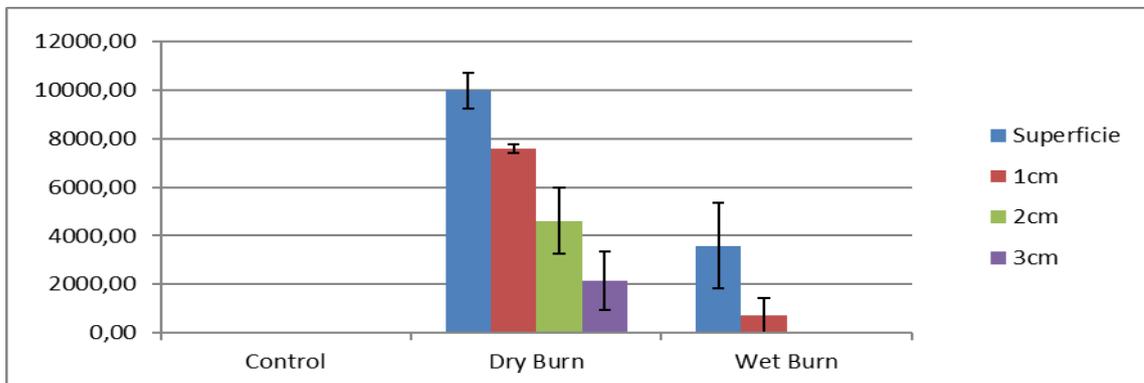


Gráfico 20: Gráfica de CI100 para suelo Phaeozem.

4.1.3 Índice de quema a 200° (CI200)

Tabla 11: Datos brutos de CI 200.

Suelo	Tratamiento	Superficie	1cm	2cm	3cm
Regosol	Control	0,00	0,00	0,00	0,00
		0,00	0,00	0,00	0,00
		0,00	0,00	0,00	0,00
	Dry Burn	14023,76	9465,73	2718,04	0,00
		13073,57	10502,89	7613,89	0,00
		14410,94	10408,66	4468,26	0,00
	Wet Burn	8480,22	0,00	0,00	0,00
		2997,70	0,00	0,00	0,00
		1905,48	0,00	0,00	0,00
Phaeozem	Control	0,00	0,00	0,00	0,00
		0,00	0,00	0,00	0,00

Suelo	Tratamiento	Superficie	1cm	2cm	3cm
		0,00	0,00	0,00	0,00
	Dry Burn	8513,79	6261,25	1392,59	0,00
		9485,54	6476,86	4911,35	0,00
		8028,75	6209,65	0,00	0,00
	Wet Burn	3388,69	0,00	0,00	0,00
		6142,44	683,34	0,00	0,00
		0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 12: Análisis de los datos de CI 200.

Suelo	Tratamiento	Superficie	1cm	2cm	3cm	
	Promedio	0,00	0,00	0,00	0,00	
	Control	Desvest	0,00	0,00	0,00	
		CV (%)	0,00	0,00	0,00	
		Error	0,00	0,00	0,00	
		Promedio	13836,09	10125,76	4933,40	0,00
Regosol	Dry Burn	Desvest	688,15	573,54	2480,85	0,00
		CV (%)	4,97	5,66	50,29	0,00
		Error	397,30	331,13	1432,32	0,00
		Promedio	4461,13	0,00	0,00	0,00
	Wet Burn	Desvest	3523,21	0,00	0,00	0,00
		CV (%)	78,98	0,00	0,00	0,00
		Error	2034,13	0,00	0,00	0,00
		Promedio	0,00	0,00	0,00	0,00
	Control	Desvest	0,00	0,00	0,00	
		CV (%)	0,00	0,00	0,00	
		Error	0,00	0,00	0,00	
		Promedio	8676,02	6315,92	2101,31	0,00
Phaeozem	Dry Burn	Desvest	741,82	141,75	2531,22	0,00
		CV (%)	8,55	2,24	120,46	0,00
		Error	428,29	81,84	1461,40	0,00
		Promedio	3177,04	227,78	0,00	0,00
	Wet Burn	Desvest	3076,68	394,53	0,00	0,00
		CV (%)	96,84	173,21	0,00	0,00
		Error	1776,32	227,78	0,00	0,00
		Promedio	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 13: Resumen de los datos CI 200.

CI 200	Tratamiento	Superficie	1 cm	2 cm	3 cm
	Control	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
Regosol	Seco	13836,09 ± 688,15	10125,76 ± 573,54	4933,4 ± 2480,85	0 ± 0
	Húmedo	4461,13 ± 3523,21	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
Phaeozem	Control	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0

Seco	8676,02 ± 741,82	6315,92 ± 141,75	2101,31 ± 2531,22	0 ± 0
Húmedo	3177,04 ± 3076,68	227,78 ± 394,53	0 ± 0	0 ± 0

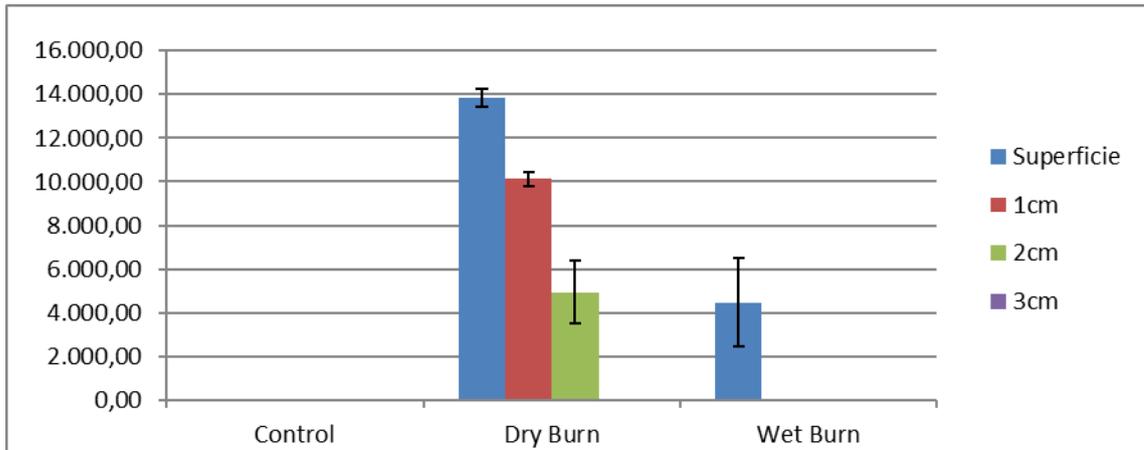


Gráfico 21: Grafica de CI200 para suelo Regosol.

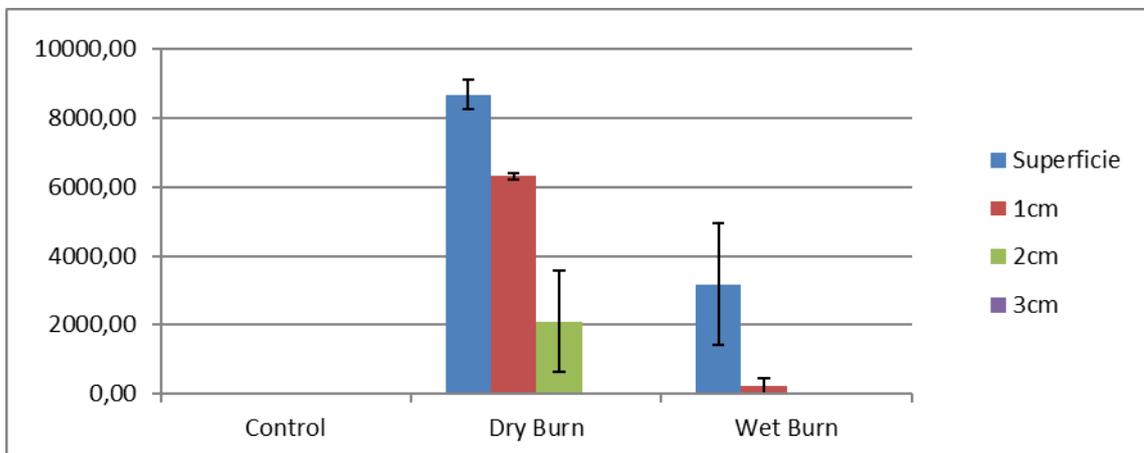


Gráfico 22: Grafica de CI200 para suelo Phaeozem.

4.1.4 Índice de quema a 300° (CI300)

Tabla 14: Datos brutos de CI 300.

Suelo	Tratamiento	Superficie	1cm	2cm	3cm
Regosol	Control	0,00	0,00	0,00	0,00
		0,00	0,00	0,00	0,00
		0,00	0,00	0,00	0,00
	Dry Burn	12888,18	7351,86	0,00	0,00
		12595,85	8405,25	4106,61	0,00
		13100,28	7922,75	0,00	0,00
Wet Burn	8177,45	0,00	0,00	0,00	
	1358,20	0,00	0,00	0,00	
	918,88	0,00	0,00	0,00	
Phaeozem	Control	0,00	0,00	0,00	0,00

Suelo	Tratamiento	Superficie	1cm	2cm	3cm
		0,00	0,00	0,00	0,00
		0,00	0,00	0,00	0,00
	Dry Burn	7790,88	3823,85	0,00	0,00
		8064,09	4909,05	1690,32	0,00
		7218,60	5485,72	0,00	0,00
	Wet Burn	1319,82	0,00	0,00	0,00
		5845,36	0,00	0,00	0,00
		0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 15: Análisis de los datos de CI 300.

Suelo	Tratamiento	Superficie	1cm	2cm	3cm	
	Control	Promedio	0,00	0,00	0,00	0,00
		Desvest	0,00	0,00	0,00	0,00
		CV (%)	0,00	0,00	0,00	0,00
		Error	0,00	0,00	0,00	0,00
Regosol	Dry Burn	Promedio	12861,44	7893,28	1368,87	0,00
		Desvest	253,27	527,31	2370,95	0,00
		CV (%)	1,97	6,68	173,21	0,00
		Error	146,23	304,44	1368,87	0,00
	Wet Burn	Promedio	3484,84	0,00	0,00	0,00
		Desvest	4069,85	0,00	0,00	0,00
		CV (%)	116,79	0,00	0,00	0,00
		Error	2349,73	0,00	0,00	0,00
Phaeozem	Control	Promedio	0,00	0,00	0,00	0,00
		Desvest	0,00	0,00	0,00	0,00
		CV (%)	0,00	0,00	0,00	0,00
		Error	0,00	0,00	0,00	0,00
	Dry Burn	Promedio	7691,19	4739,54	563,44	0,00
		Desvest	431,47	843,80	975,91	0,00
		CV (%)	5,61	17,80	173,21	0,00
		Error	249,11	487,17	563,44	0,00
	Wet Burn	Promedio	2388,39	0,00	0,00	0,00
		Desvest	3065,69	0,00	0,00	0,00
		CV (%)	128,36	0,00	0,00	0,00
		Error	1769,97	0,00	0,00	0,00

Tabla 16: Resumen de CI 300.

CI 300		Superficie	1 cm	2 cm	3 cm
Regosol	Control	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
	Seco	12861,44 ± 253,27	7893,28 ± 527,31	1368,87 ± 2370,95	0 ± 0
	Húmedo	3484,84 ± 4069,85	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
Phaeozem	Control	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
	Seco	7691,19 ± 431,47	4739,54 ± 843,8	563,44 ± 975,91	0 ± 0
	Húmedo	2388,39 ± 3065,69	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0

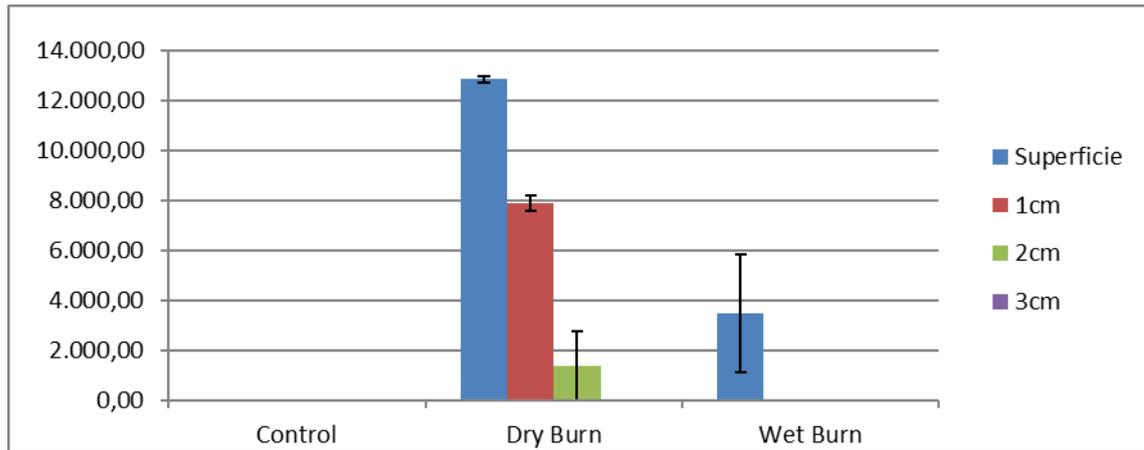


Gráfico 23: Gráfica de CI300 para suelo Regosol.

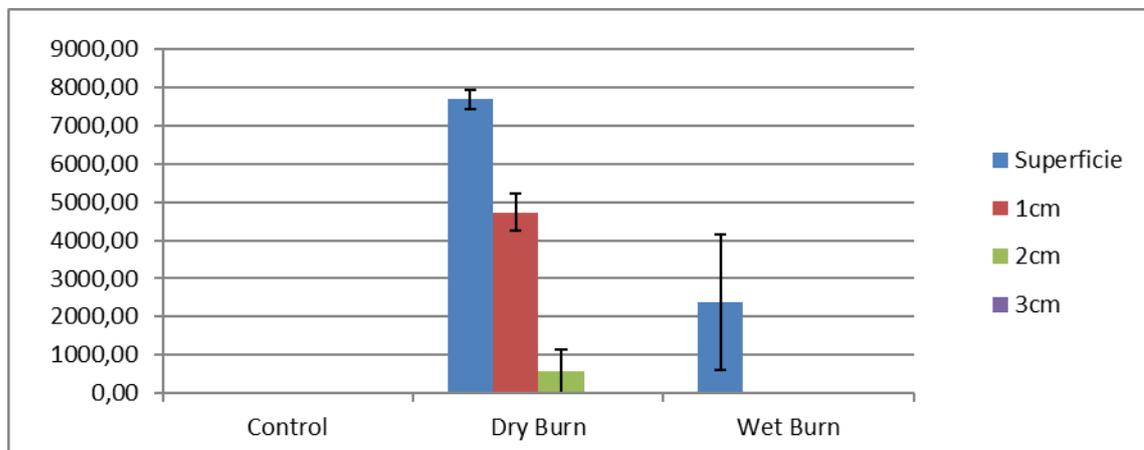


Gráfico 24: Gráfica de CI300 para suelo Phaeozem.

De estos tres parámetros anteriores se puede deducir que, aunque el comportamiento es muy similar entre los dos suelos, el suelo mineral, el Regosol, transmite más la energía térmica que un suelo más orgánico como es el Phaeozem, con mayor capacidad de aislamiento.

Y se aprecia como el agua es capaz, en ambos suelos, de reducir la afeción del fuego sobre ellos dado que parte de la energía calorífica se destina al cambio de fase líquida a vapor temperatura que se resta del suelo

También se aprecia como el último centímetro estudiado no se ve afectado en CI200 y CI300, pero si en CI100 con quema en seco. Los datos sugieren que los suelos son capaces de resistir fuegos a partir del 4º centímetro y que el agua ayuda, no solo en superficie, sino también en profundidad

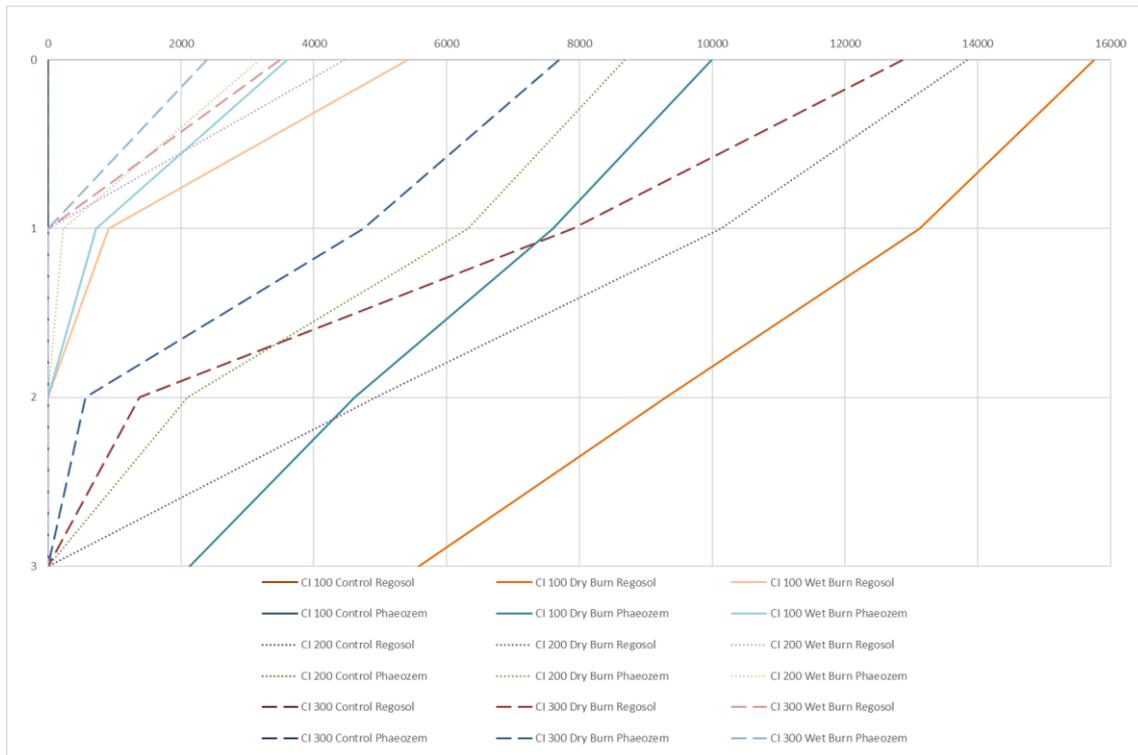


Gráfico 25: Todos los valores de CI dispuestos en una misma gráfica.

4.1.5 Densidad aparente

Tabla 17: Datos brutos de densidad aparente.

Suelo	Tratamiento	0-1 cm	1-2cm	2-3cm	3-4cm
Regosol	Control	1442,95	1162,21	1225,93	1484,94
		1438,82	1061,43	1032,23	1575,93
		1440,91	1111,85	1129,11	1530,43
	Dry Burn	1448,95	1092,61	1189,09	1690,64
		1309,00	1251,00	1336,34	1159,21
		1414,71	1052,88	1057,58	1624,09
	Wet Burn	1499,31	1183,60	1601,06	1069,46
		1426,93	959,29	1184,28	1360,22
		1237,93	1054,75	1344,48	1236,40
Phaeozem	Control	609,57	578,62	735,65	511,90
		611,61	521,01	623,66	648,90
		793,03	935,41	798,41	939,25
	Dry Burn	580,94	618,06	665,42	816,34
		901,96	467,08	517,56	704,30
		580,71	627,00	779,62	871,91
	Wet Burn	554,17	651,22	752,80	873,90
		561,13	639,17	510,03	477,49
		698,24	446,20	455,59	904,28

Tabla 18: Análisis de los datos de densidad aparente.

Suelo	Tratamiento		0-1cm	1-2cm	2-3cm	3-4cm
Regosol	Control	Promedio	1.440,89	1111,83	1129,09	1530,43
		Desvest	2,07	50,39	96,85	45,50
		CV (%)	0,14	4,53	8,58	2,97
		Error	1,19	29,09	55,92	26,27
	Dry Burn	Promedio	1390,89	1132,16	1194,34	1491,31
		Desvest	72,95	104,81	139,45	289,52
		CV (%)	5,24	9,26	11,68	19,41
		Error	42,12	60,51	80,51	167,16
	Wet Burn	Promedio	1388,06	1065,88	1376,61	1222,03
		Desvest	134,96	112,57	210,24	145,91
		CV (%)	9,72	10,56	15,27	11,94
		Error	77,92	64,99	121,38	84,24
Phaeozem	Control	Promedio	671,40	678,34	719,24	700,02
		Desvest	105,34	224,48	88,52	218,22
		CV (%)	15,69	33,09	12,31	31,17
		Error	60,82	129,60	51,11	125,99
	Dry Burn	Promedio	687,87	570,71	654,20	797,52
		Desvest	185,41	89,86	131,39	85,38
		CV (%)	26,95	15,75	20,08	10,71
		Error	107,05	51,88	75,86	49,29
	Wet Burn	Promedio	604,52	578,86	572,81	751,89
		Desvest	81,25	115,05	158,23	238,12
		CV (%)	13,44	19,87	27,62	31,67
		Error	46,91	66,42	91,36	137,48

Tabla 19: Resumen de densidad aparente.

Da kg/m ³		0-1cm	1-2 cm	2 cm	3 cm
Regosol	Control	1440,9 ± 2,07	1111,8 ± 50,4	1129,1 ± 96,9	1530,4 ± 45,5
	Seco	1390,9 ± 72,95	1132,16 ± 104,81	1194,34 ± 139,45	1491,3 ± 289,5
	Húmedo	1388,1 ± 135,0	1065,9 ± 65,0	1376,61 ± 121,4	1222,0 ± 84,2
Phaeozem	Control	671,4 ± 105,3	678,3 ± 224,5	719,2 ± 88,5	700,0 ± 218,2
	Seco	687,9 ± 185,4	570,7 ± 89,9	654,2 ± 131,4	797,52 ± 85,4
	Húmedo	604,5 ± 81,35	578,9 ± 115,1	572,8 ± 158,2	751,89 ± 238,1

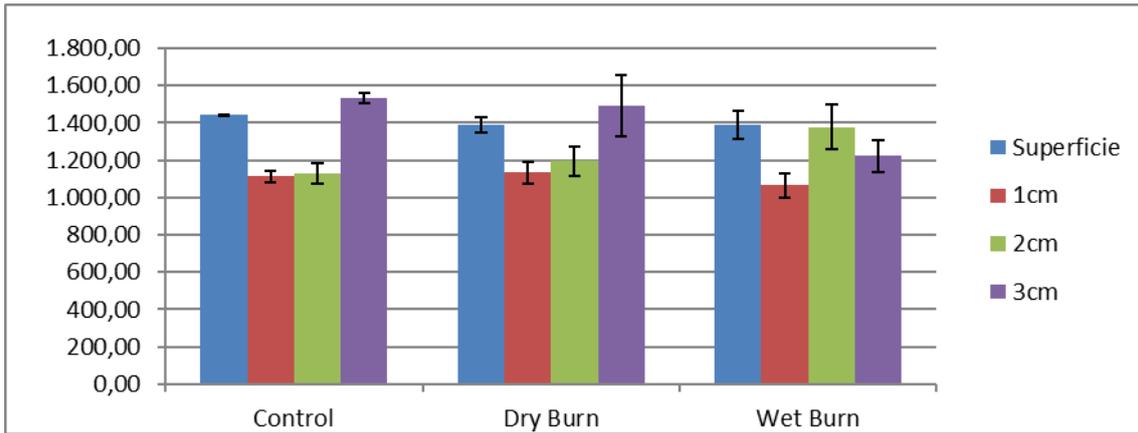


Gráfico 26: Gráfica de densidad aparente para suelo Regosol.

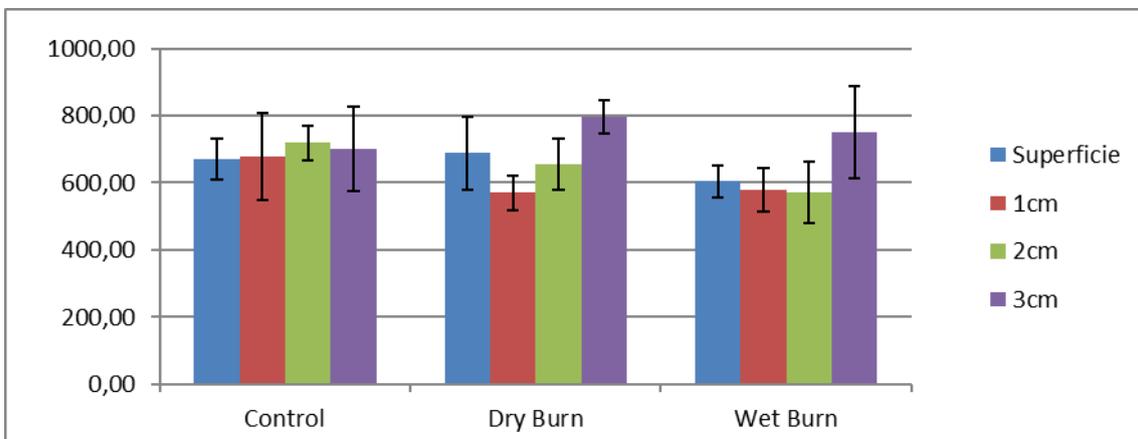


Gráfico 27: Gráfica de densidad aparente para suelo Phaeozem.

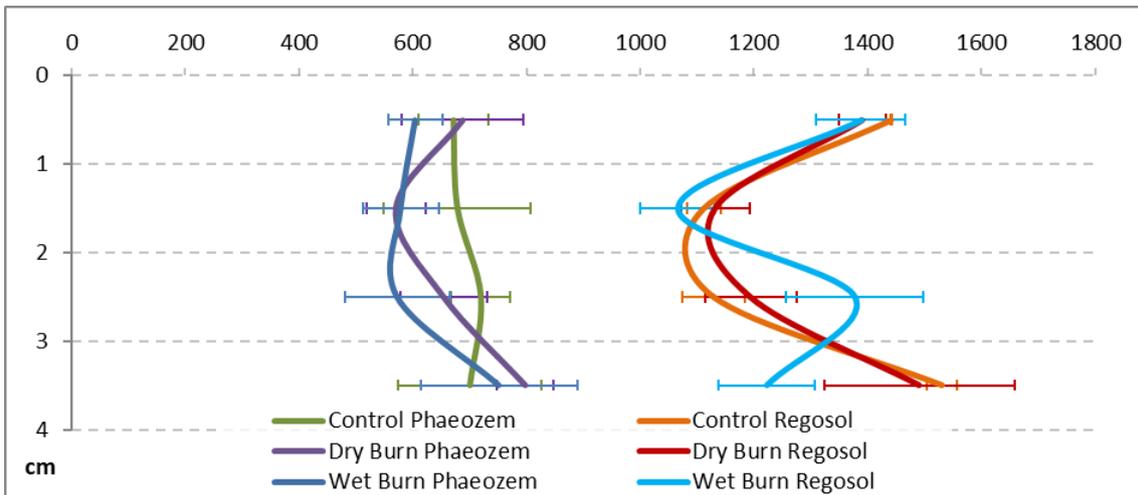


Gráfico 28: Variación de la Da en profundidad para Regosol y Phaeozem.

Se puede observar que las variaciones en las densidades fluctúan, pero los rangos de errores son amplios en algunos puntos. Esas variaciones pueden ser por elementos gruesos y por presencia de raíces.

Abu-Hamdeh, Nidal H. (Abu-Hamdeh, 2003) observó en sus experimentos que el calor específico aumentaba con el aumento del contenido de humedad. Además, la capacidad calorífica volumétrica aumentaba con el aumento del contenido de humedad y la densidad del suelo. Los resultados también mostraban que la difusividad térmica variaba con el contenido de humedad y la textura del suelo.

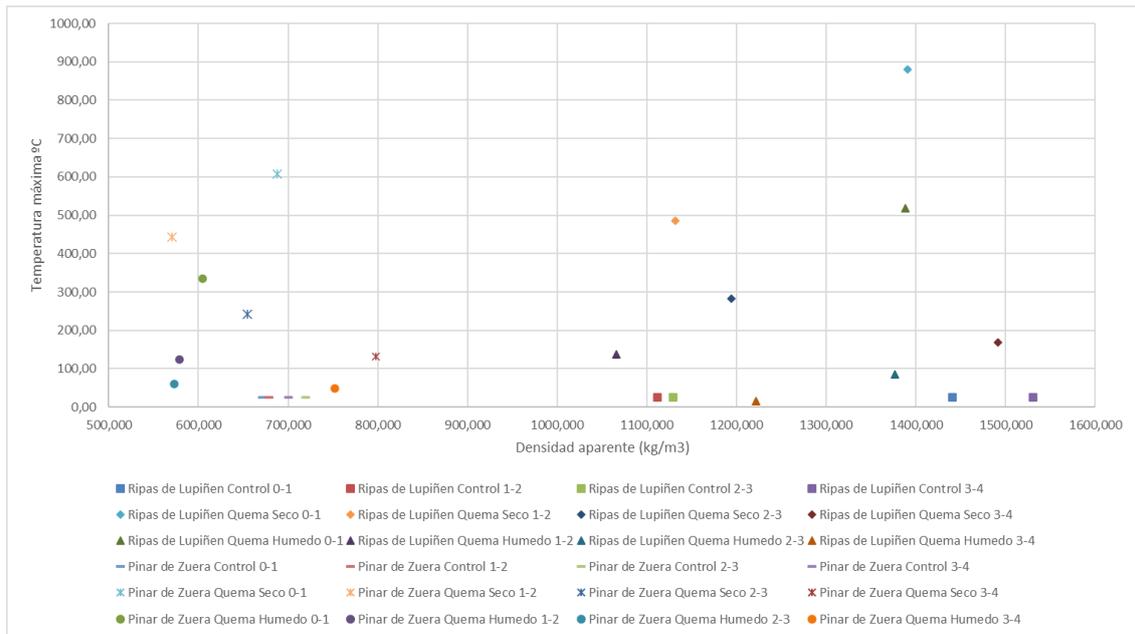


Gráfico 29: Relación entre temperatura máxima y densidad aparente.

Se puede apreciar que el suelo más poroso es capaz de dispersar más el calor, frente al suelo más denso y menos poroso, que acumula más calor. Esto también se aprecia al comparar la densidad con los CI.

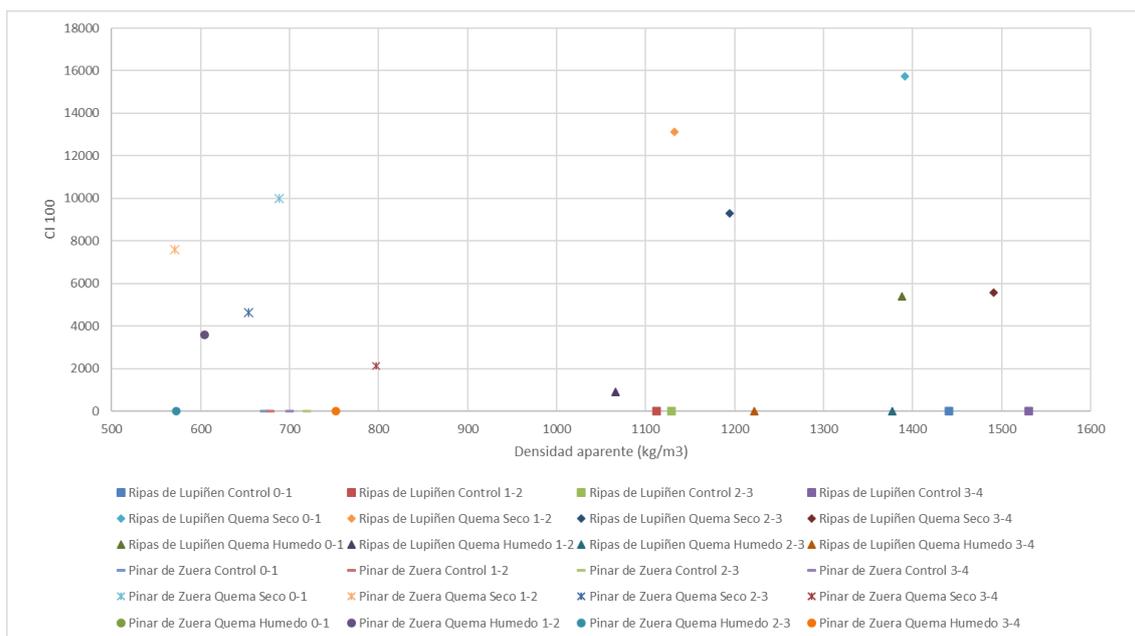


Gráfico 30: CI100 frente a Densidad aparente.

Efectos de la composición y la humedad de un suelo en la transmisión de calor durante quemas controladas.
Sergio López García

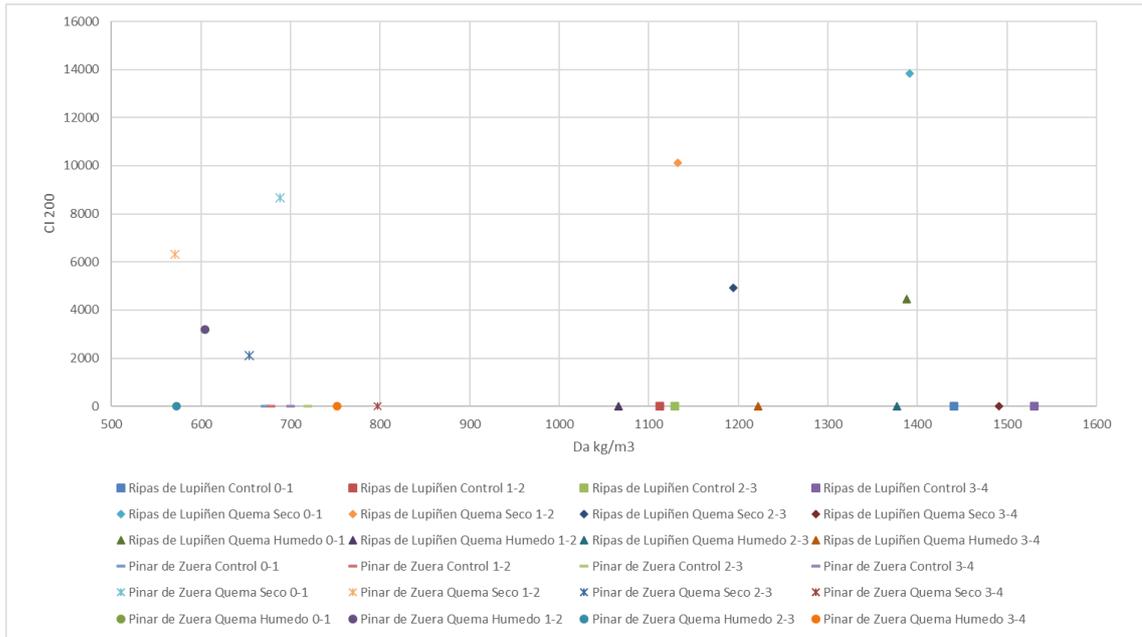


Gráfico 31: CI200 frente a Densidad aparente

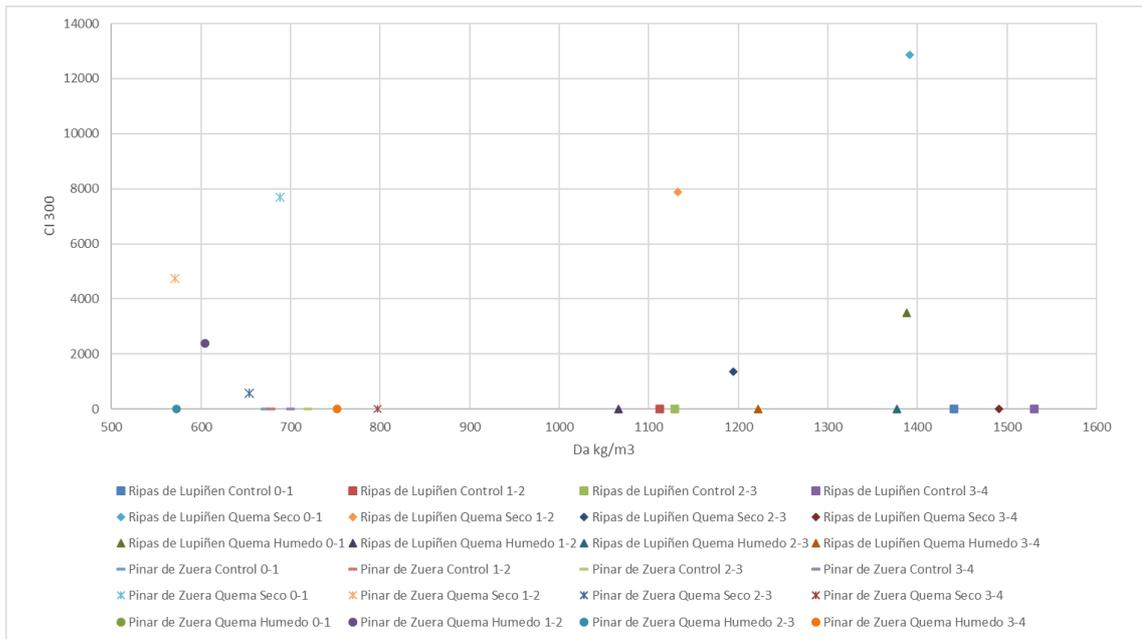


Gráfico 32: CI300 frente a Densidad aparente.

4.1.6 Densidad corregida

Tabla 20: Datos brutos de densidad corregida:

Suelo	Tratamiento	0-1cm	1-2cm	2-3cm	3-4cm
Regosol	Control	1442,16	1160,37	1206,54	1470,49
		1437,16	1056,17	1025,52	1568,12
		1439,69	1108,35	1115,54	1519,45
	Dry Burn	1437,90	1082,17	1186,80	1688,10
		1298,12	1244,87	1332,31	1156,40
		1394,80	1050,08	1052,53	1620,56
		1491,62	1180,96	1597,73	1064,20
	Wet Burn	1413,84	950,88	1169,66	1356,92
		1218,48	1047,10	1339,76	1232,30
		Control	561,54	501,35	559,31
456,84			415,20	473,73	508,36
650,56	623,01		585,62	678,55	
Phaeozem	Dry Burn	502,88	479,64	578,09	717,44
		627,21	388,15	458,65	553,77
		399,59	491,22	654,59	641,84
	Wet Burn	390,36	303,69	362,15	520,25
		451,56	483,74	344,21	373,62
		497,20	360,41	378,17	680,53

Tabla 21: Análisis de los datos de densidad corregida:

Suelo	Tratamiento		0-1cm	1-2cm	2-3cm	3-4cm	
Regosol	Control	Promedio	1.439,67	1108,30	1115,87	1519,36	
		Desvest	2,50	52,10	90,51	48,82	
		CV (%)	0,17	4,70	8,11	3,21	
		Error	1,44	30,08	52,26	28,18	
	Dry Burn	Promedio	1376,94	1125,71	1190,55	1488,35	
		Desvest	71,58	104,44	139,93	289,46	
		CV (%)	5,20	9,28	11,75	19,45	
		Error	41,33	60,30	80,79	167,12	
	Wet Burn	Promedio	1374,65	1059,65	1369,05	1217,81	
		Desvest	140,72	115,55	215,53	146,89	
		CV (%)	10,24	10,90	15,74	12,06	
		Error	81,25	66,71	124,44	84,81	
	Phaeozem	Control	Promedio	556,31	513,19	539,55	527,23
			Desvest	96,96	104,41	58,50	142,82
			CV (%)	17,43	20,35	10,84	27,09
			Error	55,98	60,28	33,77	82,46
Dry Burn		Promedio	509,89	453,00	563,78	637,68	
		Desvest	113,97	56,46	98,75	81,92	

Suelo	Tratamiento	0-1cm	1-2cm	2-3cm	3-4cm
	CV (%)	22,35	12,46	17,52	12,85
	Error	65,80	32,60	57,02	47,29
	Promedio	446,38	382,61	361,51	524,80
	Desvest	53,61	92,05	16,99	153,50
	CV (%)	12,01	24,06	4,70	29,25
	Error	30,95	53,15	9,81	88,63

Tabla 22: Resumen de densidad corregida:

D corre-gida		0-1cm	1-2cm	2-3cm	3-4cm
Regosol	Control	1439,67 ± 2,5	1108,3 ± 52,1	1115,87 ± 90,51	1519,36 ± 48,82
	Seco	1376,94 ± 71,58	1125,71 ± 104,44	1190,55 ± 139,93	1488,35 ± 289,46
	Hú-medo	1374,65 ± 140,72	1059,65 ± 66,71	1369,05 ± 124,44	1217,81 ± 84,81
Phaeozem	Control	556,31 ± 96,96	513,19 ± 104,41	539,55 ± 58,5	527,23 ± 142,82
	Seco	509,89 ± 113,97	453 ± 56,46	563,78 ± 98,75	637,68 ± 81,92
	Hú-medo	446,38 ± 53,61	382,61 ± 92,05	361,51 ± 16,99	524,8 ± 153,5

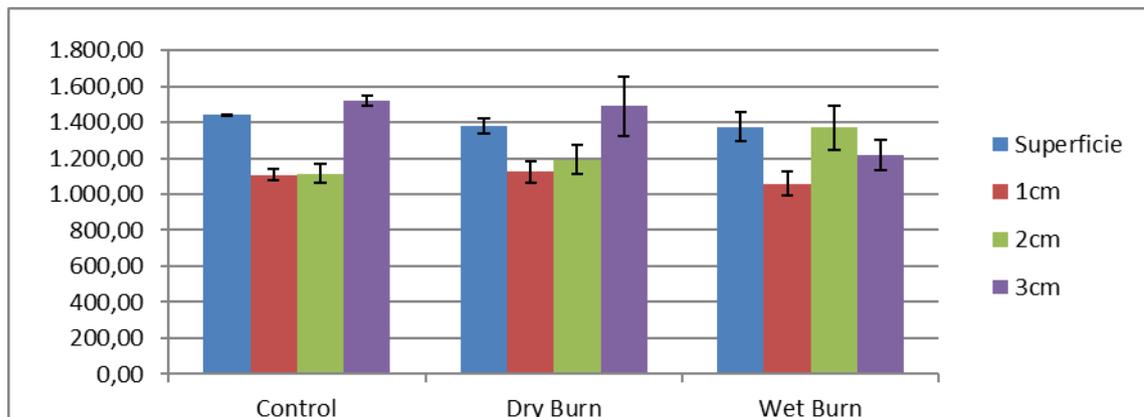


Gráfico 33: Gráfica de densidad corregida para suelo Regosol.

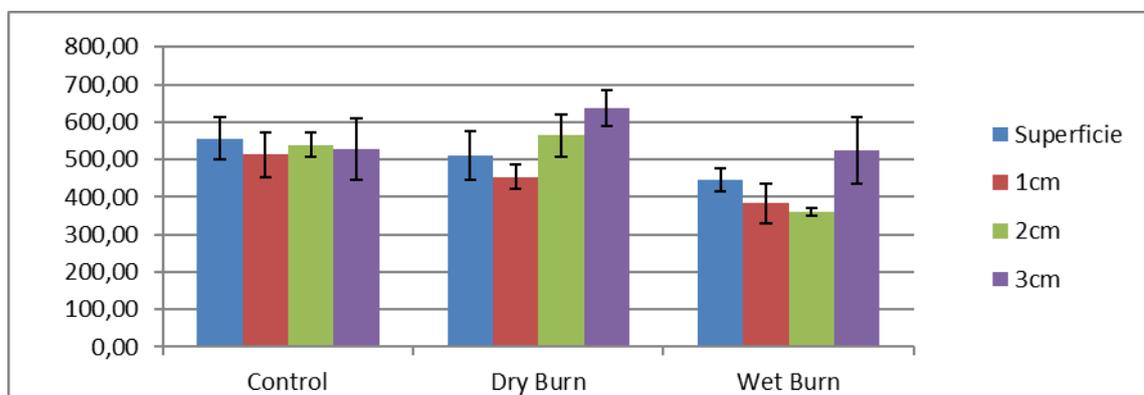


Gráfico 34: Gráfica de densidad corregida para suelo Phaeozem.

La diferencia entre la densidad aparente y la corregida es menor en el Regosol que en el Phaeozem.

Tabla 23: Densidad aparente y corregida y la diferencia entre ambas.

	Da kg/m ³	D corregida	Diferencia
Ripas de Lupiñén Control 0-1	1440,89	1439,67	1,22
Ripas de Lupiñén Control 1-2	1111,83	1108,3	3,53
Ripas de Lupiñén Control 2-3	1129,09	1115,87	13,22
Ripas de Lupiñén Control 3-4	1530,43	1519,36	11,07
Ripas de Lupiñén Quema Seco 0-1	1390,89	1376,94	13,95
Ripas de Lupiñén Quema Seco 1-2	1132,16	1125,71	6,45
Ripas de Lupiñén Quema Seco 2-3	1194,34	1190,55	3,79
Ripas de Lupiñén Quema Seco 3-4	1491,31	1488,35	2,96
Ripas de Lupiñén Quema Húmedo 0-1	1388,06	1374,65	13,41
Ripas de Lupiñén Quema Húmedo 1-2	1065,88	1059,65	6,23
Ripas de Lupiñén Quema Húmedo 2-3	1376,61	1369,05	7,56
Ripas de Lupiñén Quema Húmedo 3-4	1222,03	1217,81	4,22
Pinar de Zuera Control 0-1	671,4	556,31	115,09
Pinar de Zuera Control 1-2	678,34	513,19	165,15
Pinar de Zuera Control 2-3	719,24	539,55	179,69
Pinar de Zuera Control 3-4	700,02	527,23	172,79
Pinar de Zuera Quema Seco 0-1	687,87	509,89	177,98
Pinar de Zuera Quema Seco 1-2	570,71	453	117,71
Pinar de Zuera Quema Seco 2-3	654,2	563,78	90,42
Pinar de Zuera Quema Seco 3-4	797,52	637,68	159,84
Pinar de Zuera Quema Húmedo 0-1	604,52	446,38	158,14
Pinar de Zuera Quema Húmedo 1-2	578,86	382,61	196,25
Pinar de Zuera Quema Húmedo 2-3	572,81	361,51	211,3
Pinar de Zuera Quema Húmedo 3-4	751,89	524,8	227,09

La densidad corregida de las muestras de Regosol no difiere mucho de la densidad aparente, esto es una prueba más de que el Phaeozem, el suelo ubicado en el Pinar de Zuera, es más poroso y esponjoso que el Regosol, ubicado en las Ripas de Lupiñén.

Es esa porosidad la que, a priori, está jugando un papel muy importante en la disipación de la energía térmica actuando como un aislante. Además, es la que permite que la retención de agua sea mayor y se atenué aún más el efecto del fuego al realizar las pruebas en húmedo.

En el caso del Phaeozem es un suelo que, si tiene cambios en la densidad, entre la aparente y la corregida, por lo que sus poros son más abundantes que en su compañero. Además, al tener más materia orgánica su densidad es más baja aún y su capacidad de retención de agua mayor. Las muestras de Phaeozem presentan cierta capacidad aislante que se acentúa con la presencia de agua.

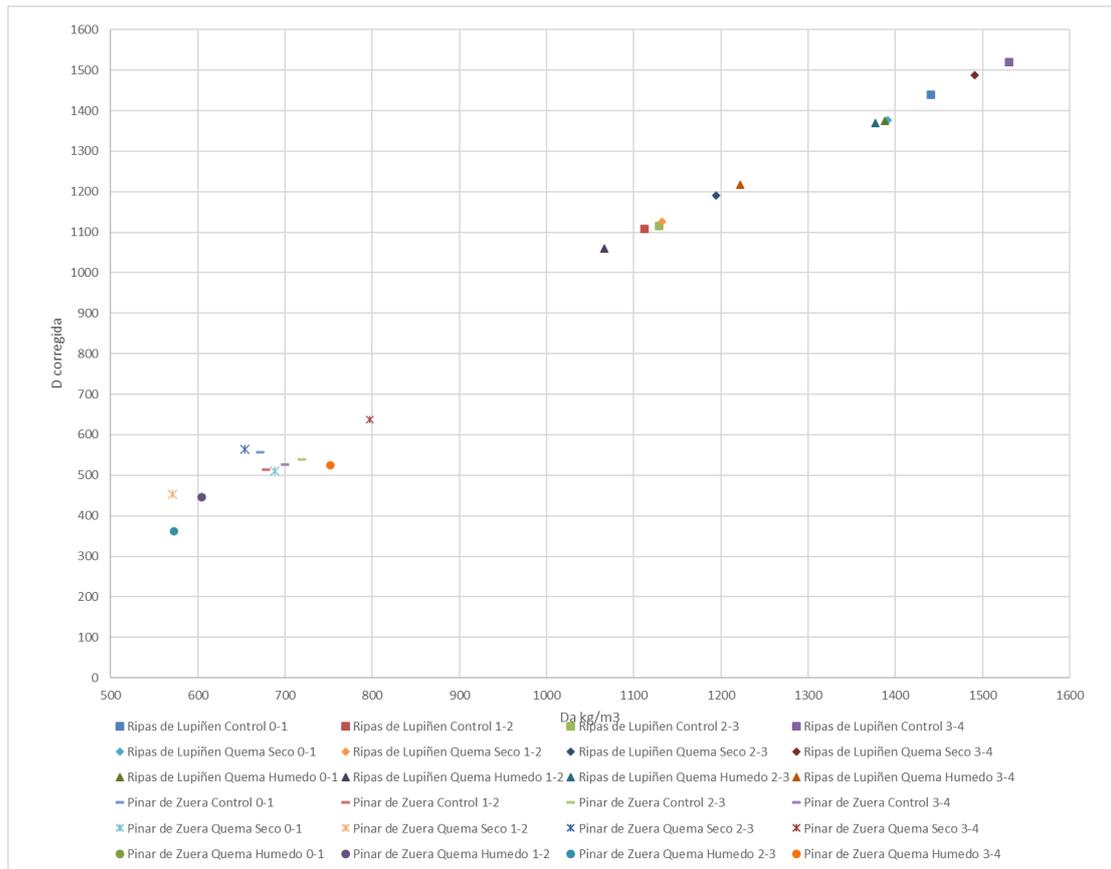


Gráfico 35: Correspondencia entre Densidad aparente y corregida.

4.1.7 Hidrofobicidad (WDPT)

Tabla 24: Datos en bruto de hidrofobicidad (WDPT) se mide en segundos

Suelo	Tratamiento	Superficie	1cm	2cm	3cm
Regosol	Control	0,60	0,80	0,60	0,60
		0,70	0,70	0,70	0,70
		0,00	0,00	0,00	0,00
	Dry Burn	0,60	0,70	0,30	0,70
		0,70	0,70	0,00	0,00
		0,00	0,00	0,00	0,00
	Wet Burn	1,00	0,00	0,00	0,00
		0,00	0,00	0,00	0,00
		0,00	0,00	0,00	0,00
Phaeozem	Control	1235,60	1625,00	943,00	185,00
		454,00	936,00	648,00	113,00
		33,60	207,60	122,20	30,00
	Dry Burn	0,00	67,50	72,50	46,30
		0,00	70,00	65,00	70,00
		0,00	352,50	243,60	52,00
	Wet Burn	0,00	30,00	12,00	0,00

Suelo	Tratamiento	Superficie	1cm	2cm	3cm
		0,00	0,00	0,00	0,00
		1,00	1,00	0,80	0,80

Tabla 25: Análisis de datos de hidrofobicidad (WDPT):

Suelo	Tratamiento	Superficie	1cm	2cm	3cm	
Regosol	Control	Promedio	0,43	0,50	0,43	0,43
		Desvest	0,38	0,44	0,38	0,38
		CV (%)	87,37	87,18	87,37	87,37
		Error	0,22	0,25	0,22	0,22
	Dry Burn	Promedio	0,43	0,47	0,10	0,23
		Desvest	0,38	0,40	0,17	0,40
		CV (%)	87,37	86,60	173,21	173,21
		Error	0,22	0,23	0,10	0,23
	Wet Burn	Promedio	0,33	0,00	0,00	0,00
		Desvest	0,58	0,00	0,00	0,00
		CV (%)	173,21	0,00	0,00	0,00
		Error	0,33	0,00	0,00	0,00
Phaeozem	Control	Promedio	574,40	922,87	571,07	109,33
		Desvest	609,98	708,79	415,77	77,57
		CV (%)	106,19	76,80	72,81	70,94
		Error	352,17	409,22	240,05	44,78
	Dry Burn	Promedio	0,00	163,33	127,03	56,10
		Desvest	0,00	163,83	101,02	12,37
		CV (%)	0,00	100,30	79,52	22,05
		Error	0,00	94,59	58,32	7,14
	Wet Burn	Promedio	0,33	10,33	4,27	0,27
		Desvest	0,58	17,04	6,71	0,46
		CV (%)	173,21	164,90	157,25	173,21
		Error	0,33	9,84	3,87	0,27

Tabla 26: Resumen de hidrofobicidad (WDPT):

WDPT		Superficie	1 cm	2 cm	3 cm
Regosol	Control	0,43 ± 0,38	0,5 ± 0,44	0,43 ± 0,38	0,43 ± 0,38
	Seco	0,43 ± 0,38	0,47 ± 0,4	0,1 ± 0,17	0,23 ± 0,4
	Húmedo	0,33 ± 0,58	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
Phaeozem	Control	574,4 ± 609,98	922,87 ± 708,79	571,07 ± 415,77	109,33 ± 77,57
	Seco	0 ± 0	163,33 ± 163,83	127,03 ± 101,02	56,1 ± 12,37
	Húmedo	0,33 ± 0,58	10,33 ± 17,04	4,27 ± 6,71	0,27 ± 0,46

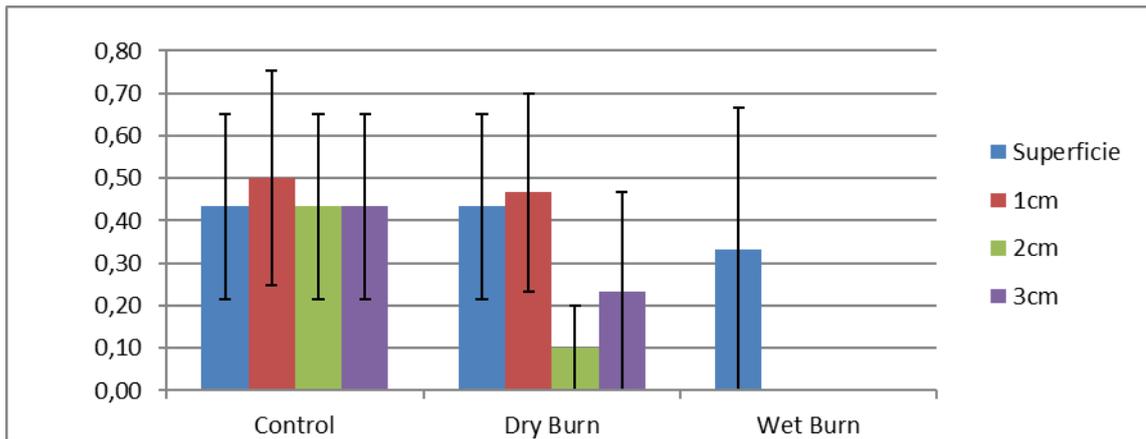


Gráfico 36: Gráfica de hidrofobicidad (wdpt) para suelo Regosol.

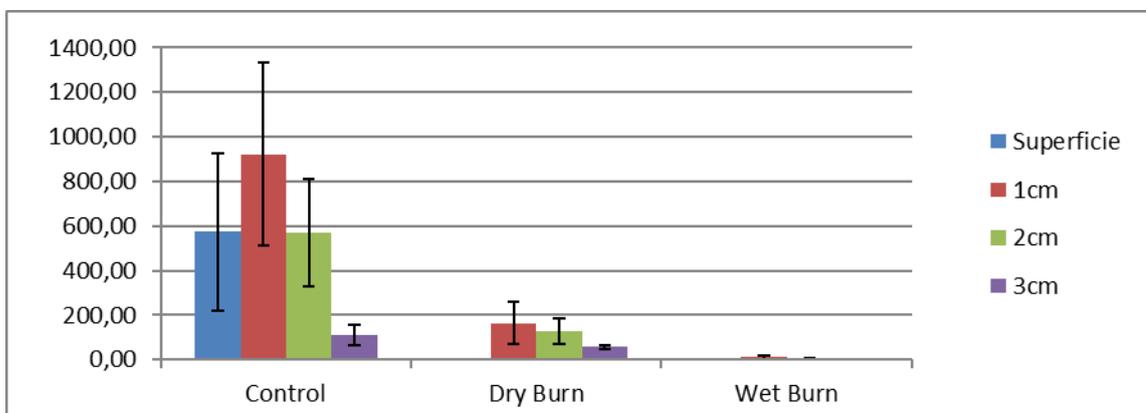


Gráfico 37: Gráfica de hidrofobicidad (wdpt) para suelo Phaeozem.

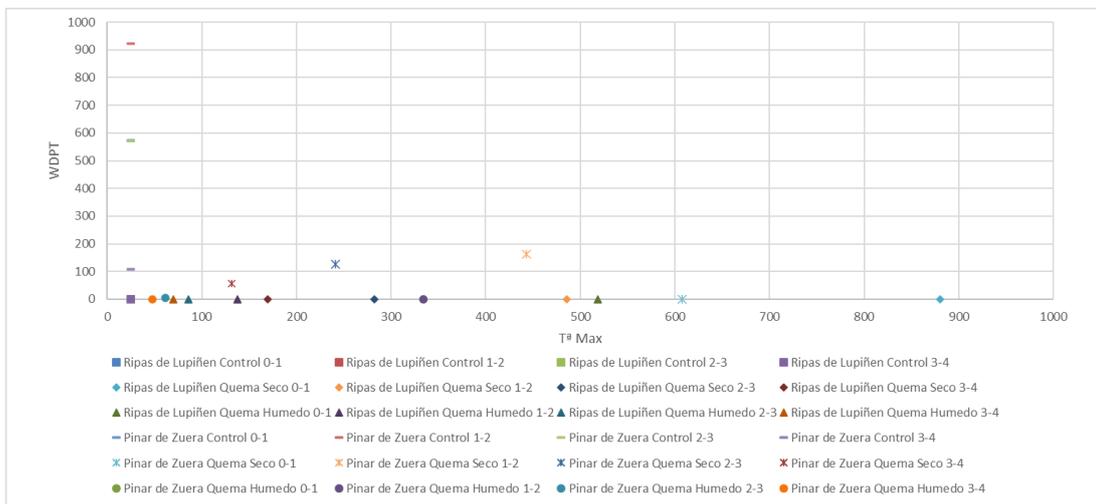


Gráfico 38: Hidrofobicidad por wdpt frente a temperatura máxima.

La hidrofobicidad presente en las muestras de Phaeozem disminuyen con la quema en seco, y prácticamente desaparecen con la quema en húmedo.

4.1.8 Hidrofobicidad (EPT)

Tabla 27: Datos de hidrofobicidad (EPT):

Suelo	Tratamiento	Superficie	1cm	2cm	3cm
Regosol	Control	0,00	0,00	0,00	0,00
		0,00	0,00	0,00	0,00
		0,00	0,00	0,00	0,00
	Dry Burn	0,00	0,00	0,00	0,00
		0,00	0,00	0,00	0,00
		0,00	0,00	0,00	0,00
		0,00	0,00	0,00	0,00
Wet Burn	0,00	0,00	0,00	0,00	
	0,00	0,00	0,00	0,00	
	0,00	0,00	0,00	0,00	
	0,00	0,00	0,00	0,00	
	0,00	0,00	0,00	0,00	
Phaeozem	Control	24,00	24,00	24,00	13,00
		13,00	24,00	36,00	24,00
		5,00	13,00	24,00	8,50
	Dry Burn	0,00	13,00	24,00	13,00
		0,00	8,50	8,50	8,50
		0,00	24,00	24,00	24,00
		0,00	5,00	5,00	0,00
Wet Burn	0,00	0,00	0,00	0,00	
	0,00	0,00	0,00	0,00	
	0,00	0,00	0,00	0,00	

Tabla 28: Análisis de datos de hidrofobicidad (EPT):

Suelo	Tratamiento	Superficie	1cm	2cm	3cm	
Regosol	Control	Promedio	0,00	0,00	0,00	0,00
		Desvest	0,00	0,00	0,00	0,00
		CV (%)	0,00	0,00	0,00	0,00
		Error	0,00	0,00	0,00	0,00
	Dry Burn	Promedio	0,00	0,00	0,00	0,00
		Desvest	0,00	0,00	0,00	0,00
		CV (%)	0,00	0,00	0,00	0,00
		Error	0,00	0,00	0,00	0,00
	Wet Burn	Promedio	0,00	0,00	0,00	0,00
		Desvest	0,00	0,00	0,00	0,00
		CV (%)	0,00	0,00	0,00	0,00
		Error	0,00	0,00	0,00	0,00
Phaeozem	Control	Promedio	14,00	20,33	28,00	15,17
		Desvest	9,54	6,35	6,93	7,97
		CV (%)	68,14	31,23	24,74	52,58
		Error	5,51	3,67	4,00	4,60
	Dry Burn	Promedio	0,00	15,17	18,83	15,17
		Desvest	0,00	7,97	8,95	7,97

Suelo	Tratamiento	Superficie	1cm	2cm	3cm
	CV (%)	0,00	52,58	47,52	52,58
	Error	0,00	4,60	5,17	4,60
	Promedio	0,00	1,67	1,67	0,00
	Desvest	0,00	2,89	2,89	0,00
	CV (%)	0,00	173,21	173,21	0,00
	Error	0,00	1,67	1,67	0,00

Tabla 29: Resumen de hidrofobicidad (EPT):

EPT		Superficie	1 cm	2 cm	3 cm
Regosol	Control	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
	Seco	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
	Húmedo	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
Phaeozem	Control	14 ± 9,54	20,33 ± 6,35	28 ± 6,93	15,17 ± 7,97
	Seco	0 ± 0	15,17 ± 7,97	18,83 ± 8,95	15,17 ± 7,97
	Húmedo	0 ± 0	1,67 ± 2,89	1,67 ± 2,89	0 ± 0

La grafica para suelo Regosol es innecesaria, pues todos sus valores son cero.

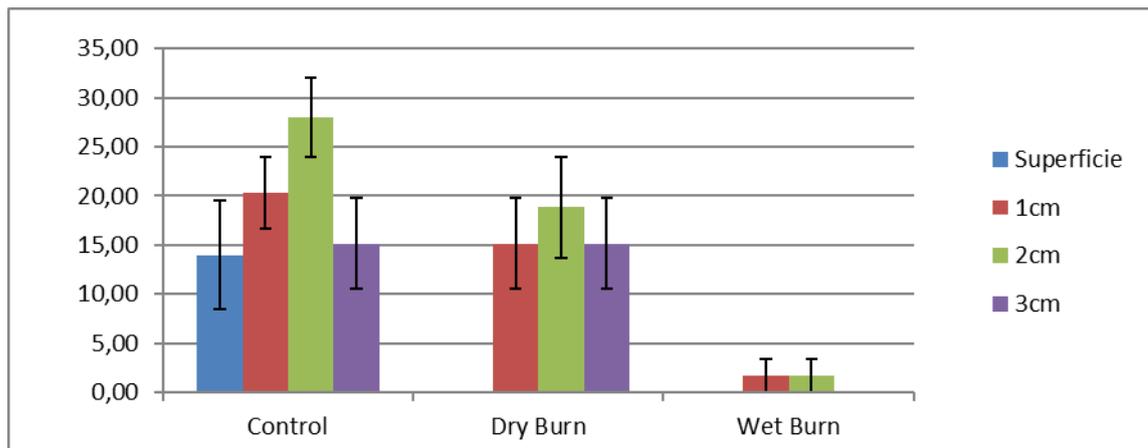


Gráfico 39: Grafica de barras con errores de hidrofobicidad por etanol para suelo Phaeozem.

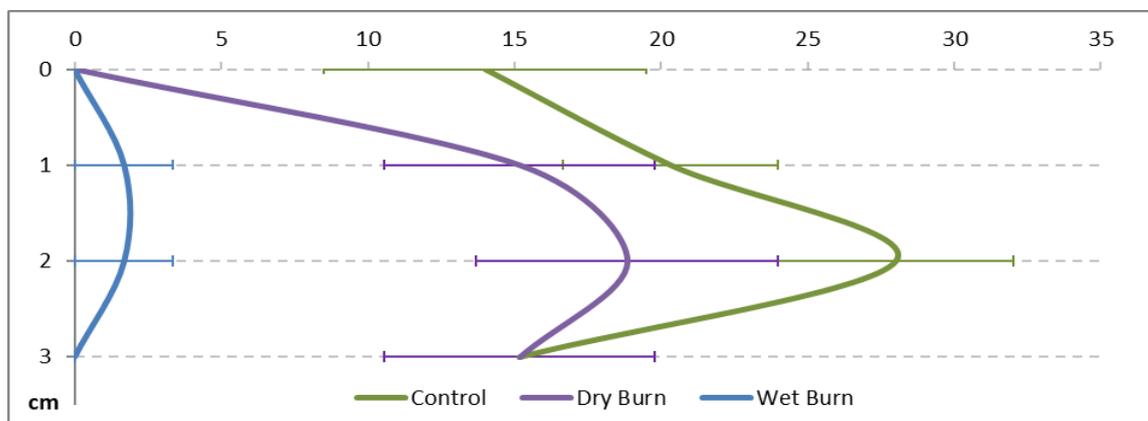


Gráfico 40: Grafica de hidrofobicidad por etanol para suelo Phaeozem por profundidad.

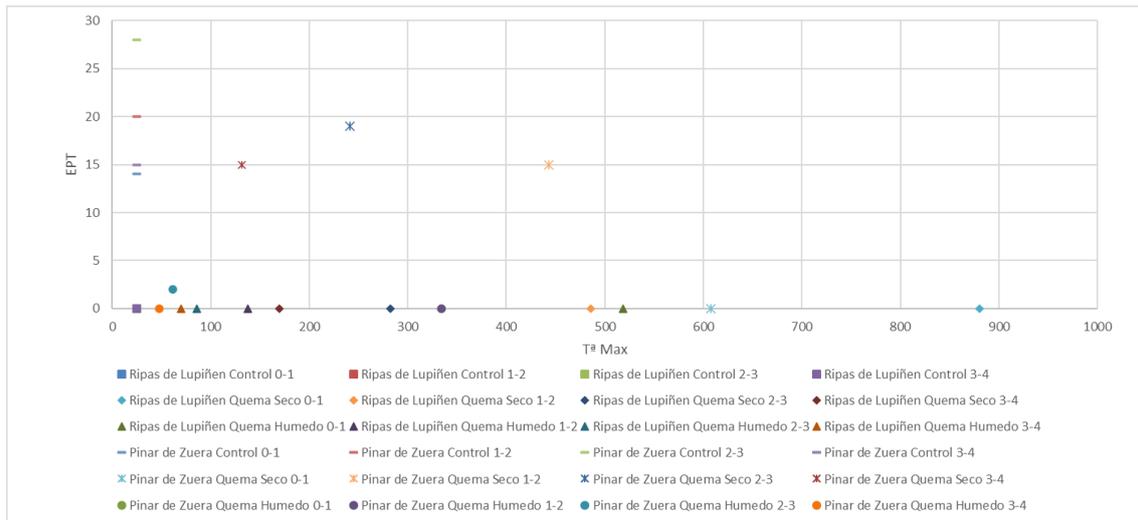


Gráfico 41: Hidrofobicidad por etanol frente a temperatura máxima.

La hidrofobicidad es una forma de medir la afeción en superficie de un suelo después de un incendio.

El Regosol de control muestra una hidrofobicidad prácticamente nula, pues ninguno de sus registros de WDPT sobrepasa los 5 segundos. El Regosol es un suelo hidrofílico, antes y después de las quemas. Y, como era de esperar, los ensayos realizados con etanol arrojan el mismo resultado.

En cambio, las muestras de Phaeozem presentan, en control, una severa hidrofobicidad, sobre todo en la segunda capa estudiada 1-2cm. Hidrofobicidad que desaparece tras los tratamientos térmicos. Las muestras llevadas a capacidad de campo por inmersión pierden más hidrofobicidad tras el tratamiento térmico, esto podría deberse a una acumulación de dos efectos, por un lado, forzar a humectarse y por otro, el tratamiento térmico.

Según lo observado por Badia la alto hidrofobicidad original en el Regosol sin quemar secado al aire, tanto de persistencia como de intensidad, disminuyó significativamente al tercer centímetro de profundidad del suelo por quema (Badía et al., 2017).

Regalado y su grupo concluyeron que la hidrofobicidad puede verse alterada por el propio contenido de humedad de los suelos, observando que la hidrofobicidad empieza a aparecer cuando la humedad está próxima a la capacidad de campo de cada suelo y la máxima permanencia se observa cerca del punto de marchitez (Regalado et al., 2003)

4.1.9 Carbonatos

Tabla 30: Datos de Carbonatos.

Suelo	Tratamiento	Réplica	Superficie	1cm	2cm	3cm
Regosol	Control	1	42,54	42,39	40,94	42,98
		2	43,19	43,26	42,09	40,23
		3	36,47	40,05	40,54	41,01
	Dry Burn	1	39,75	43,05	42,56	41,65
		2	41,26	43,05	43,06	39,73
		3	41,12	36,10	38,48	37,95

Suelo	Tratamiento	Réplica	Superficie	1cm	2cm	3cm
Phaeozem	Wet Burn	1	42,63	42,90	42,94	39,65
		2	39,13	39,53	39,17	38,23
		3	39,00	42,69	39,78	42,52
	Control	1	21,89	31,12	30,28	29,09
		2	36,95	34,83	42,44	45,05
		3	44,92	45,28	48,32	56,25
	Dry Burn	1	41,85	38,64	44,22	45,93
		2	41,34	40,90	42,70	45,68
		3	40,65	42,58	46,64	49,83
Wet Burn	1	39,26	44,57	47,98	49,59	
	2	38,64	39,23	44,29	47,79	
	3	38,96	31,23	42,19	49,89	

Tabla 31: Análisis de los carbonatos

Suelo	Tratamiento		Superficie	1cm	2cm	3cm
Regosol	Control	Promedio	40,73	41,90	41,19	41,40
		Desvest	3,70	1,66	0,81	1,42
		CV (%)	9,09	3,96	1,96	3,43
		Error	2,14	0,96	0,47	0,82
	Dry Burn	Promedio	40,71	40,73	41,37	39,78
		Desvest	0,83	4,01	2,51	1,85
		CV (%)	2,05	9,85	6,07	4,66
		Error	0,48	2,32	1,45	1,07
	Wet Burn	Promedio	40,25	41,71	40,63	40,13
		Desvest	2,06	1,89	2,02	2,18
		CV (%)	5,12	4,54	4,97	5,44
		Error	1,19	1,09	1,17	1,26
Phaeozem	Control	Promedio	34,59	37,08	40,35	43,46
		Desvest	11,70	7,34	9,20	13,65
		CV (%)	33,82	19,80	22,80	31,41
		Error	6,75	4,24	5,31	7,88
	Dry Burn	Promedio	41,28	40,70	44,52	47,15
		Desvest	0,60	1,98	1,99	2,32
		CV (%)	1,46	4,86	4,46	4,93
		Error	0,35	1,14	1,15	1,34
	Wet Burn	Promedio	38,95	38,35	44,82	49,09
		Desvest	0,31	6,72	2,93	1,13
		CV (%)	0,80	17,51	6,53	2,31
		Error	0,18	3,88	1,69	0,65

Tabla 32: Resumen de Carbonatos

CARBONATOS	Superficie	1 cm	2 cm	3 cm
------------	------------	------	------	------

Regosol	Control	40,73 ± 3,7	41,9 ± 1,66	41,19 ± 0,81	41,4 ± 1,42
	Seco	40,71 ± 0,83	40,73 ± 4,01	41,37 ± 2,51	39,78 ± 1,85
	Húmedo	40,25 ± 2,06	41,71 ± 1,09	40,63 ± 1,17	40,13 ± 1,26
Phaeozem	Control	34,59 ± 11,7	37,08 ± 7,34	40,35 ± 9,2	43,46 ± 13,65
	Seco	41,28 ± 0,6	40,7 ± 1,98	44,52 ± 1,99	47,15 ± 2,32
	Húmedo	38,95 ± 0,31	38,35 ± 6,72	44,82 ± 2,93	49,09 ± 1,13

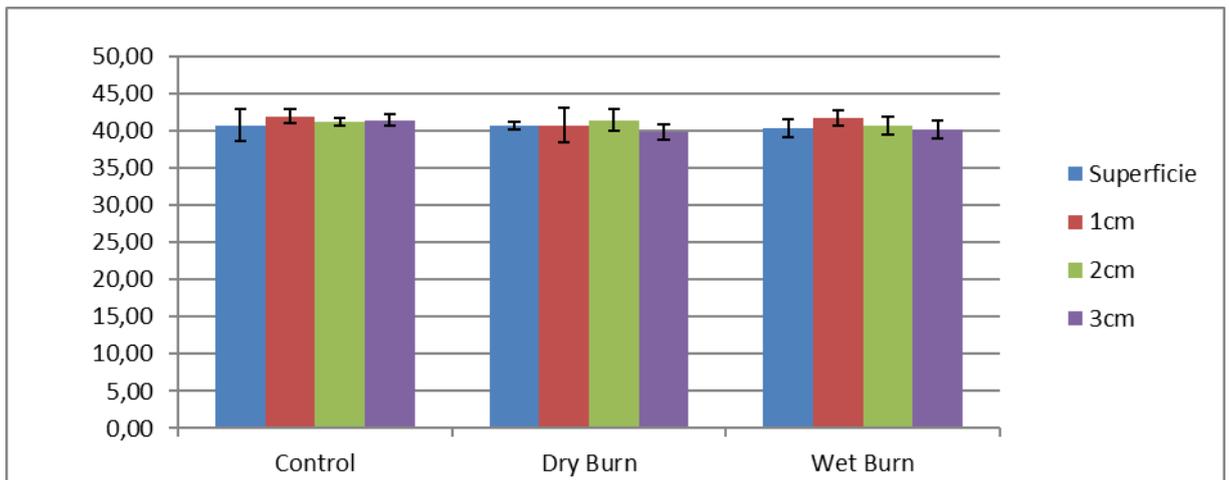


Gráfico 42: Carbonatos en Regosol.

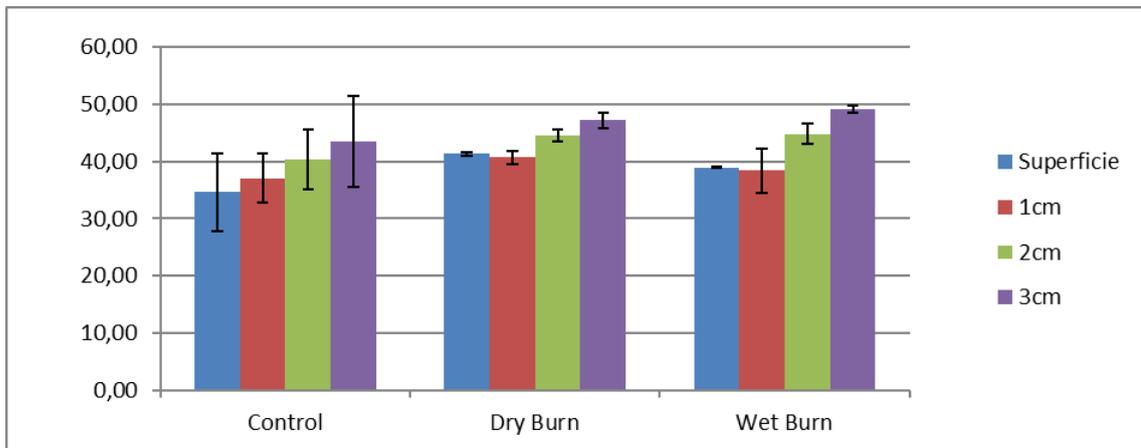


Gráfico 43: Carbonatos en Phaeozem.

Los carbonatos no se ven afectados por el fuego. Las fluctuaciones encontradas son propias de la naturaleza del suelo.

4.1.10 Carbono inorgánico(mineral):

Tabla 33: Datos de carbono inorgánico:

Suelo	Tratamiento	Superficie	1cm	2cm	3cm
Regosol	Control	5,39	5,39	5,50	5,55
		5,51	5,38	5,46	5,46

Suelo	Tratamiento	Superficie	1cm	2cm	3cm	
	Dry Burn	5,37	5,32	5,30	5,28	
		5,53	5,33	5,30	5,27	
		5,50	5,50	5,22	5,28	
		5,35	5,29	5,29	5,36	
	Wet Burn	5,37	5,24	6,34	5,35	
		5,42	5,33	5,13	5,32	
		5,59	5,42	5,40	5,25	
	Phaeozem	Control	5,79	6,78	5,31	6,50
			7,55	6,99	6,42	8,07
			7,96	8,35	5,96	4,80
Dry Burn		7,98	7,39	7,05	6,75	
		7,00	7,02	6,92	6,37	
		7,60	7,51	6,80	6,36	
		8,02	5,66	5,75	6,48	
Wet Burn		7,15	7,53	5,90	5,88	
		7,89	8,13	4,86	7,16	

Tabla 34: Análisis de los datos del carbono inorgánico:

Suelo	Tratamiento	Superficie	1cm	2cm	3cm		
Regosol	Control	Promedio	5,43	5,36	5,42	5,43	
		Desvest	0,08	0,04	0,10	0,14	
		CV (%)	1,41	0,74	1,92	2,49	
		Error	0,04	0,02	0,06	0,08	
	Dry Burn	Promedio	5,46	5,37	5,27	5,30	
		Desvest	0,10	0,11	0,04	0,05	
		CV (%)	1,75	2,07	0,81	0,99	
		Error	0,06	0,06	0,02	0,03	
	Wet Burn	Promedio	5,46	5,33	5,62	5,31	
		Desvest	0,11	0,09	0,64	0,05	
		CV (%)	2,08	1,72	11,33	0,98	
		Error	0,07	0,05	0,37	0,03	
	Phaeozem	Control	Promedio	7,10	7,37	5,89	6,46
			Desvest	1,16	0,85	0,56	1,64
			CV (%)	16,30	11,56	9,48	25,41
			Error	0,67	0,49	0,32	0,95
Dry Burn		Promedio	7,53	7,30	6,92	6,49	
		Desvest	0,49	0,26	0,12	0,22	
		CV (%)	6,55	3,51	1,79	3,40	
		Error	0,28	0,15	0,07	0,13	
Wet Burn		Promedio	7,69	7,11	5,50	6,50	
		Desvest	0,47	1,29	0,56	0,64	

Suelo	Tratamiento	Superficie	1cm	2cm	3cm
	CV (%)	6,05	18,17	10,25	9,83
	Error	0,27	0,75	0,33	0,37

Tabla 35: Resumen del carbono inorgánico:

C. in		Superficie	1 cm	2 cm	3 cm
Regosol	Control	5,43 ± 0,08	5,36 ± 0,04	5,42 ± 0,1	5,43 ± 0,14
	Seco	5,46 ± 0,1	5,37 ± 0,11	5,27 ± 0,04	5,3 ± 0,05
	Húmedo	5,46 ± 0,11	5,33 ± 0,05	5,62 ± 0,37	5,31 ± 0,03
Phaeozem	Control	7,1 ± 1,16	7,37 ± 0,85	5,89 ± 0,56	6,46 ± 1,64
	Seco	7,53 ± 0,49	7,3 ± 0,26	6,92 ± 0,12	6,49 ± 0,22
	Húmedo	7,69 ± 0,47	7,11 ± 1,29	5,5 ± 0,56	6,5 ± 0,64

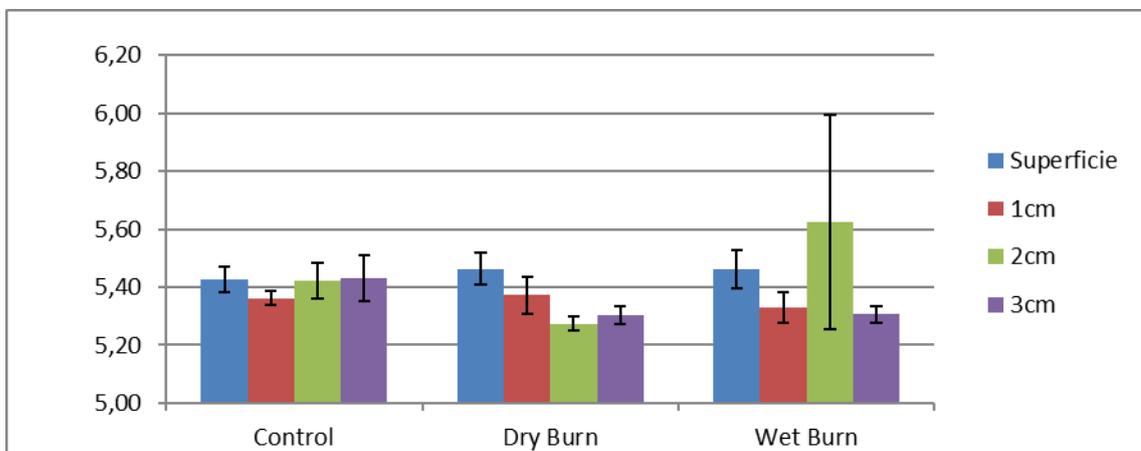


Gráfico 44: Gráfica de carbono inorgánico para suelo Regosol.

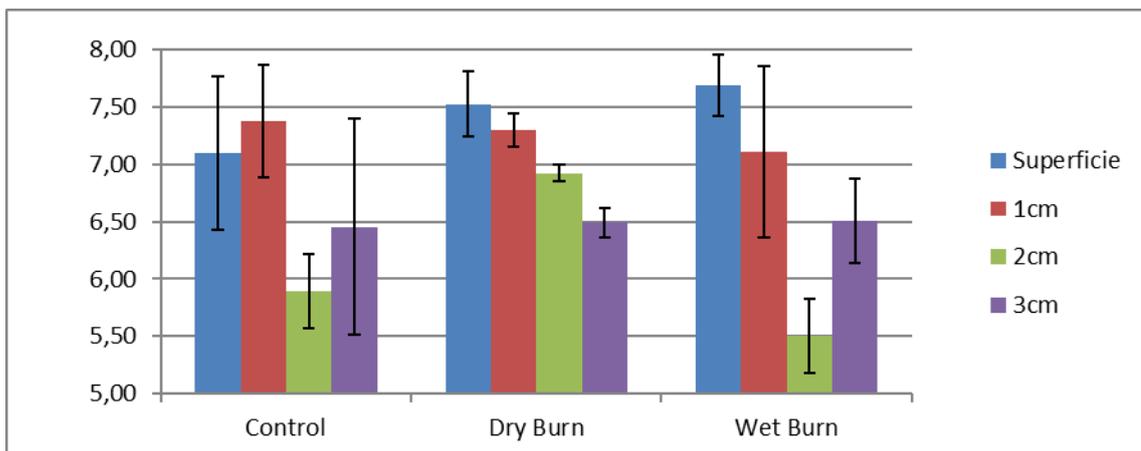


Gráfico 45: Gráfica de carbono inorgánico para suelo Phaeozem.

Debido a que los errores y valores son tan bajos debemos ampliar la escala de las gráficas.

Las muestras de Regosol prácticamente no sufren alteración en cuanto al carbono inorgánico, algo esperable, pues prácticamente no hay carbono inicial en las muestras.

Las muestras de Phaeozem si muestran un cambio. En las muestras de tratamiento seco sufren un ligero aumento en la primera capa y un visible aumento en la tercera, mientras que el tratamiento húmedo permite aumentar el Ci de la primera capa y mantiene el resto más estables.

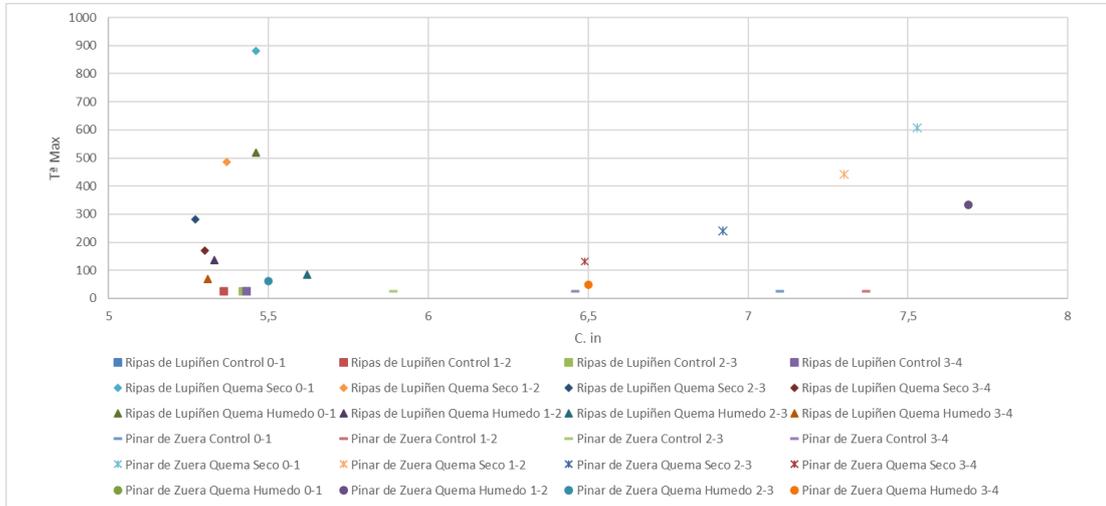


Gráfico 46: Carbono mineral frente temperatura máxima.

El regosol tiene valores estables en torno al 5.4, mientras que el Phaeozem fluctúa entre 6 y 7.5.

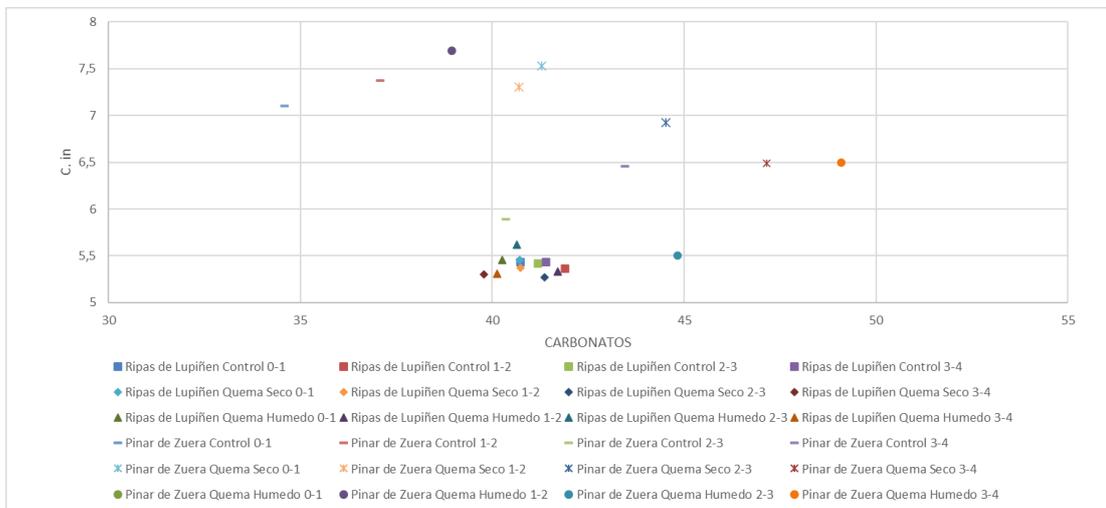


Gráfico 47: Carbono mineral frente a carbonatos.

4.1.11 Carbono oxidable (orgánico)

Tabla 36: Datos de carbono oxidable:

Suelo	Tratamiento	Superficie	1cm	2cm	3cm
Regosol	Control	1,01	0,77	0,66	0,62
		0,89	0,66	0,67	0,59
		1,01	0,79	0,75	0,62

	Dry Burn	0,33	0,69	0,70	0,69
		0,37	0,56	0,71	0,70
		0,43	0,64	0,71	0,63
	Wet Burn	0,48	0,69	0,58	0,51
		0,57	0,58	0,65	0,58
		0,68	0,61	0,57	0,58
Phaeozem	Control	17,33	14,58	13,59	10,79
		14,22	12,60	8,98	7,15
		9,55	9,15	7,51	6,76
	Dry Burn	6,58	7,52	6,48	5,50
		6,87	9,28	7,81	6,99
		9,67	8,87	6,06	5,12
	Wet Burn	9,95	8,30	7,59	5,49
		10,44	9,76	7,89	6,59
		10,98	11,18	11,94	5,59

Tabla 37: Análisis de los datos de C. ox.:

Suelo	Tratamiento	Superficie	1cm	2cm	3cm	
Regosol	Control	Promedio	0,97	0,74	0,69	0,61
		Desvest	0,07	0,07	0,05	0,02
		CV (%)	7,19	9,80	6,94	2,47
		Error	0,04	0,04	0,03	0,01
	Dry Burn	Promedio	0,38	0,63	0,71	0,67
		Desvest	0,05	0,06	0,00	0,04
		CV (%)	13,44	10,17	0,60	5,76
		Error	0,03	0,04	0,00	0,02
	Wet Burn	Promedio	0,58	0,63	0,60	0,56
		Desvest	0,10	0,06	0,04	0,04
		CV (%)	17,12	9,23	7,38	7,05
		Error	0,06	0,03	0,03	0,02
Phaeozem	Control	Promedio	13,70	12,11	10,03	8,23
		Desvest	3,92	2,75	3,17	2,22
		CV (%)	28,62	22,70	31,63	27,01
		Error	2,26	1,59	1,83	1,28
	Dry Burn	Promedio	7,71	8,56	6,78	5,87
		Desvest	1,71	0,92	0,91	0,99
		CV (%)	22,14	10,76	13,47	16,88
		Error	0,99	0,53	0,53	0,57
	Wet Burn	Promedio	10,46	9,74	9,14	5,89
		Desvest	0,51	1,44	2,43	0,61
		CV (%)	4,92	14,75	26,61	10,30
		Error	0,30	0,83	1,40	0,35

Tabla 38: Resumen de los datos de C. ox.:

C. ox		Superficie	1 cm	2 cm	3 cm
Regosol	Control	0,97 ± 0,07	0,74 ± 0,07	0,69 ± 0,05	0,61 ± 0,02
	Seco	0,38 ± 0,05	0,63 ± 0,06	0,71 ± 0	0,67 ± 0,04
	Húmedo	0,58 ± 0,1	0,63 ± 0,03	0,6 ± 0,03	0,56 ± 0,02
Phaeozem	Control	13,7 ± 3,92	12,11 ± 2,75	10,03 ± 3,17	8,23 ± 2,22
	Seco	7,71 ± 1,71	8,56 ± 0,92	6,78 ± 0,91	5,87 ± 0,99
	Húmedo	10,46 ± 0,51	9,74 ± 1,44	9,14 ± 2,43	5,89 ± 0,61

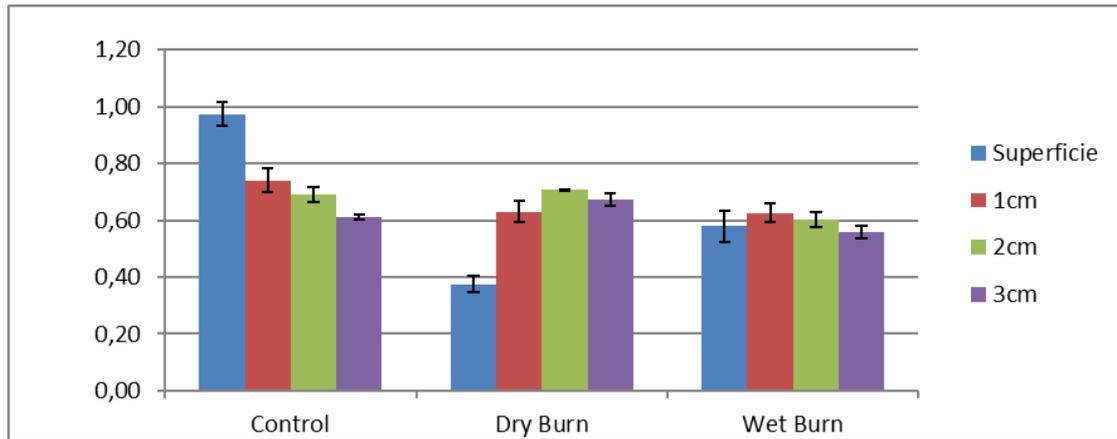


Gráfico 48: Gráfica de carbono oxidable para suelo Regosol.

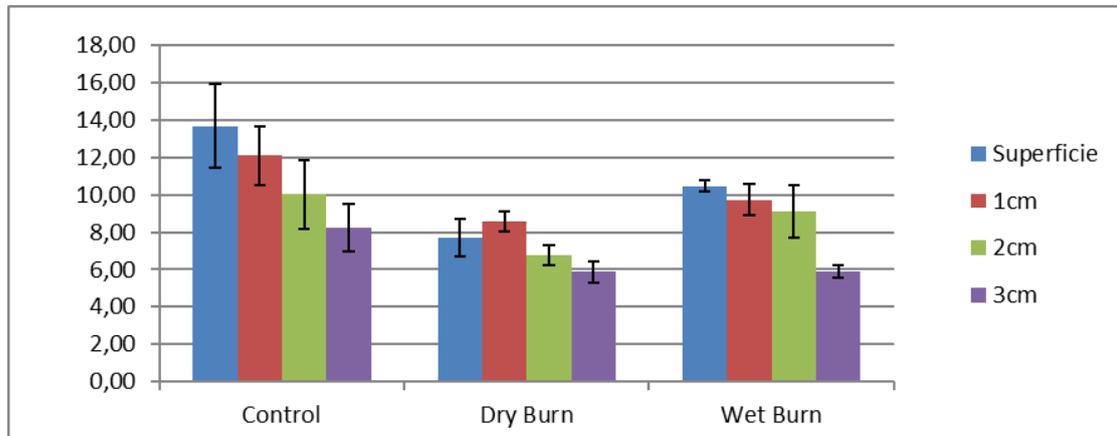


Gráfico 49: Gráfica de carbono oxidable para suelo Phaeozem.

En caso del carbono orgánico podemos ver como el fuego si ha mermado su presencia en las primeras capas del Regosol, teniéndolo más difícil en la quema en húmedo. Las muestras de Phaeozem se ven más alteradas por la presencia del fuego, pues el carbono orgánico disminuye sustancialmente. Una vez más el agua presenta una defensa añadida a la otorgada por la porosidad, esta vez para el C. ox.

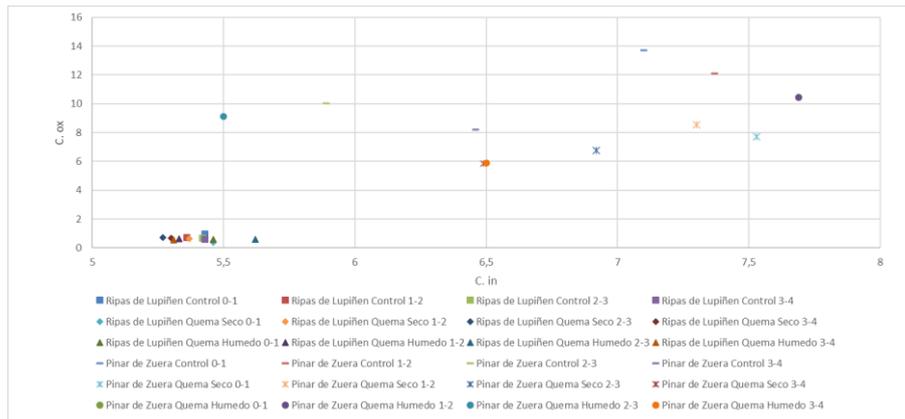


Gráfico 50: Materia orgánica frente a carbono mineral

4.1.12 Carbono total:

Tabla 39: Datos de carbono total:

Suelo	Tratamiento	Superficie	1cm	2cm	3cm
Regosol	Control	6,41	6,16	6,16	6,17
		6,41	6,04	6,13	6,05
		6,39	6,11	6,05	5,90
	Dry Burn	5,86	6,02	6,01	5,96
		5,88	6,06	5,94	5,98
		5,78	5,92	6,00	5,99
	Wet Burn	5,86	5,93	6,93	5,86
		5,99	5,91	5,79	5,91
		6,27	6,03	5,97	5,83
Phaeozem	Control	23,12	21,36	18,90	17,29
		21,77	19,59	15,40	15,22
		17,51	17,50	13,47	11,56
	Dry Burn	14,56	14,91	13,53	12,25
		13,87	16,30	14,73	13,36
		17,27	16,38	12,86	11,48
	Wet Burn	17,97	13,96	13,34	11,97
		17,59	17,29	13,79	12,47
		18,87	19,31	16,80	12,75

Tabla 40: Análisis de los datos de carbono total:

Suelo	Tratamiento	Superficie	1cm	2cm	3cm	
Regosol	Promedio	6,40	6,10	6,11	6,04	
	Control	Desvest	0,01	0,06	0,06	0,13
		CV (%)	0,20	0,98	0,92	2,20
		Error	0,01	0,03	0,03	0,08
	Dry Burn	Promedio	5,84	6,00	5,98	5,98

Suelo	Tratamiento	Superficie	1cm	2cm	3cm		
Phaeozem	Desvest	0,05	0,07	0,04	0,02		
		CV (%)	0,87	1,16	0,65	0,30	
		Error	0,03	0,04	0,02	0,01	
	Wet Burn	Promedio	6,04	5,95	6,23	5,86	
		Desvest	0,21	0,06	0,61	0,04	
		CV (%)	3,50	1,07	9,82	0,67	
	Error	0,12	0,04	0,35	0,02		
		Control	Promedio	20,80	19,48	15,92	14,69
			Desvest	2,93	1,93	2,75	2,90
	CV (%)		14,08	9,92	17,29	19,75	
	Error		1,69	1,12	1,59	1,68	
	Dry Burn	Promedio	15,23	15,86	13,71	12,36	
Desvest		1,80	0,83	0,95	0,95		
CV (%)		11,80	5,21	6,91	7,64		
Error		1,04	0,48	0,55	0,55		
Wet Burn	Promedio	18,14	16,85	14,64	12,40		
	Desvest	0,66	2,70	1,88	0,40		
	CV (%)	3,62	16,03	12,85	3,19		
	Error	0,38	1,56	1,09	0,23		

Tabla 41: Resumen de los datos de carbono total:

Ct		Superficie	1 cm	2 cm	3 cm
Regosol	Control	6,4 ± 0,01	6,1 ± 0,06	6,11 ± 0,06	6,04 ± 0,13
	Seco	5,84 ± 0,05	6 ± 0,07	5,98 ± 0,04	5,98 ± 0,02
	Húmedo	6,04 ± 0,21	5,95 ± 0,04	6,23 ± 0,35	5,86 ± 0,02
Phaeozem	Control	20,8 ± 2,93	19,48 ± 1,93	15,92 ± 2,75	14,69 ± 2,9
	Seco	15,23 ± 1,8	15,86 ± 0,83	13,71 ± 0,95	12,36 ± 0,95
	Húmedo	18,14 ± 0,66	16,85 ± 2,7	14,64 ± 1,88	12,4 ± 0,4

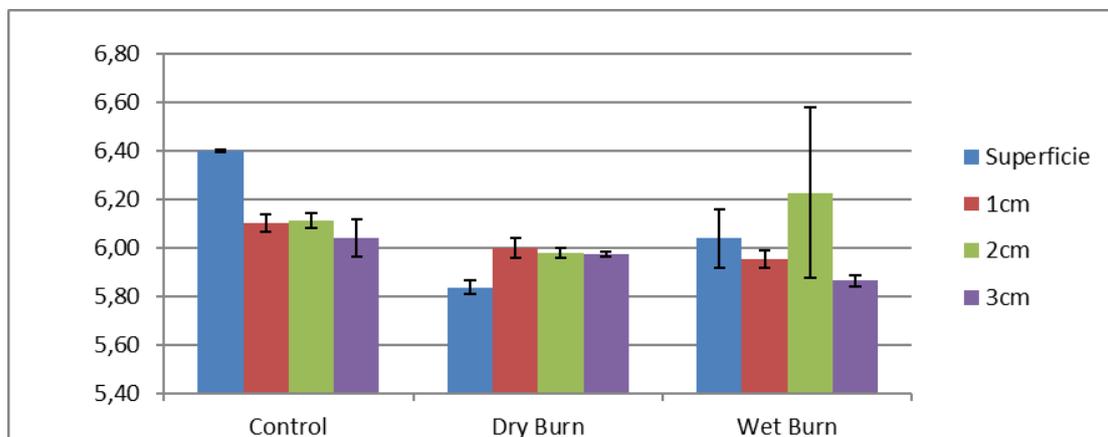


Gráfico 51: Grafica de carbono total para suelo Regosol.

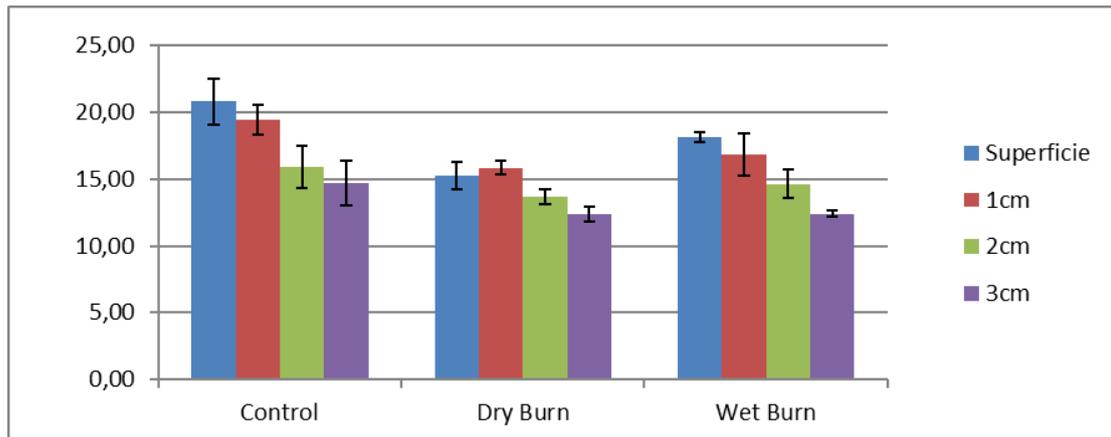


Gráfico 52: Gráfica de carbono total para suelo Phaeozem.

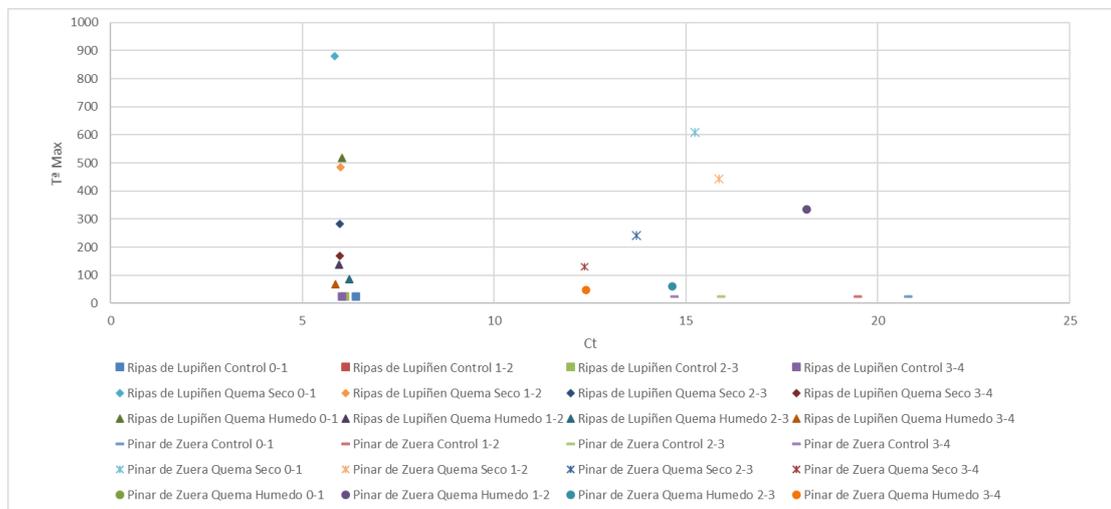


Gráfico 53: Carbono total frente a temperatura máxima.

Se aprecia como el Regosol mantiene unos valores estables de carbono total, mientras que el Phaeozem si sufre pérdidas de carbono. Estas pérdidas son más visibles en superficie para los tratamientos en seco. En esta ocasión, la porosidad, en solitario, del suelo no hace visible esa barrera que mostraba en situaciones anteriores. En cambio, al mostrarse con el agua sí que manifiesta esa capacidad de protección.

En 2017, Badía apuntó a las condiciones de humedad como una defensa en la superficie a los efectos del fuego, pero que más profundo de un centímetro no había cambios significativos (Badía et al., 2017).

José A. González, concluyo en 2004 que el efecto del fuego en la materia orgánica del suelo depende en gran medida, entre otros factores, del tipo e intensidad del fuego, suelo humedad, tipo de suelo y naturaleza de los materiales quemados (González-Pérez et al., 2004). Por eso no debe extrañar que los valores aquí mostrados se comporten de forma distinta.

4.1.13 Nitrógeno total:

Tabla 42: Datos de nitrógeno total:

Suelo	Tratamiento	Superficie	1cm	2cm	3cm
Regosol	Control	0,12	0,10	0,10	0,08
		0,13	0,10	0,10	0,08
		0,12	0,09	0,08	0,07
	Dry Burn	0,04	0,09	0,10	0,08
		0,05	0,07	0,09	0,09
		0,06	0,12	0,08	0,08
	Wet Burn	0,06	0,11	0,09	0,06
		0,07	0,09	0,11	0,06
		0,11	0,11	0,07	0,07
Phaeozem	Control	0,98	0,83	0,83	0,76
		0,91	0,84	0,60	0,58
		0,71	0,73	0,52	0,35
	Dry Burn	0,57	0,64	0,54	0,46
		0,52	0,66	0,58	0,52
		0,76	0,67	0,48	0,37
	Wet Burn	0,79	0,65	0,52	0,43
		0,73	0,72	0,60	0,44
		0,86	0,87	0,73	0,45

Tabla 43: Análisis de los datos de nitrógeno total:

Suelo	Tratamiento	Superficie	1cm	2cm	3cm		
Regosol	Control	Promedio	0,12	0,10	0,09	0,08	
		Desvest	0,00	0,01	0,01	0,00	
		CV (%)	1,40	9,83	9,98	5,26	
		Error	0,00	0,01	0,01	0,00	
	Dry Burn	Promedio	0,05	0,09	0,09	0,08	
		Desvest	0,01	0,03	0,01	0,01	
		CV (%)	14,86	30,95	10,90	10,10	
		Error	0,00	0,02	0,01	0,00	
	Wet Burn	Promedio	0,08	0,10	0,09	0,06	
		Desvest	0,03	0,01	0,02	0,00	
		CV (%)	33,88	8,96	20,74	6,35	
		Error	0,02	0,01	0,01	0,00	
	Phaeozem	Control	Promedio	0,87	0,80	0,65	0,56
			Desvest	0,14	0,06	0,16	0,20
			CV (%)	16,29	7,90	24,77	36,05
			Error	0,08	0,04	0,09	0,12

Suelo	Tratamiento		Superficie	1cm	2cm	3cm
	Dry Burn	Promedio	0,62	0,66	0,53	0,45
		Desvest	0,12	0,02	0,05	0,07
		CV (%)	20,10	2,90	8,90	16,56
		Error	0,07	0,01	0,03	0,04
	Wet Burn	Promedio	0,79	0,75	0,62	0,44
		Desvest	0,07	0,11	0,11	0,01
		CV (%)	8,43	14,57	17,30	2,06
		Error	0,04	0,06	0,06	0,01

Tabla 44: Resumen de nitrógeno total:

Nt		Superficie	1 cm	2 cm	3 cm
Regosol	Control	0,12 ± 0	0,1 ± 0,01	0,09 ± 0,01	0,08 ± 0
	Seco	0,05 ± 0,01	0,09 ± 0,03	0,09 ± 0,01	0,08 ± 0,01
	Húmedo	0,08 ± 0,03	0,1 ± 0,01	0,09 ± 0,01	0,06 ± 0
Phaeozem	Control	0,87 ± 0,14	0,8 ± 0,06	0,65 ± 0,16	0,56 ± 0,2
	Seco	0,62 ± 0,12	0,66 ± 0,02	0,53 ± 0,05	0,45 ± 0,07
	Húmedo	0,79 ± 0,07	0,75 ± 0,11	0,62 ± 0,11	0,44 ± 0,01

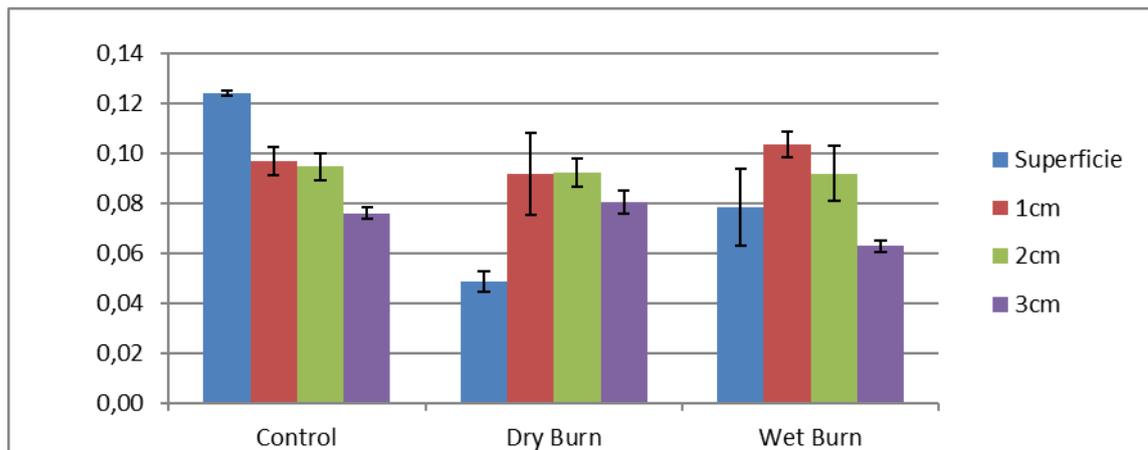


Gráfico 54: Gráfica de nitrógeno total para suelo Regosol.

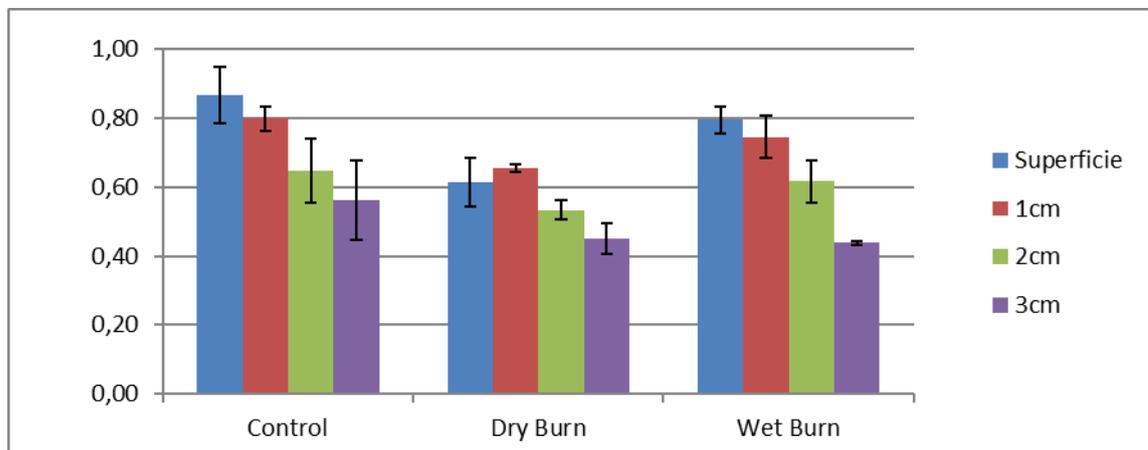


Gráfico 55: Gráfica de nitrógeno total para suelo Phaeozem.

La pérdida de nitrógeno se da sobre todo en el Phaeozem, ya que el Regosol prácticamente no tiene nada de Nitrógeno. Se puede decir que, al quemar los suelos, la materia que contiene el nitrógeno se oxida y calcina y este se volatiliza. La materia orgánica es la que contiene el nitrógeno, en raíces, tallos y hojas se acumula más que en troncos o ramas. Otra vez, el agua frena el efecto del fuego para eliminar este nitrógeno.

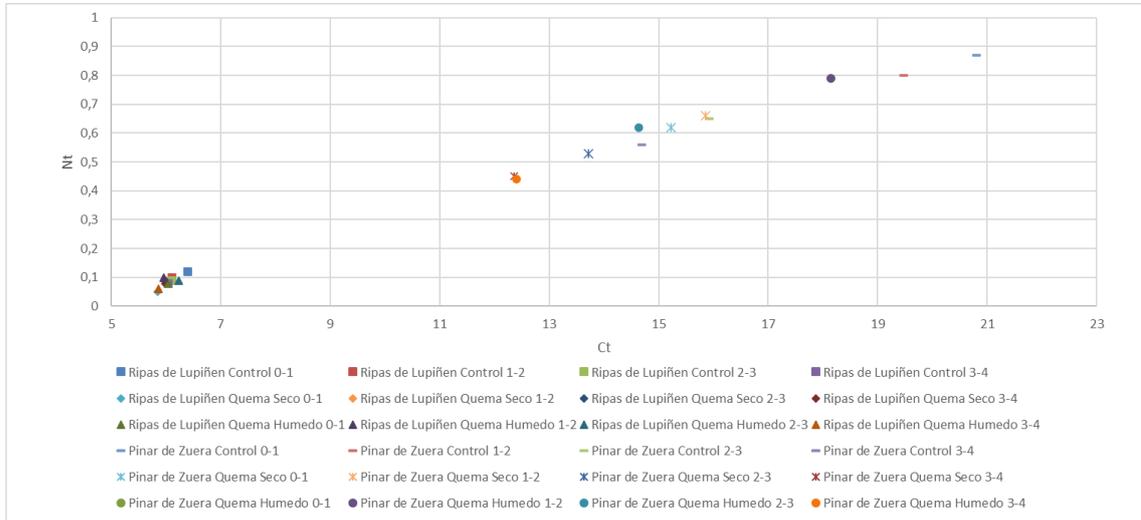


Gráfico 56: Nitrógeno total frente a Carbonato total.

Debido a la relación C/N visible en la siguiente gráfica, el comportamiento del Nitrógeno frente a la temperatura es muy similar al del carbono total.

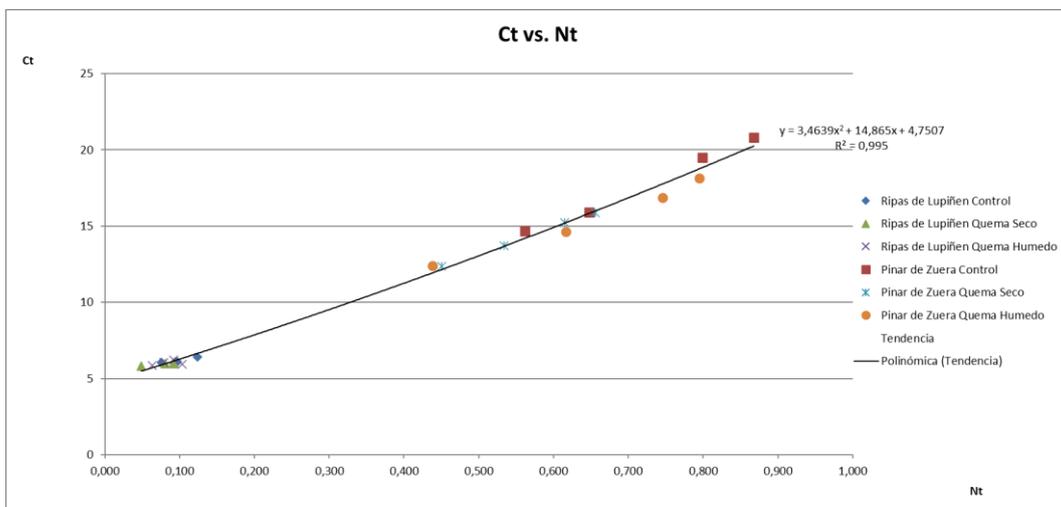


Gráfico 57: Relación Carbono/Nitrógeno

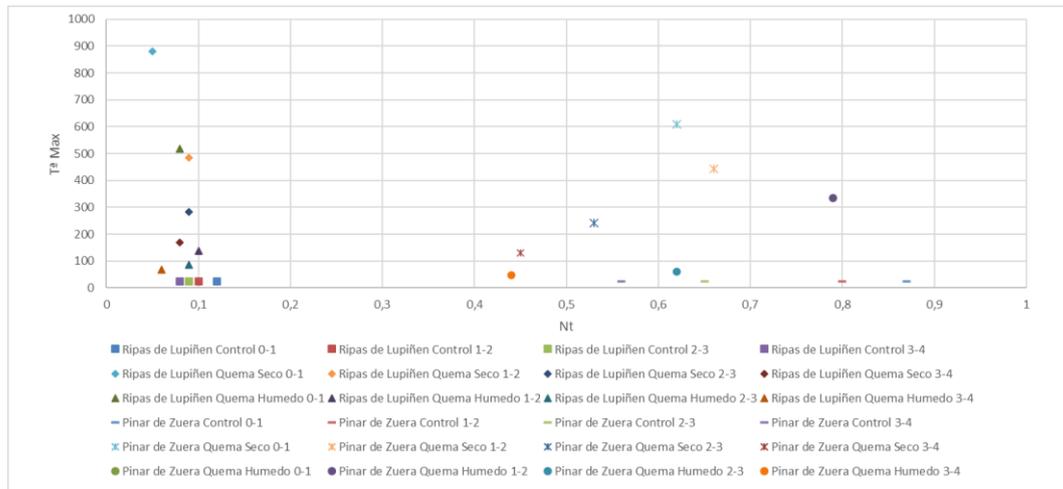


Gráfico 58: Nitrógeno total frente a Temperatura.

Se observa como el Regosol no presenta grandes alteraciones mientras que el Phaeozem presenta valores caóticos.

4.1.14 pH al agua 1:2.5

Tabla 45: Datos de pH 1:2.5 :

Suelo	Tratamiento	Superficie	1cm	2cm	3cm
Regosol	Control	7,99	8,32	8,35	8,35
		8,18	8,33	8,36	8,35
		8,24	8,42	8,48	8,55
	Dry Burn	8,91	7,82	8,21	8,48
		8,57	7,93	8,29	8,39
		9,44	7,93	8,25	8,48
	Wet Burn	8,38	8,46	8,48	8,46
		8,36	8,61	8,63	8,59
		8,17	8,55	8,58	8,53
		7,74	7,97	7,98	7,99
Phaeozem	Control	7,93	8,02	8,12	8,13
		8,06	8,10	8,16	8,23
		8,15	7,81	7,97	7,98
	Dry Burn	8,10	7,87	7,90	7,97
		8,02	7,97	8,10	8,12
		7,83	8,01	8,00	7,97
	Wet Burn	7,84	8,10	8,07	8,17
		8,14	8,11	8,19	8,28

Tabla 46: Análisis de los datos de pH 1:2.5 :

Suelo	Tratamiento	Superficie	1cm	2cm	3cm	
Regosol	Control	Promedio	8,14	8,36	8,39	8,42
		Desvest	0,13	0,05	0,07	0,12
		CV (%)	1,59	0,62	0,84	1,39
		Error	0,07	0,03	0,04	0,07
	Dry Burn	Promedio	8,97	7,89	8,25	8,45
		Desvest	0,44	0,07	0,04	0,05
		CV (%)	4,86	0,84	0,52	0,63
		Error	0,25	0,04	0,02	0,03
	Wet Burn	Promedio	8,30	8,54	8,56	8,52
		Desvest	0,11	0,08	0,07	0,07
		CV (%)	1,36	0,91	0,87	0,76
		Error	0,07	0,04	0,04	0,04
Phaeozem	Control	Promedio	7,91	8,03	8,09	8,11
		Desvest	0,16	0,07	0,09	0,12
		CV (%)	2,01	0,85	1,15	1,49
		Error	0,09	0,04	0,05	0,07
	Dry Burn	Promedio	8,09	7,88	7,99	8,02
		Desvest	0,07	0,08	0,10	0,09
		CV (%)	0,84	1,02	1,30	1,07
		Error	0,04	0,05	0,06	0,05
	Wet Burn	Promedio	7,94	8,07	8,08	8,14
		Desvest	0,18	0,05	0,09	0,15
		CV (%)	2,24	0,67	1,16	1,90
		Error	0,10	0,03	0,05	0,09

Tabla 47: Resumen de pH 1:2.5 :

pH 1:2,5	Superficie	1 cm	2 cm	3 cm	
Regosol	Control	8,14 ± 0,13	8,36 ± 0,05	8,39 ± 0,07	8,42 ± 0,12
	Seco	8,97 ± 0,44	7,89 ± 0,07	8,25 ± 0,04	8,45 ± 0,05
	Húmedo	8,3 ± 0,11	8,54 ± 0,04	8,56 ± 0,04	8,52 ± 0,04
Phaeozem	Control	7,91 ± 0,16	8,03 ± 0,07	8,09 ± 0,09	8,11 ± 0,12
	Seco	8,09 ± 0,07	7,88 ± 0,08	7,99 ± 0,1	8,02 ± 0,09
	Húmedo	7,94 ± 0,18	8,07 ± 0,05	8,08 ± 0,09	8,14 ± 0,15

El trabajo de Aznar, Javier M. de 2016 mostró como en sus muestras el pH aumentó en el primer horizonte (Aznar et al., 2016). Los valores obtenidos en el trabajo actual muestran exactamente lo mismo para las muestras quemadas en seco.

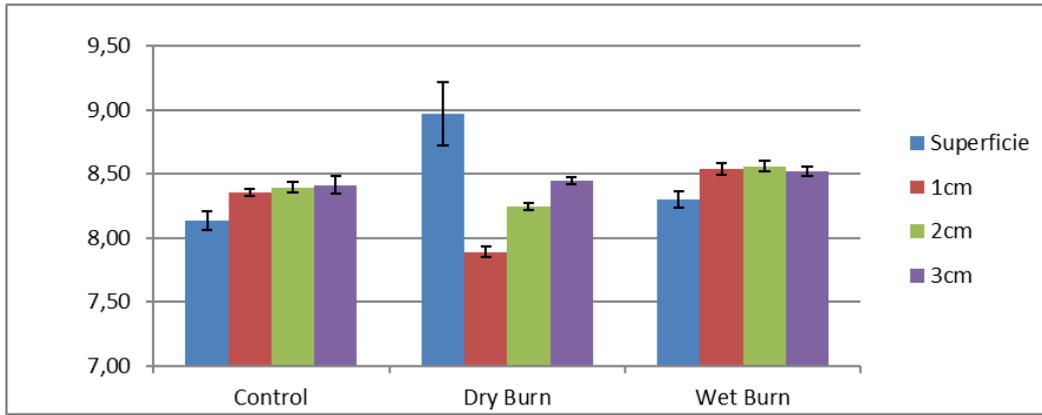


Gráfico 59: Gráfica de pH 1:2.5 para suelo Regosol.

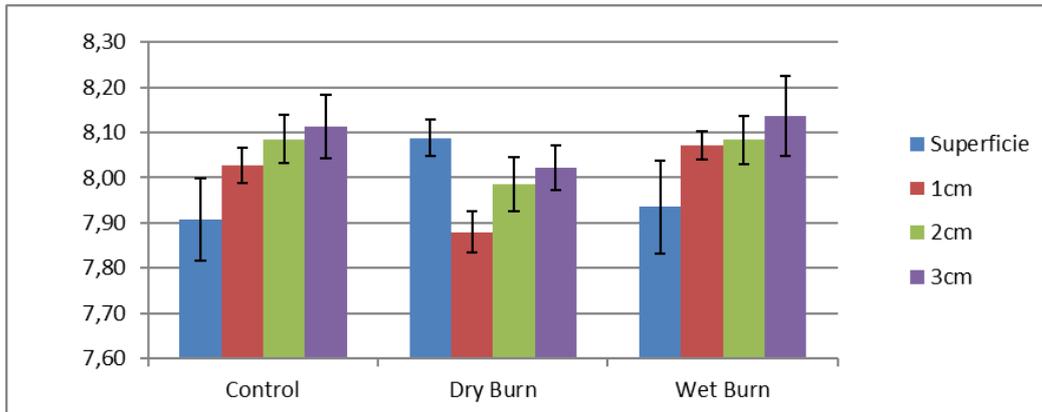


Gráfico 60: Gráfica de pH al agua 1:2.5 para suelo Phaeozem.

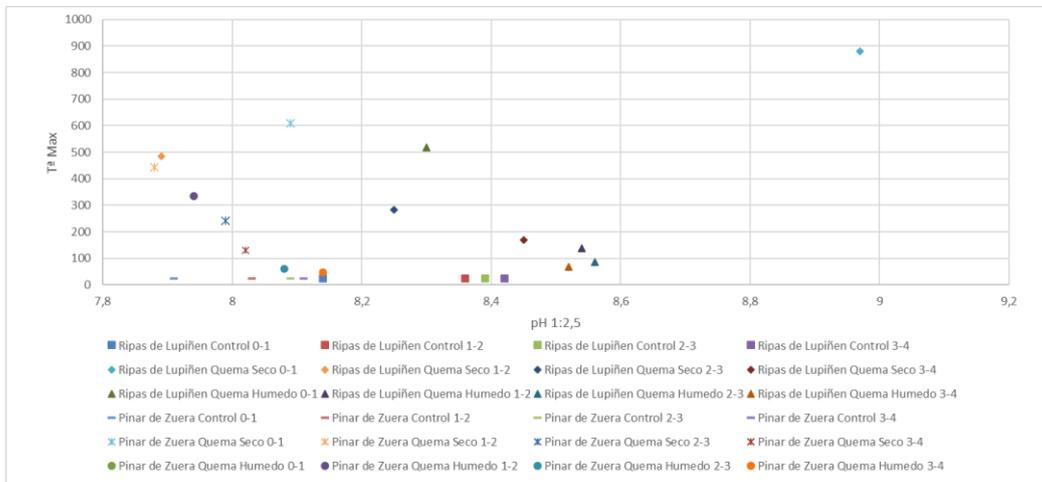


Gráfico 61: pH 1:2,5 frente a temperatura

4.1.15 pH al agua 1:5

Tabla 48: Datos de pH 1:5 :

Suelo	Tratamiento	Superficie	1cm	2cm	3cm
Regosol	Control	8,24	8,28	8,32	8,38
		8,25	8,40	8,41	8,37
		8,29	8,43	8,50	8,51

		8,82	7,96	8,28	8,39
	Dry Burn	8,57	8,05	8,32	8,34
		9,22	8,07	8,26	8,43
		8,32	8,39	8,43	8,39
	Wet Burn	8,31	8,79	8,78	8,62
		8,35	8,54	8,58	8,61
		7,99	8,09	8,13	8,09
	Control	8,17	8,14	8,23	8,20
		8,07	8,13	8,26	8,31
Phaeozem	Dry Burn	8,25	7,93	8,09	8,08
		8,23	7,97	7,97	8,04
		8,08	8,08	8,22	8,19
	Wet Burn	7,85	8,08	8,07	8,05
		8,02	8,23	8,20	8,29
		8,23	8,15	8,24	8,30

Tabla 49: Análisis de los datos del pH 1:5 :

Suelo	Tratamiento	Superficie	1cm	2cm	3cm	
Regosol	Control	Promedio	8,26	8,37	8,41	8,42
		Desvest	0,03	0,08	0,09	0,08
		CV (%)	0,32	0,93	1,07	0,95
		Error	0,02	0,04	0,05	0,05
	Dry Burn	Promedio	8,87	8,03	8,29	8,38
		Desvest	0,33	0,06	0,03	0,05
		CV (%)	3,70	0,72	0,37	0,54
		Error	0,19	0,03	0,02	0,03
	Wet Burn	Promedio	8,32	8,57	8,60	8,54
		Desvest	0,02	0,20	0,18	0,13
		CV (%)	0,24	2,38	2,04	1,49
		Error	0,01	0,12	0,10	0,07
Phaeozem	Control	Promedio	8,07	8,12	8,20	8,20
		Desvest	0,09	0,02	0,07	0,11
		CV (%)	1,09	0,30	0,84	1,31
		Error	0,05	0,01	0,04	0,06
	Dry Burn	Promedio	8,19	7,99	8,09	8,10
		Desvest	0,09	0,08	0,13	0,08
		CV (%)	1,11	1,01	1,55	0,96
		Error	0,05	0,05	0,07	0,04
	Wet Burn	Promedio	8,03	8,15	8,17	8,21
		Desvest	0,19	0,08	0,09	0,14
		CV (%)	2,34	0,92	1,10	1,76

Suelo	Tratamiento	Superficie	1cm	2cm	3cm
	Error	0,11	0,04	0,05	0,08

Tabla 50: Resumen de pH 1:5 :

pH 1:5		Superficie	1 cm	2 cm	3 cm
Regosol	Control	8,26 ± 0,03	8,37 ± 0,08	8,41 ± 0,09	8,42 ± 0,08
	Seco	8,87 ± 0,33	8,03 ± 0,06	8,29 ± 0,03	8,38 ± 0,05
	Húmedo	8,32 ± 0,02	8,57 ± 0,12	8,6 ± 0,1	8,54 ± 0,07
Phaeozem	Control	8,07 ± 0,09	8,12 ± 0,02	8,2 ± 0,07	8,2 ± 0,11
	Seco	8,19 ± 0,09	7,99 ± 0,08	8,09 ± 0,13	8,1 ± 0,08
	Húmedo	8,03 ± 0,19	8,15 ± 0,08	8,17 ± 0,09	8,21 ± 0,14

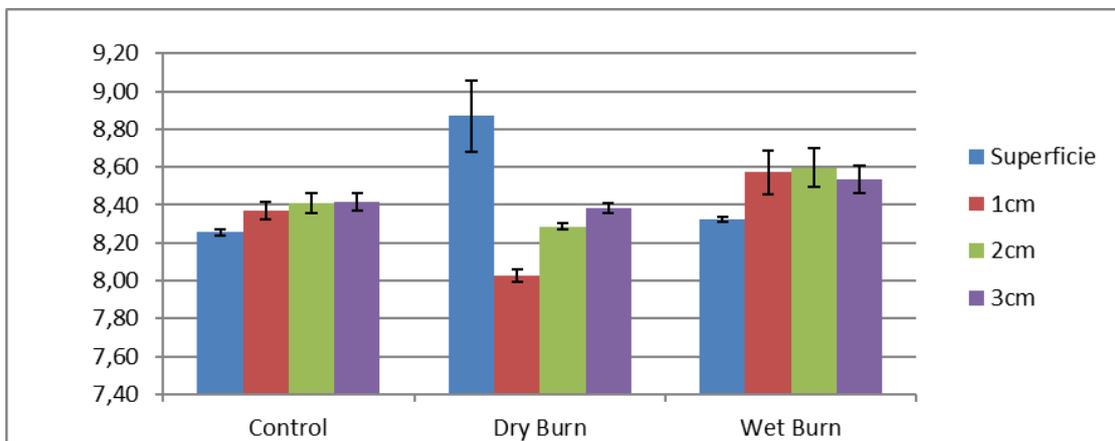


Gráfico 62: Gráfica de pH al agua 1:5 para suelo Regosol.

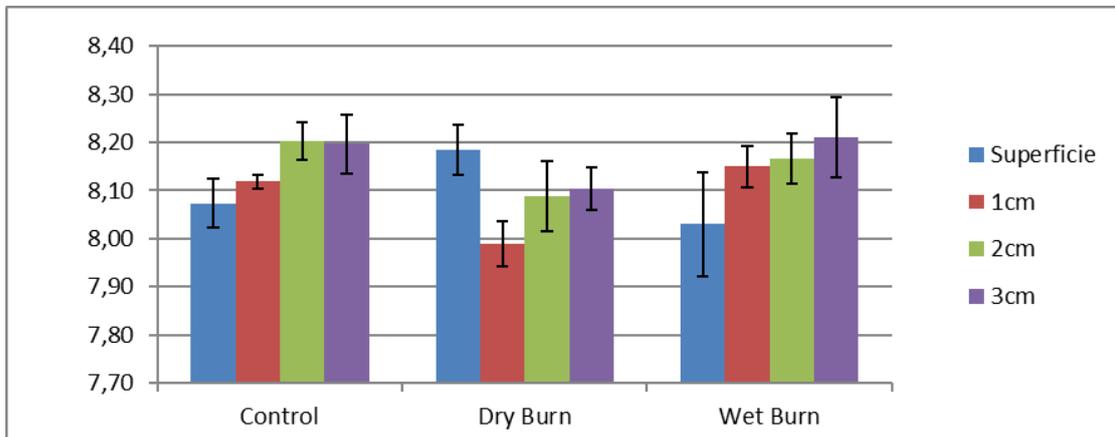


Gráfico 63: Gráfica de pH al agua 1:5 para suelo Phaeozem.

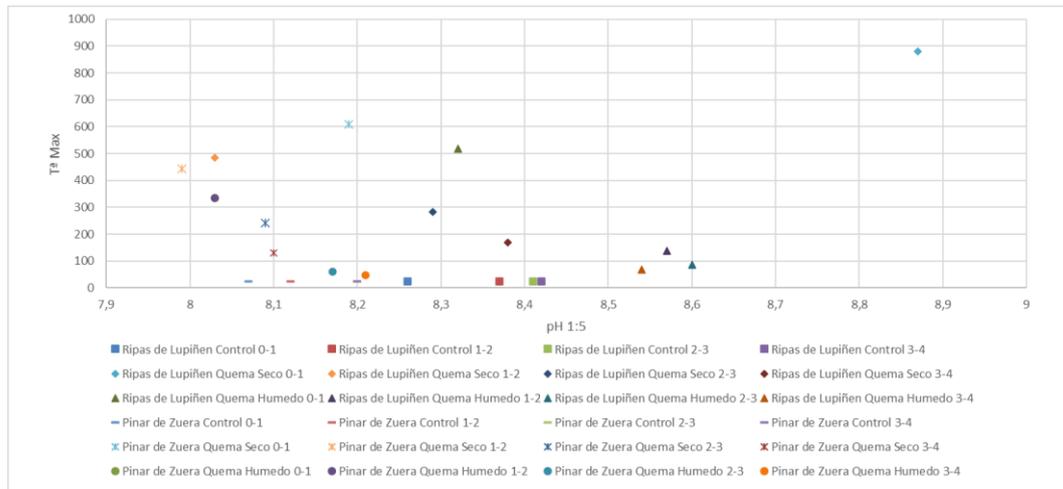


Gráfico 64: pH 1:5 frente a la temperatura.

Las dos pruebas de ph al agua muestran que el fuego es capaz de alterar las capas superficiales del suelo aumentando el ph de las muestras, mientras que las capas inferiores se mantienen practicamente intactas.

La disminución de ph en las tratamientos de quema en humedo pueden deberse más al propio tratamiento de humectación que al fuego.

4.1.16 Conductividad eléctrica

Tabla 51: Datos de CE:

Suelo	Tratamiento	Superficie	1cm	2cm	3cm
Regosol	Control	937,50	941,50	908,00	1002,00
		1197,00	1024,00	1041,50	1168,00
		1149,50	996,50	1005,50	1027,00
	Dry Burn	2495,00	2755,00	1374,50	1091,00
		2380,00	2315,00	1171,00	1041,00
		2460,00	2890,00	1844,50	1129,00
	Wet Burn	1852,00	1166,50	1145,50	1222,00
		2065,00	1022,50	993,00	1052,50
		2300,00	1012,50	1030,00	1053,50
Phaeozem	Control	265,50	228,50	212,95	241,50
		198,05	193,40	170,60	172,00
		194,05	180,50	164,60	149,90
	Dry Burn	1372,00	609,00	302,00	243,50
		1054,00	645,50	330,50	217,00
		754,00	258,00	177,85	168,90

Suelo	Tratamiento	Superficie	1cm	2cm	3cm
		401,00	200,15	190,30	185,05
	Wet Burn	535,50	262,50	205,00	184,35
		363,00	275,00	251,50	193,75

Tabla 52: Análisis de los datos de CE:

Suelo	Tratamiento		Superficie	1cm	2cm	3cm
Regosol	Control	Promedio	1.094,67	987,33	985,00	1065,67
		Desvest	138,17	42,01	69,07	89,50
		CV (%)	12,62	4,25	7,01	8,40
		Error	79,77	24,25	39,88	51,67
	Dry Burn	Promedio	2445,00	2653,33	1463,33	1087,00
		Desvest	58,95	300,68	345,43	44,14
		CV (%)	2,41	11,33	23,61	4,06
		Error	34,03	173,60	199,43	25,48
	Wet Burn	Promedio	2072,33	1067,17	1056,17	1109,33
		Desvest	224,09	86,17	79,55	97,57
		CV (%)	10,81	8,07	7,53	8,80
		Error	129,38	49,75	45,93	56,33
Phaeozem	Control	Promedio	219,20	200,80	182,72	187,80
		Desvest	40,15	24,84	26,35	47,80
		CV (%)	18,32	12,37	14,42	25,45
		Error	23,18	14,34	15,22	27,60
	Dry Burn	Promedio	1060,00	504,17	270,12	209,80
		Desvest	309,04	213,97	81,17	37,82
		CV (%)	29,16	42,44	30,05	18,03
		Error	178,43	123,53	46,86	21,83
	Wet Burn	Promedio	433,17	245,88	215,60	187,72
		Desvest	90,64	40,10	31,95	5,24
		CV (%)	20,92	16,31	14,82	2,79
		Error	52,33	23,15	18,44	3,02

Tabla 53: Resumen de los datos de CE:

CE		Superficie	1 cm	2 cm	3 cm
Regosol	Control	1094,67 ± 138,17	987,33 ± 42,01	985 ± 69,07	1065,67 ± 89,5
	Seco	2445 ± 58,95	2653,33 ± 300,68	1463,33 ± 345,43	1087 ± 44,14
	Húmedo	2072,33 ± 224,09	1067,17 ± 49,75	1056,17 ± 45,93	1109,33 ± 56,33
Phaeozem	Control	219,2 ± 40,15	200,8 ± 24,84	182,72 ± 26,35	187,8 ± 47,8
	Seco	1060 ± 309,04	504,17 ± 213,97	270,12 ± 81,17	209,8 ± 37,82
	Húmedo	433,17 ± 90,64	245,88 ± 40,1	215,6 ± 31,95	187,72 ± 5,24

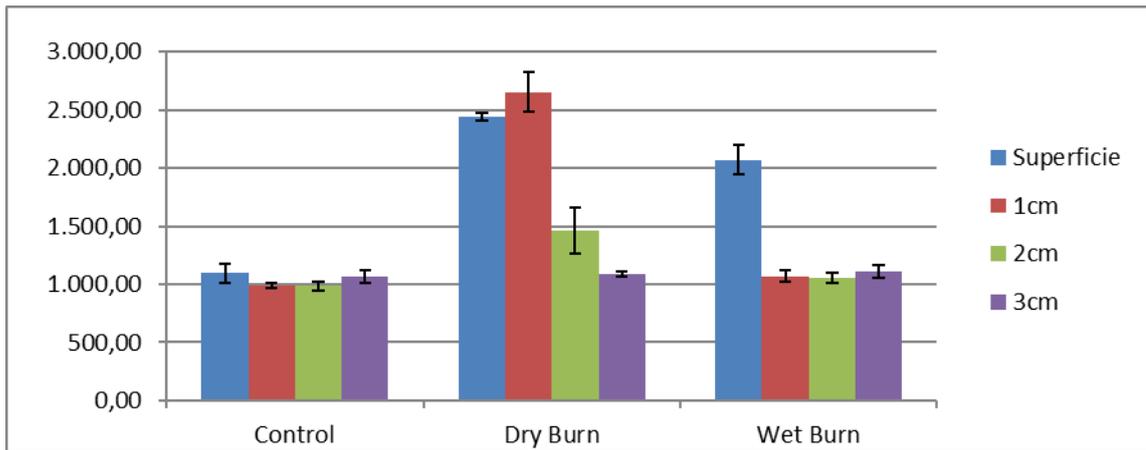


Gráfico 65: Grafica de CE para suelo Regosol.

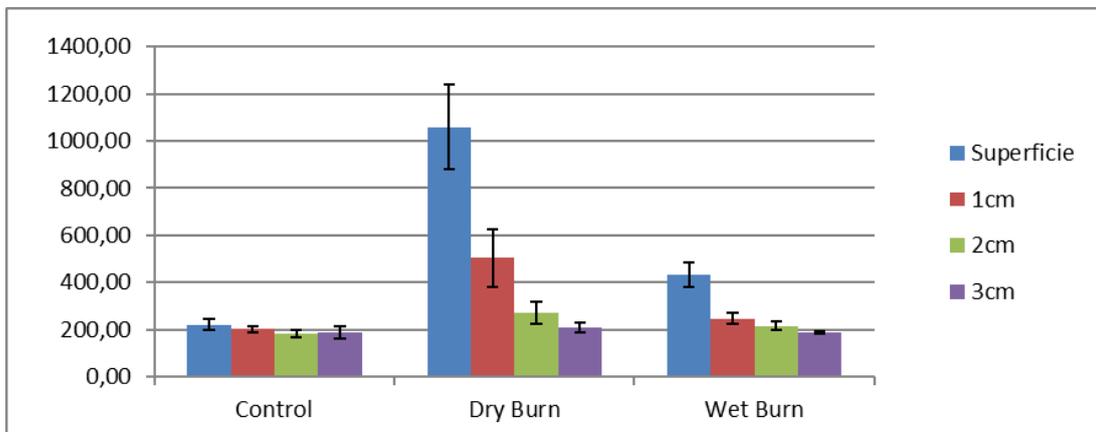


Gráfico 66: Grafica de CE para suelo Phaeozem.

Igual que con el pH, el fuego aumenta la conductividad eléctrica, medida de la concentración de iones en solución, de los primeros centímetros, pero el agua también influye sobre estos parámetros

La combustión de la materia orgánica tiene efectos adversos sobre las propiedades edáficas del suelo, aunque aumenta la cantidad de nutrientes utilizables, estos son arrastrados más fácilmente por las aguas de escorrentía. (García Romero, 2012)

Los incendios forestales provocan otros cambios físico-químicos en los suelos afectados. La acidez se reduce por el aporte de distintos cationes, fundamentalmente Ca, Mg, K, Si y P, algunos microelementos, óxidos y carbonatos contenidos en las cenizas. Cuando las cenizas se humedecen se produce la hidrólisis de los cationes básicos y de este modo aumenta el pH. La variación del pH depende de la intensidad del incendio, de manera que en incendios de baja intensidad la modificación del pH es mínima, mientras que en incendios de alta intensidad el pH puede llegar a aumentar hasta 4 o 5 unidades. Las cenizas minerales generadas por los incendios hacen que aumente la salinidad del suelo, como causa de la solubilización de iones que en un estado normal permanecen inmovilizados. (García Romero, 2012; Mataix Solera, 1999)

5 Conclusiones

El fuego afecta a las capas más superficiales de los suelos estudiados, pero le resulta complicado alterar las capas más profundas.

La presencia de agua en el suelo, previo al tratamiento térmico, reduce en gran medida la afección producida por el fuego en el suelo.

La capacidad de transmitir calor hacia el interior de un suelo es baja por naturaleza y en condiciones de humedad es aún más baja.

La densidad aparente de un suelo es un factor importante para resistir mejor el calor de los incendios. Cuanta más densidad, más compacto, peor es el comportamiento. Por esta razón el horizonte ócrico del Regosol, menos poroso, transmite mejor la temperatura que el mólico del Phaeozem, muy poroso.

La humedad del suelo influye sobre la hidrofobicidad tras la quema, menos afectada en suelos húmedos que secos, donde se ve más reducida. Sería interesante determinar si la reducción es consistente en el tiempo o no.

El carbono orgánico se reduce, por oxidación, algo común en cualquier incendio de alta severidad. Se trata de la mineralización rápida de la materia orgánica por acción del fuego.

El nitrógeno también se ve reducido en las capas superficiales. Si la quema se hace en condiciones de humedad la pérdida será menor en ambos parámetros.

El pH y la conductividad aumentan en la capa superficial, 0-1 cm, de forma evidente.

Un fuego siempre alterará las condiciones de un suelo, sea de forma directa o indirecta, de forma inmediata o a largo plazo. No se pueden eliminar las alteraciones, solo reducirlas y paliarlas.

6 Bibliografía

- Abu-Hamdeh, N.H., 2003. Thermal Properties of Soils as affected by Density and Water Content. *Biosyst. Eng.* 86, 97–102. [https://doi.org/10.1016/S1537-5110\(03\)00112-0](https://doi.org/10.1016/S1537-5110(03)00112-0)
- Abu-Hamdeh, N.H., Reeder, R.C., 2000. Soil Thermal Conductivity: Effects of Density, Moisture, Salt Concentration, and Organic Matter. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64, 1285–1290. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.6441285x>
- Altemir Codera, E., 2016. Efectos de las quemas prescritas en el estado del fósforo y en la actividad de la fosfomonoesterasa en suelos de Zuera y de Tella. Universidad de Zaragoza. Escuela Politecnica Superior de Huesca.
- Aznar, J.M., González-Pérez, J.A., Badía, D., Martí, C., 2016. At What Depth Are The Properties of a Gypseous Forest Topsoil Affected By Burning? *L. Degrad. Dev.* 27, 1344–1353. <https://doi.org/10.1002/ldr.2258>
- Badía, D., López-García, S., Martí, C., Ortíz-Perpiñá, O., Girona-García, A., Casanova-Gascón, J., 2017. Burn effects on soil properties associated to heat transfer under contrasting moisture content. *Sci. Total Environ.* 601–602, 1119–1128. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.254>
- Badía Villas, D., Cuchí, J.A., Ibarra, P., Longares, L.A., Macías, F., Martí, C., Peña, J.L., Pérez, C., Poch, R.M., Romero, D., Sancho, C., Saz, M.Á., Silva, J., 2009. Itinerarios edáficos por el Alto Aragón, Cuadernos Altoaragoneses de Trabajo.
- Badía Villas, D., González Pérez, J.A., Aznar, J.M., Arjona Gracia, B., Martí Dalmau, C., 2014. Changes in water repellency, aggregation and organic matter of a mollic horizon burned in laboratory: Soil depth affected by fire. *Geoderma* 213, 400–407. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.08.038>
- Busse, M.D., Hubbert, K.R., Moghaddas, E.E.Y., 2014. Fuel Reduction Practices and Their Effects on Soil Quality. Pacific Southwest Research Station.
- Cancelo González, J.J., Rial, M.E., Díaz-Fierros Viqueira, F., 2004. Estudio de la erosión y de la composición química de la escorrentía generada en suelos sometidos a quemas controladas y simulaciones de lluvia en laboratorio, in: *Fuegored 2010: Jornadas Internacionales: Investigación y gestión para la protección del suelo y restauración de los ecosistemas forestales afectados por incendios forestales*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, CSIC, pp. 127–130.
- Carballas Fernández, M.T., 2003. Los incendios forestales en Galicia, in: Casares Long, J.J. (Ed.), *Reflexiones Sobre El Medio Ambiente En Galicia*. Xunta de Galicia, Santiago de Compostela, España, pp. 363–415.
- Conesa Puente, M., 2012. Variaciones en profundidad de las propiedades de un suelo yesoso forestal bajo quema controlada. Universidad de Zaragoza.
- De Luis, M., Baeza, M.J., Raventós, J., 1997. Análisis de las curvas de temperatura-tiempo en fuegos experimentales en aulagares de distintas edades: enfoque alternativo. *Congr. For.* II, 143–148.
- DeBano, L.F., Neary, D.G., Ffolliott, P.F., 1998. *Fire's effects on ecosystems*. J. Wiley.
- Doerr, S.H., 1998. On standardizing the 'Water Drop Penetration Time' and the 'Molarity of an Ethanol Droplet' techniques to classify soil hydrophobicity: A case study using medium textured soils. *Earth Surf. Process. Landforms* 23, 663–668. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199807\)23:7<663::AID-ESP909>3.0.CO;2-6](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199807)23:7<663::AID-ESP909>3.0.CO;2-6)

- Doerr, S.H., Shakesby, R.A., Walsh, R.P.D., 1998. Spatial variability of soil hydrophobicity in fire-prone eucalyptus and pine forest, Portugal. *Soil Sci.* 163.
- Drysdale, D.D., 1995. Combustion fundamentals of fire. *Fire Saf. J.* 25, 171–173.
[https://doi.org/10.1016/0379-7112\(95\)90057-8](https://doi.org/10.1016/0379-7112(95)90057-8)
- G. Pausas, J., 2012. Incendios forestales, ¿Qué sabemos de? CSIC.
- García Romero, I., 2012. La química de un incendio forestal. *MoleQla Rev. Ciencias la Univ. Pablo Olavide* 115–117.
- González-Pérez, J.A., González-Vila, F.J., Almendros, G., Knicker, H., 2004. The effect of fire on soil organic matter--a review. *Environ. Int.* 30, 855–870.
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2004.02.003>
- Hepper, E., Urioste, A., Belmonte, V., Buschiazzo, D., 2008. Temperaturas de quema y propiedades físicas y químicas de suelos de la Región Semiárida Pampeana Central. *Cienc. del suelo* 26, 29–34.
- Hernando Lara, C., Guijarro Guzmán, M., Díez Galilea, C., Madrigal Olmo, J., San Martín, J., 2004. Laboratorios de incendios forestales, in: *Ciclo de Conferencias sobre selvicultura*. Huelva, p. 69.
- Iglesias López, M.T., 1993. Efectos de los incendios forestales sobre las propiedades del suelo en un pinar de repoblación (*pinus pinaster*), en Arenas de San Pedro (Avila). Universidad Complutense de Madrid, Servicio de Publicaciones, Madrid.
- Llinares Palacios, J.V., 2001. Efectos de la intensidad y evolución a corto plazo de las propiedades físicas, erosionabilidad, humedad y temperatura del suelo. *Universitat de València*.
- Llovet, J., Josa, R., Vallejo, V.R., 2008. Thermal shock and rain effects on soil surface characteristics: A laboratory approach. *CATENA* 74, 227–234.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.03.017>
- Llovet López, J., 2005. Degradación del suelo posterior al fuego en condiciones mediterráneas. Identificación de factores de riesgo. Universidad de Alicante.
- Madrigal, J., Guijarro, M., Hernando, C., 2014. El Túnel de Viento del INIA-CIFOR como dispositivo experimental para el estudio de los incendios forestales. *Cuad. la Soc. Española Ciencias For.* 203–214.
- Márquez Lapuente, M.Á., Badía Villas, D., Aguirre de Juana, J., 2010. Medición de la repelencia al agua en suelos: comparación de métodos y efecto de las altas temperaturas. *Proyectos fin de carrera (Universidad de Zaragoza. Escuela Politécnica Superior): ITA* 10-22. 2010.
- Martínez Sánchez, J.J., Heras Ibáñez, J. de las, Herranz Sanz, J.M., 1991. Impacto ecológico de los incendios forestales. *Al-Basit Rev. Estud. albacetenses* 105–117.
- Mataix-Solera, J., Guerrero, C., 2007. Efectos de los incendios forestales en las propiedades edáficas, in: Mataix-Solera, J. (Ed.), *Incendios Forestales, Suelos y Erosión Hídrica*. Caja Mediterráneo CEMACAM Font Roja-Alcoi © 2007, pp. 5–40.
- Mataix-Solera, J., Guerrero, C., Úbeda, X., Outeiro, L., Torres Martínez, P., Cerdà, A., Bodí, M.B., Arcenegui, V., Zornoza, R., Gómez, I., Mataix-Beneyto, J., 2007. *Incendios forestales, suelos y erosión hídrica*, 1ª. ed. Caja Mediterráneo CEMACAM Font Roja-Alcoi © 2007.
- Mataix Solera, J., 1999. Alteraciones físicas, químicas y biológicas en suelos afectados por incendios forestales. Contribución a su conservación y regeneración. Universidad de Alicante.

- Oficina Consultora Técnica, 2007. SI Seguridad en caso de incendio, in: CTE Documento Básico. p. 196.
- Regalado, C.M., García-Santos, G., Hernández Moreno, J.M., Pérez Buenafuente, A., Socorro, A.R., 2003. Caracterización de la zona no saturada de un bosque maduro de laurisilva en el parque nacional de Garajonay: Hidrofobicidad e implicaciones hidrológicas., in: Vol. 6: Estudios de La Zona No Saturada Del Suelo. pp. 193–200.
- Ruiz González, A.D., Vega Hidalgo, J.A., 2007. Modelos de predicción de la humedad de los combustibles muertos: fundamentos y aplicación.
- Tmethermometers, n.d. KP04 - K Type Thermocouple Small Diameter Needle Temperature Monitoring Probe 60mm x 1.5mm [WWW Document]. URL <http://www.tmethermometers.com/products/digital-probes/thermocouple-probes/needle-probes/k-thermocouple-probes/kp04-k-type-small-diameter-needle-probe-60mm-x-1-5mm.html> (accessed 8.22.15a).
- Tmethermometers, n.d. TMELOG1300 - 8 Channel Thermocouple Data Logger [WWW Document]. URL <http://www.tmethermometers.com/products/loggers/multi-input/tmelog1300-8-channel-thermocouple-data-logger.html> (accessed 8.22.15b).
- Úbeda, X., Outeiro, L., 2007. Efectos de los fuegos prescritos de Cataluña en las propiedades edáficas, in: Mataix-Solera, J. (Ed.), Incendios Forestales, Suelos y Erosión Hídrica. Caja Mediterráneo CEMACAM Font Roja-Alcoi © 2007, pp. 41–54.
- Valero Sancho, A.L., Martí i Dalmau, C., Casanova, J., Badía Villas, D., 2001. Medida del agua disponible para las plantas en suelos altoaragoneses. Comparación de métodos: placas Richards y caja de arena. Geórgica Rev. del Espac. Rural.
- Zárate López, L.G., 2004. Estudio de las características físicas y geométricas de la llama en los incendios forestales. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.

7 Anexos

7.1 Índice de Ilustraciones

Ilustración 1: Diferencia de comportamiento en función de la humedad de un suelo. (Busse et al., 2014).....	12
Ilustración 2: Distribucion de temperaturas en el frente de un incendio de matorral (Zárate López, 2004).....	17
Ilustración 3: Forma del muestreador. Fuente: elaboración propia. Programa: SketchUp Make.....	20
Ilustración 4: Medidas del muestreador, a) Vista superior, b) Vista lateral. Fuente: elaboración propia. Programa: SketchUp Make.....	20
Ilustración 5: Montaje del experimento. Extraído y modificado de Medición de la repelencia al agua en suelo (Márquez Lapuente) y tesis “Degradación del suelo posterior al fuego en condiciones mediterráneas. Identificación de factores de riesgo” de Joan Llovet López (Llovet López, 2005; Márquez Lapuente et al., 2010).....	21
Ilustración 6: Detalle de colocación de los termopares. Fuente: Elaboración Propia.....	22

7.2 Índice de Tablas

Tabla 1: Temperaturas del suelo en incendios forestales. Fuente: Mataix Solera (2007)(Mataix-Solera et al., 2007).....	12
Tabla 2: Temperaturas maximas (°C) y persistencia (min) del rango de temperaturas (media y desviacin estandar) usadas para describir el regimen termico en tres puntos de medición (O-Ah horizonte de superficie, Ah horizonte 1 cm y Ah horizonte 2 cm) de monolitos quemados(Aznar et al., 2016).....	12
Tabla 3: Examples of threshold temperatures for soil physical, chemical, and biological properties. Busse, M. D., Hubbert, K. R. & Moghaddas, E. E. Y. Fuel Reduction Practices and Their Effects on Soil Quality. (Busse et al., 2014).....	14
Tabla 4: Alteraciones en el suelo dependiendo de la temperatura alcanzada. Fuente Mataix el al. 2007(Mataix-Solera et al., 2007).....	14
Tabla 5: Datos brutos de temperaturas máximas.....	26
Tabla 6: Análisis de los datos de temperaturas máximas.....	27
Tabla 7: Resumen de los datos de temperaturas máximas.....	28
Tabla 8: Datos brutos de CI 100.....	29
Tabla 9: Análisis de los datos de CI 100.....	30
Tabla 10: Resumen de los datos CI 100.....	30
Tabla 11: Datos brutos de CI 200.....	31

Tabla 12: Análisis de los datos de CI 200.....	32
Tabla 13: Resumen de los datos CI 200.....	32
Tabla 14: Datos brutos de CI 300.....	33
Tabla 15: Análisis de los datos de CI 300.....	34
Tabla 16: Resumen de CI 300.....	35
Tabla 17: Datos brutos de densidad aparente.....	36
Tabla 18: Análisis de los datos de densidad aparente.....	37
Tabla 19: Resumen de densidad aparente.....	37
Tabla 20: Datos brutos de densidad corregida:	41
Tabla 21: Análisis de los datos de densidad corregida:	41
Tabla 22: Resumen de densidad corregida:	42
Tabla 23: Densidad aparente y corregida y la diferencia entre ambas.....	43
Tabla 24: Datos en bruto de hidrofobicidad (WDPT) se mide en segundos	44
Tabla 25: Análisis de datos de hidrofobicidad (WDPT):	45
Tabla 26: Resumen de hidrofobicidad (WDPT):.....	45
Tabla 27: Datos de hidrofobicidad (EPT):.....	47
Tabla 28: Análisis de datos de hidrofobicidad (EPT):	47
Tabla 29: Resumen de hidrofobicidad (EPT):.....	48
Tabla 30: Datos de Carbonatos.....	49
Tabla 31: Análisis de los carbonatos	50
Tabla 32: Resumen de Carbonatos.....	50
Tabla 33: Datos de carbono inorgánico:	51
Tabla 34: Análisis de los datos del carbono inorgánico:	52
Tabla 35: Resumen del carbono inorgánico:.....	53
Tabla 36: Datos de carbono oxidable:.....	54
Tabla 37: Análisis de los datos de C. ox.:	55
Tabla 38: Resumen de los datos de C. ox.:	56
Tabla 39: Datos de carbono total:.....	57
Tabla 40: Análisis de los datos de carbono total:	57
Tabla 41: Resumen de los datos de carbono total:	58
Tabla 42: Datos de nitrógeno total:.....	60
Tabla 43: Análisis de los datos de nitrógeno total:.....	60
Tabla 44: Resumen de nitrógeno total:	61

Tabla 45: Datos de pH 1:2.5 :	63
Tabla 46: Análisis de los datos de pH 1:2.5 :	64
Tabla 47: Resumen de pH 1:2.5 :	64
Tabla 48: Datos de pH 1:5 :	65
Tabla 49: Análisis de los datos del pH 1:5 :	66
Tabla 50: Resumen de pH 1:5 :	67
Tabla 51: Datos de CE:	68
Tabla 52: Análisis de los datos de CE:	69
Tabla 53: Resumen de los datos de CE:	69

7.3 Índice de Gráficos

Gráfico 1: a) Ejemplo de las temperaturas registradas en la parte aérea vs tiempo; b) Ejemplo de las T registradas en la parte subterránea vs tiempo. Fuente: De Luis, M.(De Luis et al., 1997).....	7
Gráfico 2: Registro de temperatura respecto al tiempo. Grupo 1.(Mataix Solera, 1999) .	7
Gráfico 3: Registro de temperatura respecto al tiempo. Grupo 2.(Mataix Solera, 1999) .	8
Gráfico 4: Registro de temperatura respecto al tiempo. Grupo 3. (Mataix Solera, 1999) 8	
Gráfico 5: Registro de temperatura respecto al tiempo. Grupo 4. (Mataix Solera, 1999) 8	
Gráfico 6: Temperaturas registradas en monolitos de suelos bajo quema controlada (valores medios y las desviaciones estándar) por Llovet et al. (2008)(Llovet et al., 2008) Fuente: María Conesa Puente(Conesa Puente, 2012).....	9
Gráfico 7: Las curvas de temperatura-tiempo obtenidas en suelos con distintas cargas de biomasa y densidades aparentes. Fuente: Tesis “Efectos de la intensidad y evolución a corto plazo de las propiedades físicas, erosionabilidad, humedad y temperatura del suelo” del autor: Josep Vicent Llinares Palacios (Llinares Palacios, 2001) Capitulo 3.....	9
Gráfico 8: Curvas de calentamiento de las muestras durante las quemas (lamparas infrarojas) controladas en laboratorio. (Cancelo González et al., 2004)	9
Gráfico 9: Curva de Tiempo-temperatura del laboratorio de incendios forestales para el estudio de afección del banco de semillas y al suelo por un incendio. Fuente: laboratorio de incendios forestales CIFOR-INIA (Hernando Lara et al., 2004; Madrigal et al., 2014).....	10
Gráfico 10: Registro de temperatura durante una quema, por Xavier Úbeda y Luis Outeiro (Mataix-Solera et al., 2007; Úbeda and Outeiro, 2007).....	10
Gráfico 11: Comportamiento de algunos incendios. Fuente Presentación de la Oficina Consultora Técnica.(Oficina Consultora Técnica, 2007)	17

Gráfico 12: Comparativa entre quema en seco y quema en húmedo de dos muestras de un mismo suelo. Se muestran las líneas de temperaturas para ambos suelos en 4 puntos de profundidad: superficie, 1cm, 2, cm y 3cm. Elaboración propia	23
Gráfico 13: Esquema de tiempo del ensayo de quemas de las muestras. Fuente: elaboración propia.	24
Gráfico 14: Índice de quemado a 100º para una de las muestras. Fuente: elaboración propia.....	25
Gráfico 15: Índice de quemado a 200º para una de las muestras. Fuente: elaboración propia.....	25
Gráfico 16: Temperatura máxima por profundidad para Phaeozem y Regosol.	28
Gráfico 17: Temperaturas máximas. Regosol	28
Gráfico 18: Temperaturas máximas. Phaeozem	28
Gráfico 19: Grafica de CI100 para suelo Regosol.....	31
Gráfico 20: Grafica de CI100 para suelo Phaeozem.....	31
Gráfico 21: Grafica de CI200 para suelo Regosol.....	33
Gráfico 22: Grafica de CI200 para suelo Phaeozem.....	33
Gráfico 23: Grafica de CI300 para suelo Regosol.....	35
Gráfico 24: Grafica de CI300 para suelo Phaeozem.....	35
Gráfico 25: Todos los valores de CI dispuestos en una misma gráfica.	36
Gráfico 26: Grafica de densidad aparente para suelo Regosol.....	38
Gráfico 27: Grafica de densidad aparente para suelo Phaeozem.....	38
Gráfico 28: Variación de la Da en profundidad para Regosol y Phaeozem.....	38
Gráfico 29: Relación entre temperatura máxima y densidad aparente.	39
Gráfico 30: CI100 frente a Densidad aparente.	39
Gráfico 31: CI200 frente a Densidad aparente	40
Gráfico 32: CI300 frente a Densidad aparente.	40
Gráfico 33: Grafica de densidad corregida para suelo Regosol.	42
Gráfico 34: Grafica de densidad corregida para suelo Phaeozem.	42
Gráfico 35: Correspondencia entre Densidad aparente y corregida.....	44
Gráfico 36: Grafica de hidrofobicidad (wdpt) para suelo Regosol.	46
Gráfico 37: Grafica de hidrofobicidad (wdpt)para suelo Phaeozem.	46
Gráfico 38: Hidrofobicidad por wdpt frente a temperatura máxima.....	46
Gráfico 39:Grafica de barras con errores de hidrofobicidad por etanol para suelo Phaeozem.....	48
Gráfico 40: Grafica de hidrofobicidad por etanol para suelo Phaeozem por profundidad.	48

Gráfico 41: Hidrofobicidad por etanol frente a temperatura máxima.....	49
Gráfico 42: Carbonatos en Regosol.	51
Gráfico 43: Carbonatos en Phaeozem.....	51
Gráfico 44: Grafica de carbono inorgánico para suelo Regosol.....	53
Gráfico 45: Grafica de carbono inorgánico para suelo Phaeozem.....	53
Gráfico 46: Carbono mineral frente temperatura máxima.....	54
Gráfico 47: Carbono mineral frente a carbonatos.....	54
Gráfico 48: Grafica de carbono oxidable para suelo Regosol.	56
Gráfico 49: Grafica de carbono oxidable para suelo Phaeozem.	56
Gráfico 50: Materia orgánica frente a carbono mineral.....	57
Gráfico 51: Grafica de carbono total para suelo Regosol.....	58
Gráfico 52: Grafica de carbono total para suelo Phaeozem.	59
Gráfico 53: Carbono total frente a temperatura máxima.....	59
Gráfico 54: Grafica de nitrógeno total para suelo Regosol.	61
Gráfico 55: Grafica de nitrógeno total para suelo Phaeozem.	61
Gráfico 56: Nitrógeno total frente a Carbonato total.....	62
Gráfico 57: Relación Carbono/Nitrógeno.....	62
Gráfico 58: Nitrógeno total frente a Temperatura.....	63
Gráfico 59: Grafica de pH 1:2.5 para suelo Regosol.....	65
Gráfico 60: Grafica de pH al agua 1:2.5 para suelo Phaeozem.....	65
Gráfico 61: pH 1:2,5 frente a temperatura.....	65
Gráfico 62: Grafica de pH al agua 1:5 para suelo Regosol.....	67
Gráfico 63: Grafica de pH al agua 1:5 para suelo Phaeozem.....	67
Gráfico 64: pH 1:5 frente a la temperatura.....	68
Gráfico 65: Grafica de CE para suelo Regosol.	70
Gráfico 66: Grafica de CE para suelo Phaeozem.	70

7.4 Índice de Fotografías

Fotografía 1: Algunas muestras de Regosol.....	21
Fotografía 2: Algunas muestras de Phaeozem.....	21
Fotografía 3: Montaje para el tratamiento térmico de las muestras.....	22
Fotografía 4: Detalle del “Data Logger” y los termopares.....	22

