



UNIVERSITAT DE
BARCELONA

**EFFECTOS EN EL SUELO A CORTO PLAZO DE UNA QUEMA
PRESCRITA PARA LA GESTIÓN FORESTAL EN EL MACIZO DEL
MONTGRÍ (GIRONA).**

**Trabajo presentado para obtener el título de
Máster en Planificación Territorial y Gestión Ambiental**

Ing. Mayra Figueroa Velasco

**Director de TFM: Dr. Xavier Úbeda
Codirector de TFM: Dr. Antonio Peñalver**

**Universidad de Barcelona
Máster en Planificación Territorial y Gestión Ambiental
Facultad de Geografía e Historia
2023**

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	6
PALABRAS CLAVE	7
ABSTRACT	8
KEYWORDS	9
RESUM	10
PARAULES CLAU	11
1. INTRODUCCIÓN	12
2. JUSTIFICACIÓN	16
3. OBJETIVOS	17
3.1. OBJETIVO GENERAL	17
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
4. ÁREA DE ESTUDIO	18
4.1. HISTORIA DE LA PARCELA	18
4.2. VULNERABILIDAD AL FUEGO	19
4.3. DESCRIPCIÓN DE SUELO	20
4.4. RÉGIMEN DE HUMEDAD DEL SUELO	21
4.5. RÉGIMEN DE TEMPERATURA DEL SUELO	22
4.6. CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA DEL SUELO	22
4.7. CLIMATOLOGÍA	24
4.8. VEGETACIÓN	25
5. METODOLOGÍA	26
5.1. DISEÑO EXPERIMENTAL	26
5.2. MEDICIÓN DE PARÁMETROS FÍSICOS, QUÍMICOS Y BIOLÓGICOS	28
5.2.1. GRANULOMETRÍA	28
5.2.2. ESTABILIDAD DE AGREGADOS	29
5.2.3. HIDROFOBICIDAD	30
5.2.4. MEDICIÓN DE pH	31
5.2.5. CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA	31
5.2.6. CATIONES MAYORITARIOS (Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Na ⁺ y K ⁺)	32
5.2.7. CARBONO TOTAL Y NITRÓGENO TOTAL	32
5.2.8. TEMPERATURA Y HUMEDAD DEL SUELO:.....	32
5.2.9. RESPIRACIÓN DEL SUELO	33
5.3. INVENTARIO DE VEGETACIÓN	34
5.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	34

6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	36
6.1.	GRANULOMETRÍA Y TEXTURA	37
6.2.	ESTABILIDAD DE AGREGADOS	38
6.3.	HIDROFOBICIDAD	39
6.4.	pH	40
6.5.	CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA	41
6.6.	CATIONES MAYORITARIOS (Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Na ⁺ y K ⁺)	42
6.7.	CARBONO TOTAL	43
6.8.	NITRÓGENO TOTAL	45
6.9.	TEMPERATURA DEL SUELO	46
6.10.	HUMEDAD DEL SUELO	48
6.11.	RESPIRACIÓN DEL SUELO	49
6.12.	RELACIÓN RESPIRACION DEL SUELO Y CONDICIONES AMBIENTALES	50
6.13.	INVENTARIO DE VEGETACIÓN	52
7.	CONCLUSIONES	54
8.	AGRADECIMIENTOS	56
9.	BIBLIOGRAFIA	57

TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de tipos de riesgo de incendios de Cataluña.....	13
Figura 2. Mapa de ubicación de la parcela de estudio.....	18
Figura 3. Mapa de los primeros niveles fisiográficos utilizados en el Mapa de suelos de Cataluña.....	20
Figura 4. Mapa de suelos de la parcela de estudio.....	23
Figura 5. Climograma de Torroella de Montgrí.....	24
Figura 6. Vegetación de la parcela de estudio un año después de la quema prescrita.....	25
Figura 7. Diseño de las parcelas de la quema prescrita.....	26
Figura 8. Diseño de toma de muestras de las parcelas de estudio.....	27
Figura 9. Secado, tamizaje y almacenamiento de las muestras en laboratorio.....	28
Figura 10. Proceso en laboratorio para la medición de granulometría por el método de Bouyoucos (Gee & Bauder, 1986).....	29
Figura 11. Proceso para evaluación de estabilidad de agregados.....	30
Figura 12. Preparación de muestras para prueba de hidrofobicidad.....	30
Figura 13. Medición de pH en laboratorio.....	31
Figura 14. Medición de Conductividad Eléctrica en laboratorio.....	31
Figura 15. Extracción de disolución de suelo para medición de cationes mayoritarios.....	32
Figura 16. Medición de temperatura y humedad con sensor TMS, TOMST®.....	33
Figura 17. Medición del flujo de CO2 con LI-8100A.....	33
Figura 18. Procedimiento para realización de inventario vegetal.....	34
Figura 19. Tabla resumen de los parámetros físicos y químicos.....	36
Figura 20. Tabla resumen de los parámetros físicos y biológicos.....	37

Figura 21. Comparación evolución anual de la granulometría.....	38
Figura 22. Comparación de la evolución anual de los valores de estabilidad de agregados por el método simulador de lluvia Ten Drop Impact (TDI) Low, (1954).....	39
Figura 23. Comparación de la evolución anual de los valores de hidrofobicidad por el método de tiempo de penetración de gota de agua (WDPT) (Wessel, 1988).....	40
Figura 24. Comparación de la evolución anual de los valores de pH.	41
Figura 25. Comparación de la evolución anual de los valores de conductividad eléctrica (CE).	42
Figura 26. Comparación de la evolución anual de los valores de los cationes Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+	43
Figura 27. Comparación de la evolución anual del contenido de Carbono total.	44
Figura 28. Comparación de la evolución anual del contenido de Nitrógeno total.....	45
Figura 29. Comparación de la temperatura del suelo a distintos niveles en 6 tiempos diferentes.	47
Figura 30. Comparación de la humedad del suelo en 6 tiempos diferentes.....	48
Figura 31. Comparación de la respiración del suelo en 6 tiempos diferentes.	50
Figura 32. Relación de temperatura, humedad y respiración del suelo de la parcela sometida a quema prescrita.....	51
Figura 33. Comparación de la vegetación presente en las parcelas dos meses después de la quema prescrita (2022) y un año después (2023).....	53

RESUMEN

Los incendios forestales son una de las principales causas de perturbación en los bosques mediterráneos. La quema prescrita es una herramienta que se utiliza para reducir la cantidad de combustible disponible en los bosques y disminuir el riesgo de incendios forestales de alta intensidad. En el macizo de Montgrí se realizan estas acciones desde el año 2006 por el equipo de bomberos GRAF (Grupo de Apoyo a Actuaciones Forestales) de la Generalitat de Catalunya para evitar la continuidad vertical del fuego desde el estrato arbustivo hacia la copa de los árboles, en este caso del Pino Blanco (*Pinus halepensis* Mill.), principal especie que se encuentra en el macizo. El objetivo de este estudio es evaluar el efecto inmediato en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo tras el uso de quemas prescritas como técnica de gestión forestal y su evolución anual. Tras una quema prescrita el 1 de marzo de 2022, se establecieron cinco parcelas en el área quemada (PF) y cinco parcelas en una zona adyacente sin quemar a manera de control (C). De cada una de estas 10 parcelas se tomaron muestras de suelo, repitiéndose el muestreo en marzo de 2023, justo un año después. Tras la quema, el pH fue ligeramente más elevada en PF que en C, manteniéndose esta tendencia en el 2023 ($\sim 7,7$ y $\sim 7,3$, respectivamente). En cuanto a la conductividad eléctrica en 2022 se observaron valores mayores en PF que en C, pero que disminuyeron en 2023 hasta alcanzar valores similares a C ($\sim 200 \mu\text{S cm}^{-1}$). Sin embargo, el contenido de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Ni^{+} y K^{+} inicialmente fue similar en ambos tratamientos, aunque en 2023 se observaron valores inferiores en PF ($\sim 5350 \text{ mg kg}^{-1}$, $\sim 290 \text{ mg kg}^{-1}$, $\sim 89 \text{ mg kg}^{-1}$, $\sim 349 \text{ mg kg}^{-1}$; correspondientemente) que en C ($\sim 6754 \text{ mg kg}^{-1}$, $\sim 410 \text{ mg kg}^{-1}$, $\sim 131 \text{ mg kg}^{-1}$, $\sim 500 \text{ mg kg}^{-1}$; respectivamente) caída que fue atribuida a la lixiviación y el consumo que demandan las plantas que rebrotan después de la quema. En cuanto a los contenidos de Carbono y Nitrógeno totales, estos dos elementos tuvieron un comportamiento muy similar, donde los valores reportados un año después de la quema prescrita disminuyeron considerablemente, pero en la parcela control se mantuvieron exactamente igual. La hidrofobicidad no se vio afectada tras la quema prescrita ya que un año posterior a esta el suelo mantuvo con sus condiciones hidrofílicas. La respiración, la temperatura y la humedad del suelo, datos que fueron tomados seis veces durante el año, presentaron comportamientos similares en PF como en C, sin embargo, si se observó diferencia en las diferentes fechas de muestreo donde los resultados parecen estar condicionados por la estacionalidad. La respiración del suelo que da indicios de la actividad de los organismos en éste, fue más alta en los momentos del año en que tanto la temperatura como la humedad del suelo tienen valores intermedios.

Todos estos resultados parecen indicar que el uso de quemas prescritas no tiene un efecto perjudicial en las propiedades del suelo a corto plazo, sin embargo, para evaluar su efecto a largo plazo será necesario continuar con su monitorización anual.

PALABRAS CLAVE

Incendios forestales, bomberos GRAF, propiedades edáficas, *Pinus halepensis*

ABSTRACT

Forest fires are one of the main causes of disturbance in Mediterranean forests. Prescribed burning is a tool used to reduce the amount of fuel available in forests and reduce the risk of high-intensity wildfires. In the Montgrí massif, these actions have been carried out since 2006 by the GRAF fire team (Support Group for Forest Actions) of the Generalitat de Catalunya to prevent the vertical continuity of the fire from the shrub layer to the treetops. In this case of the White Pine (*Pinus halepensis* Mill.), the main species found in the massif. The objective of this study is to evaluate the immediate effect on the physical, chemical and biological properties of the soil after the use of prescribed burning as a forest management technique and its annual evolution. Following a prescribed burn on March 1, 2022, five plots were established in the burned area (PF) and five plots in an adjacent unburned area were established as controls (C). Soil samples were taken from each of these 10 plots, and the sampling was repeated in March 2023, just one year later. After burning, the pH was slightly higher in PF than in C, this trend maintaining in 2023 (~7.7 and ~7.3, respectively). Regarding electrical conductivity, in 2022, higher values were observed in PF than in C, but they decreased in 2023 until reaching values similar to C (~200 μ S cm⁻¹). However, the content of Ca²⁺, Mg²⁺, Ni⁺ y K⁺ was initially similar in both treatments, although in 2023 lower values were observed in PF (~5350 mg kg⁻¹, ~290 mg kg⁻¹, ~89 mg kg⁻¹, ~349 mg kg⁻¹; correspondingly) than in C (~6754 mg kg⁻¹, ~410 mg kg⁻¹, ~131 mg kg⁻¹, ~500 mg kg⁻¹; respectively) drop that was attributed to the leaching and consumption demanded by plants that resprout after burning. Regarding the total Carbon and Nitrogen contents, these two elements had a very similar behavior, where the values reported one year after the prescribed fire decreased considerably, but in the control plot they remained exactly the same. The hydrophobicity was not affected after the prescribed fire since one year after this the soil maintained its hydrophilic conditions. Respiration, temperature and soil humidity, data that were taken six times during the year, presented similar behaviors in PF as in C, however, a difference was observed in the different sampling dates where the results seem to be conditioned by seasonality. Soil respiration, which gives indications of the activity of organisms in it, was highest at times of the year when both soil temperature and humidity have intermediate values.

All these results seem to indicate that the use of prescribed fire does not have a detrimental effect on soil properties in the short term; however, to evaluate its long-term effect it will be necessary to continue annual monitoring.

KEYWORDS

Forest fires, prescribed fire, GRAF firefighters, forest management.

RESUM

Els incendis forestals són una de les principals causes de pertorbació als boscos mediterranis. La crema prescrita és una eina que es fa servir per reduir la quantitat de combustible disponible als boscos i disminuir el risc d'incendis forestals d'alta intensitat. Al massís de Montgrí es realitzen aquestes accions des de l'any 2006 per l'equip de bombers GRAF (Grup de Recolzament a Actuacions Forestals) de la Generalitat de Catalunya per evitar la continuïtat vertical del foc des de l'estrat arbustiu cap a la capçada dels arbres, en aquest cas del pi blanc (*Pinus halepensis* Mill.), principal espècie que es troba al massís. L'objectiu d'aquest estudi és avaluar l'efecte immediat en les propietats físiques, químiques i biològiques del sòl després de fer servir cremes prescrites com a tècnica de gestió forestal i la seva evolució anual. Després d'una crema prescrita l'1 de març del 2022, es van establir cinc parcel·les a l'àrea cremada (PF) i cinc parcel·les en una zona adjacent sense cremar a manera de control (C). De cadascuna d'aquestes 10 parcel·les es van prendre mostres de sòl, repetint-se el mostreig al març del 2023, just un any després. Després de la crema, el pH va ser lleugerament més elevat en PF que en C, mantenint-se aquesta tendència el 2023 (~7,7 i ~7,3, respectivament). Pel que fa a la conductivitat elèctrica el 2022 es van observar valors més grans en PF que en C, però que van disminuir el 2023 fins a assolir valors similars a C (~200 μ S cm⁻¹). Tot i això, el contingut de Ca²⁺, Mg²⁺, Ni⁺ y K⁺ inicialment va ser similar en ambdós tractaments, encara que el 2023 es van observar valors inferiors en PF (~5350 mg kg⁻¹, ~290 mg kg⁻¹, ~89 mg kg⁻¹, ~349 mg kg⁻¹; corresponentment) que en C (~6754 mg kg⁻¹, ~410 mg kg⁻¹, ~131 mg kg⁻¹, ~500 mg kg⁻¹; respectivament) caiguda que va ser atribuïda a la lixiviació i el consum que demanen les plantes que rebroten després de la crema. Pel que fa als continguts de Carboni i Nitrogen totals, aquests dos elements van tenir un comportament molt similar, on els valors reportats un any després de la crema prescrita van disminuir considerablement, però a la parcel·la control es van mantenir exactament igual. La hidrofobicitat no es va veure afectada després de la crema prescrita ja que un any posterior a aquesta el sòl va mantenir les seves condicions hidrofíliques. La respiració, la temperatura i la humitat del sòl, dades que van ser preses sis vegades durant l'any, van presentar comportaments similars a PF com a C, però, si es va observar diferència en les diferents dates de mostreig on els resultats semblen estar condicionats per l'estacionalitat. La respiració del sòl, que dona indicis de l'activitat dels organismes en aquest, va ser més alta en els moments de l'any en què tant la temperatura com la humitat del sòl tenen valors intermedis.

Tots aquests resultats semblen indicar que l'ús de cremes prescrites no té un efecte perjudicial en les propietats del sòl a curt termini, però per avaluar-ne l'efecte a llarg termini caldrà continuar amb la seva monitorització anual.

PARAULES CLAU

Incendis forestals, cremes prescrites, bombers GRAF, gestió forestal.

1. INTRODUCCIÓN

Teniendo en cuenta que en España los incendios forestales son parte de la dinámica y configuración del paisaje natural, y que estos son un factor importante en su evolución, los incendios llegan a ser un problema considerable en áreas mediterráneas debido a sus condiciones climatológicas de veranos muy cálidos y fuertes sequías, esto acompañado de fenómenos de cambio global, donde los campos cada vez están más despoblados, los usos tradicionales de las tierras han sido olvidados, los paisajes cada vez son más homogéneos y la acumulación de biomasa que se transforma en material combustible en los bosques es mayor, lo que incide en que la presencia de incendios forestales tienda a aumentar cada día, haciendo al territorio cada vez más vulnerable (Eugenio et al., 2006) además, se observa un fenómeno de cambio de régimen de los grandes incendios forestales en los últimos años, en donde el número de hectáreas quemadas ha aumentado fuera de los meses de verano (Úbeda Xavier et al., 2021).

Además, la configuración y estructura del paisaje mediterráneo dan lugar a incendios de alta severidad que se propagan rápidamente y que son difíciles de extinguir, especialmente si alcanzan las copas de los árboles (Alcañiz et al., 2016).

La incidencia, la intensidad y la severidad de estos incendios han promovido los estudios de los impactos que pueden llegar a tener estos en las propiedades de los suelos, que varían dependiendo de factores como: las condiciones ambientales, la vegetación, el suelo y la humedad de este (Certini, 2005).

Por lo tanto, es importante identificar herramientas que puedan utilizarse en diferentes escalas para reducir la propagación del fuego y minimizar su incidencia y efectos (Alcañiz et al., 2016). A escala del paisaje, la gestión forestal se preocupa por la vulnerabilidad de los bosques con relación al fuego y se basa en la consideración del tipo y los regímenes de incendios en un área determinada, lo que ha llevado a que las entidades gubernamentales empiecen a identificar y analizar estos factores que pueden afectar a cada territorio (Piqué et al., 2011).

En el caso de Cataluña el riesgo de incendios forestales se clasifica entre alto y muy alto, como lo muestra la Figura 1 (Piqué et al., 2011).

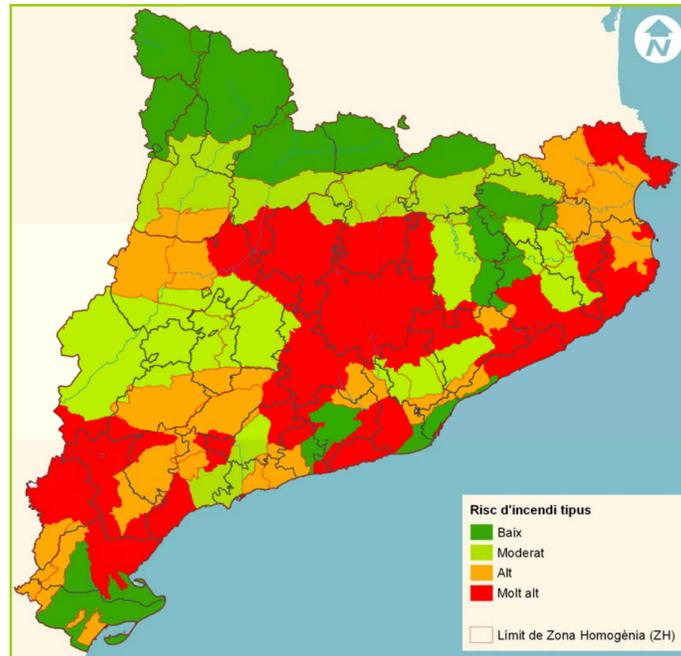


Figura 1. Mapa de tipos de riesgo de incendios de Cataluña.

Fuente: (Piqué et al., 2011, p. 48).

En respuesta a este aumento de la vulnerabilidad y el riesgo de incendios que afectan a la población como al medio ambiente, los sistemas de extinción han ido mejorando a lo largo del tiempo, sin embargo, es importante trabajar desde la prevención de los incendios forestales donde la gestión y planificación forestal juega un papel muy importante (Piqué et al., 2011). Dicho lo anterior, es esencial conocer el tipo de bosque en un área particular, su composición de especies y sus características en relación con su estructura y estado de desarrollo, ya que estos factores pueden predecir la propagación y vigor del fuego (González et al., 2007; Piqué et al., 2011).

Existen varias estrategias de prevención de grandes incendios, una de ellas consiste en la creación de paisajes en mosaicos de diferentes especies vegetales, que puede mitigar la evolución del fuego, tanto a largo plazo como en momentos puntuales de extinción permitiendo encontrar buenos posicionamientos donde atacar el frente del fuego, además de reducir la homogenización y densidad vegetal (Úbeda, 2021).

(Fernandes & Rigolot, 2007; Vélez Muñoz, 2000)(Fernandes & Rigolot, 2007; Vélez Muñoz, 2000)Otra estrategia de prevención consiste en reducir la carga combustible de los bosques ya sea con desbroce mecánico o pastoreo (Piqué et al., 2011). La silvicultura preventiva como herramienta de gestión forestal, consiste en la reducción de la vegetación superficial y eliminación del combustible vertical través de la poda, de esta manera minimiza la transmisión de calor. Lo anterior se acompaña de estrategias de replantación de especies

específicas que generan estructuras forestales con baja vulnerabilidad al fuego (Fernandes & Rigolot, 2007; Vélez Muñoz, 2000).

Las quemadas prescritas es una estrategia implementada en Europa para controlar los regímenes de incendios a través de la incineración de la biomasa de los bosques. Desde 1999, se estableció dentro del departamento de bomberos de Cataluña, el Grupo de Apoyo a Actuaciones Forestales – GRAF, grupo especializado en combatir los incendios mediante el desarrollo de actividades innovadoras de prevención como lo son las quemadas prescritas, que deben llevarse a cabo de manera cuidadosa e integral ya que se deben considerar factores como la topografía, la meteorología, la hidrografía y la biodiversidad del área (Alcañiz et al., 2016; Piqué et al., 2011). Normalmente, las quemadas prescritas son de baja intensidad y, si se manejan adecuadamente, no causan ningún daño a los árboles, especialmente en los ecosistemas mediterráneos donde los árboles son resistentes al fuego (Certini, 2005).

(Úbeda & Francos, 2018)(Afif Khouri & Oliveira Prendes, 2006)(Úbeda & Francos, 2018)(Afif Khouri & Oliveira Prendes, 2006)También se ha demostrado que las quemadas prescritas son convenientes para regenerar algunas especies vegetales, mejorar hábitats para mamíferos, facilitar el pastoreo animal de matorrales y promover usos recreativos de las tierras (Afif Khouri & Oliveira Prendes, 2006). De hecho, debe subrayarse que algunos ecosistemas son dependientes del fuego, incluso requieren de éste para garantizar su desarrollo, es el caso de algunas especies mediterráneas como el alcornoque o la encina que invaden el suelo con semillas que germinan en situación de postincendio, lo que nos hace llegar a pensar que el bosque ha precisado del fuego para reproducirse y autoregenerarse (Úbeda & Francos, 2018), es por esta razón que, al mismo tiempo el fuego se puede utilizar como herramienta para la gestión del paisaje (Costa Alcubierre et al., 2011). Sin embargo, las quemadas prescritas, pueden tener diferentes respuestas en los suelos, los recursos hídricos, la biodiversidad y el almacenamiento de carbono; de hecho, muchos de los impactos pueden ser positivos, incluida la fertilización del suelo, la preservación y restauración de matorrales, la mejora de la calidad del hábitat para diferentes especies y la reducción de las emisiones de carbono en comparación con los incendios forestales (Fernandes et al., 2013). Sin embargo, estas acciones a menudo son controvertidas, generando muchas dudas en su implementación como estrategia de gestión forestal en algunas zonas.

A pesar de que las quemadas prescritas en las propiedades del suelo han sido ampliamente estudiadas por varios autores, aún existen vacíos en las respuestas que estas puedan tener en los ambientes mediterráneos a corto y largo plazo, por ello, es de gran importancia seguir generando investigación. En consecuencia, este trabajo de master plantea evaluar los

efectos a corto plazo de las quemas prescritas como herramienta de gestión forestal tomando como punto de evaluación parcelas ubicadas en el macizo de Montgrí en las que se evaluaron parámetros físicos, químicos y biológicos como: estabilidad de agregados, densidad aparente, hidrofobicidad, pH, salinidad del suelo conductividad eléctrica, cationes mayoritarios (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+), Carbono total y Nitrógeno total, temperatura, humedad y respiración del suelo con el fin de aportar respuestas respecto de las ventajas y las desventajas del fuego prescrito para que la planificación integrada de la gestión forestal pueda encontrar el equilibrio adecuado en términos de la sostenibilidad de los bosques (Outeiro et al., 2008).

2. JUSTIFICACIÓN

En ambientes mediterráneos y ecosistemas propensos a incendios descontrolados, las quemadas prescritas son una herramienta importante de gestión forestal para frenar la propagación de futuros incendios. Estas quemadas se llevan a cabo de manera intencional bajo condiciones ambientales y climáticas controladas para lograr su objetivo específico que es, la reducción de la biomasa combustible en los bosques y la creación de mosaicos de parches quemados y no quemados. Además de esto, se conocen muchos más beneficios de las quemadas prescritas en los ambientes mediterráneos como son la regeneración de algunas especies vegetales que han sufrido adaptaciones de propagación después de los incendios puesto que, sus semillas requieren del calor del fuego para germinar. Al mismo tiempo, las quemadas ayudan a regular la expansión de especies invasoras reduciendo así la competencia por recursos y brindando la oportunidad de recuperación de las especies nativas.

El suelo es un elemento importante en los ecosistemas al permitir el crecimiento de árboles, albergar biodiversidad, contribuir a la mitigación del cambio climático mediante el secuestro de carbono y consumir el metano y demás gases de efecto invernadero, aunque aún hay vacíos de conocimiento en los impactos que pueden tener las quemadas prescritas en las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos forestales. Dado lo anterior, el presente trabajo de máster se centrará en el estudio de estas propiedades, con el fin de hacer seguimiento y generar conocimiento en cuanto al impacto que tienen sobre estos suelos las quemadas prescritas como sistema de gestión forestal para mantener los servicios ecosistémicos y mitigar el cambio climático. Estudio que forma parte de proyecto Holisoils, el cual está enmarcado en el programa de investigación e innovación Horizonte 2020 de la Unión Europea, y que espera dar herramientas para la toma de decisiones que den cumplimiento a los objetivos climáticos y de sostenibilidad pronunciados en los ODS de la Agenda 2030 de la ONU, el Acuerdo de París de la Convención Climática, la Estrategia de Bioeconomía de la UE, el Reglamento UTCUTS de la UE, la Estrategia Forestal de la UE (2018) y el Pacto Verde Europeo (Natural Resources Institute Finland, 2023).

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

- Evaluar el efecto a corto plazo de la implementación de quemas prescritas como técnica de gestión forestal en el Macizo de Montgrí a través de parámetros físicos, químicos y biológicos del suelo.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Examinar cambios en los parámetros físicos, químicos y biológicos de los suelos de las parcelas sometidas a la quema prescrita con las parcelas de control.
- Comparar los resultados obtenidos de las evaluaciones físicas, químicas y biológicas de las parcelas de experimentación un año después de la quema prescrita (2023) con los datos un día después de la misma (2022).
- Inventariar la vegetación tras la quema prescrita y al año del tratamiento y comparar entre la parcela control y la parcela de quema.

4. ÁREA DE ESTUDIO

La parcela de estudio se encuentra ubicada en la coordenada geográfica 42°4'59.840"N, 3°9'55.738"W, en el Parque Natural de Montgrí, municipio de Torroella de Montgrí al noreste de la comarca del Baix Empordà, provincia de Girona, en la comunidad autónoma de Cataluña de España (Figura 2), a una altitud de 135 msnm con una temperatura media anual de 15,5 °C y una precipitación en promedio por año de 500 mm. Esta locación debido a su formación geológica se caracteriza por tener rocas tipo calcáreas y con suelos Xerorthent litic y Haploxeralf litic ruptic-inceptic según el Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (2022b), suelos que antiguamente fueron explotados con fines agrícolas, pero que posteriormente fueron abandonados y reforestados con *Pinus halepensis* M.



Figura 2. Mapa de ubicación de la parcela de estudio.

Fuente: Elaboración propia a partir de imagen de Google Maps (2023).

4.1. HISTORIA DE LA PARCELA

Entre los años 60's y 70's del siglo XX esta área presentó una actividad ganadera intensa donde los suelos estaban cubiertos de pastos, sin embargo, para los años 80's se implementaron varios modelos de gestión del uso del territorio donde la actividad ganadera pasó a ser extensiva y se comenzaron acciones de reforestación con especies de *Pinus halepensis* M. y *Pinus pinea* L. en las zonas afectadas por incendios (Nebot Hernández, 2018).

Tras la década de 1980, la inversión en repoblación forestal experimentó una disminución notable, y la actividad ganadera, que solía controlar la proliferación del matorral, fue abandonada. Como consecuencia, la biomasa vegetal aumentó de manera considerable, acumulando un volumen significativo de material altamente combustible. Esta acumulación de biomasa se convirtió en un factor desencadenante del incendio ocurrido en junio de 2001, que llegó a consumir un área extensa de 378 hectáreas, agravado por la presencia del viento de tramontana (Nebot Hernández, 2018).

En respuesta a esta crisis, se reactivó la inversión en la repoblación forestal con el objetivo de restablecer la salud de los bosques. Se llevaron a cabo actividades de aclareo, desbroce y poda en niveles bajos para gestionar de manera sostenible el entorno. A partir del año 2005, se implementaron prácticas de quemas prescritas en el matorral bajo la cubierta arbórea, con la finalidad de reducir la carga de material inflamable. Estas acciones fueron llevadas a cabo por equipos entrenados de bomberos forestales (Nebot Hernández, 2018).

4.2. VULNERABILIDAD AL FUEGO

De acuerdo con los informes de Nebot Hernández, (2018) y de Piqué et al., (2011), la parcela se encuentra en una zona con una vulnerabilidad media. Esto se debe a que su vegetación mayoritaria consiste en una población joven de *Pinus halepensis* M., cuya clasificación de vulnerabilidad al fuego en las copas se considera moderada. Esta situación se origina por la disposición de esta especie, que generalmente presenta una distancia reducida entre el suelo y la base de la copa comparada con otras coníferas. Además, esta especie a menudo se encuentra en una fase temprana de desarrollo debido a su alta susceptibilidad al fuego.

Esta propensión al fuego ha resultado en una abundancia de brotes nuevos en el sotobosque de la parcela lo cual favorece su crecimiento también debido a la arquitectura de la copa de este tipo de pino que permite que la luz pase a través de ella, contribuyendo así a la acumulación de material combustible. Estos factores en conjunto actúan para facilitar la propagación vertical del fuego, que se refiere a la presencia y disposición de combustible vegetal en diferentes niveles verticales de la vegetación, desde el suelo hasta la parte superior de los árboles (Gonçalves Vaz, 2013).

4.3. DESCRIPCION DE SUELO

Considerando la ubicación de la parcela de investigación y al superponerla con el mapa de suelos de Cataluña de escala de 1:250,000 del Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña (2022b, 2022c), esta se encuentra ubicada en la Unidad Cartográfica **SMSLa** o subunidad fisiográfica El Montgrí, que se enseña en la Figura 3 que se describe a continuación:

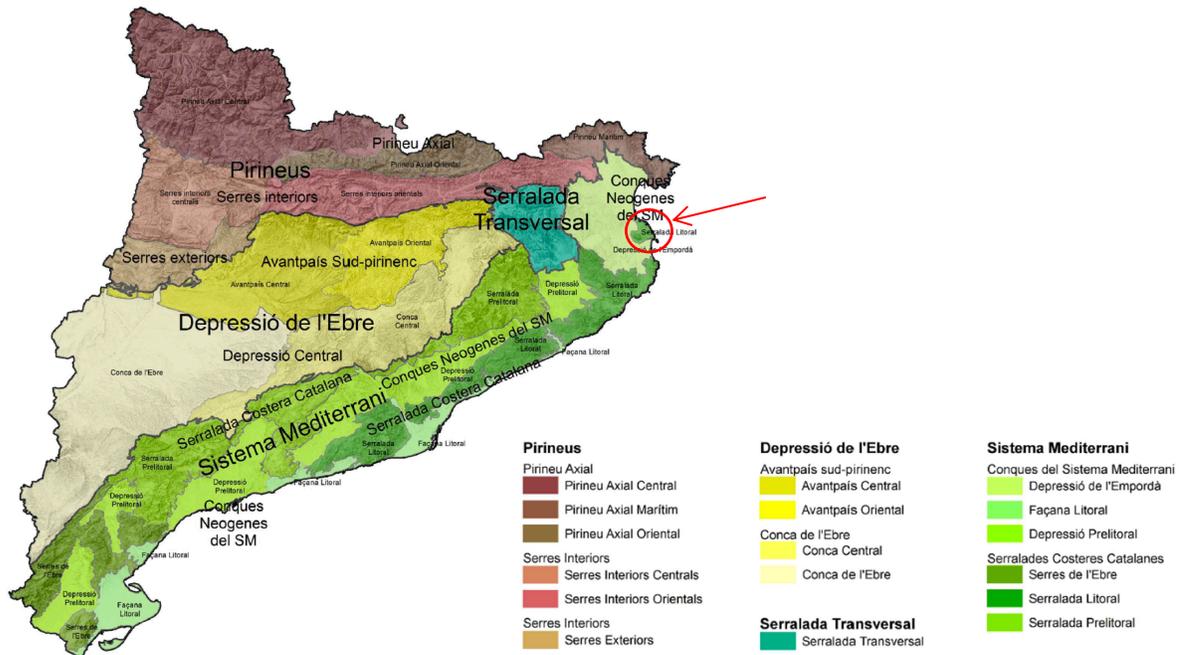


Figura 3. Mapa de los primeros niveles fisiográficos utilizados en el Mapa de suelos de Cataluña.

Fuente: (Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya, 2022b, p. 38).

Unidad fisiográfica mayor: Sistema Mediterráneo

Se trata de una unidad fisiográfica compleja, formada por el conjunto de sierras y depresiones costeras desde el Macizo del Montgrí hasta las sierras del Ebro.

Subunidad fisiográfica mayor: Cordillera Costera Catalana

Todo el sistema montañoso costero catalán, limitado por la Depresión Central, con fosas neógenas que las parten transversalmente dividiéndolas en cordilleras Litoral y Prelitoral.

Unidad fisiográfica: Cordillera Litoral

Sistema montañoso desde el Macizo del Montgrí hasta el Macizo del Garraf limitado en su parte superior por fosas neógenas y el inferior por la línea del mar.

4.4. REGIMEN DE HUMEDAD DEL SUELO

El régimen de humedad de un suelo corresponde a la frecuencia y duración de la presencia de agua del suelo a lo largo del tiempo en diferentes momentos, que se determina en su sección control por la presencia o ausencia de agua retenida a una tensión menor de 1500 kPa (Soil Survey Staff, 2014).

Dada la ubicación de la parcela y las condiciones mediterráneas, ésta se clasifica en un régimen de humedad de suelo Xerico. Estas zonas se caracterizan porque los suelos, en condiciones naturales, no pueden proporcionar toda el agua que las plantas necesitan para su óptimo desarrollo, especialmente durante el período de máximo crecimiento de estas. En este régimen de humedad no percolante, los productos más solubles raramente son lavados y transportados lejos la sección control de humedad. Por otra parte, la temperatura media anual de los suelos, en estas zonas, a una profundidad de 50 cm, es superior a 8 °C y, en muchos casos, superior a 15°C (regímenes de temperatura méxico y térmico, respectivamente). Otros factores formadores importantes en la determinación de las características y distribución de los suelos que se han cartografiado en estas zonas son las propiedades de los materiales originales y la posición geomorfológica en la que se han desarrollado (Soil Survey Staff, 2014).

Los principales procesos formadores identificados han sido: la acumulación de materia orgánica en algunas áreas que presentan un uso más bien forestales, la translocación en disolución de carbonatos que ocasiona la calcificación de algunos horizontes subsuperficiales (horizontes cálcicos) y que llega, en posiciones más estables, en la cimentación de estos horizontes (horizontes petrocálcicos), la translocación en disolución de yeso que ocasiona la gipsificación de algunos horizontes subsuperficiales (horizontes gípsicos) y una cierta gleificación que puede producir diferentes hidromorfias en los fondos de valle y terrazas a madrigueras de procesos redox (subgrupos oxiácuicos). Además, también se han reconocido algunos procesos de translocación en suspensión de arcilla que acaba depositándose finamente en poros y caras de los agregados formando horizontes argílicos (Soil Survey Staff, 2014).

Además, el poco lavado que tiene lugar en estos suelos hace que la mayor parte de los productos solubles de la meteorización de materiales originales permanezcan en el sistema. Esto hace que, en zonas que presentan un drenaje deficiente, los suelos puedan desarrollar, de forma natural, una cierta salinidad y, en función de las características de los materiales originales y de la composición de estas sales, incluso una cierta sodicidad. Estos procesos pueden también ser inducidos y, en muchos casos, amplificados por algunas actividades antrópicas, principalmente el riego (Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya, 2022c; Soil Survey Staff, 2014).

4.5. REGIMEN DE TEMPERATURA DEL SUELO

El régimen de temperatura del suelo hace referencia a las características y patrones de temperatura que se presentan en el suelo a lo largo del tiempo en una determinada ubicación geográfica y esta influenciada por el clima, la latitud, la altitud, la exposición solar, la composición del suelo y su cobertura vegetal. La temperatura del suelo es una variable importante que influye en los procesos biológicos, químicos y físicos del suelo y en los ecosistemas en general (Soil Survey Staff, 2014).

De acuerdo con la localización del parque Montgrí y su régimen de humedad del suelo, estos presentan dos tipos de régimen de temperaturas del suelo que son méxico y térmico. El régimen de temperatura méxico se caracteriza por presentar una temperatura media anual del suelo igual o mayor de 8 °C, pero menor de 15 °C, con una diferencia de temperatura media del suelo en verano y en invierno de 6 °C o más, ya sea a 50 cm de profundidad debajo de la superficie del suelo o a un contacto dénsico, lítico o paralítico (Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya, 2022c; Soil Survey Staff, 2014).

Por otro lado, el régimen de temperatura térmico del suelo es dado por una temperatura media anual del suelo igual o mayor de 15 °C pero menor de 22 °C con una diferencia entre la temperatura media del suelo en verano e invierno de 6 °C o más, ya sea a 50 cm de profundidad debajo de la superficie del suelo o a un contacto dénsico, lítico o paralítico, lo que esté más superficial (Soil Survey Staff, 2014).

4.6. CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA DEL SUELO

De acuerdo al mapa de suelos de Cataluña a escala 1:250.000 del Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña (2022c), la parcela de estudio se encuentra ubicada en la unidad

cartográfica de suelos S48K (Figura 4) que, según el sistema de clasificación taxonómica de suelos de Soil Survey Staff, (2014), corresponde a suelos Xerorthent lític y Haploxeralf lític rúptic-inceptic que se caracterizan por desarrollarse a partir de calizas, generalmente afectadas por procesos de carstificación. Superficiales o muy superficial, bien drenados, con texturas finas y un contenido variable de elementos grandes. Pueden mostrar rellenos de algunos poros y canales de raíces, así como de otros rasgos morfológicos relacionados con procesos de iluviación de arcilla, aunque de forma discontinua, debido a la compleja meteorización de la roca subyacente.

De acuerdo con su capacidad agrológica, este suelo se encuentra en una clase 5, que se caracteriza por ser suelos con poco riesgo de erosión, pero que presentan otras limitaciones edáficas o fisiográficas difíciles de arreglar (profundidad enraizable, salinidad, sodicidad, encharcamientos, afloramientos rocosos) que hacen impracticable el cultivo y limita su uso a prados, usos forestales o reserva natural (Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya, 2022a).

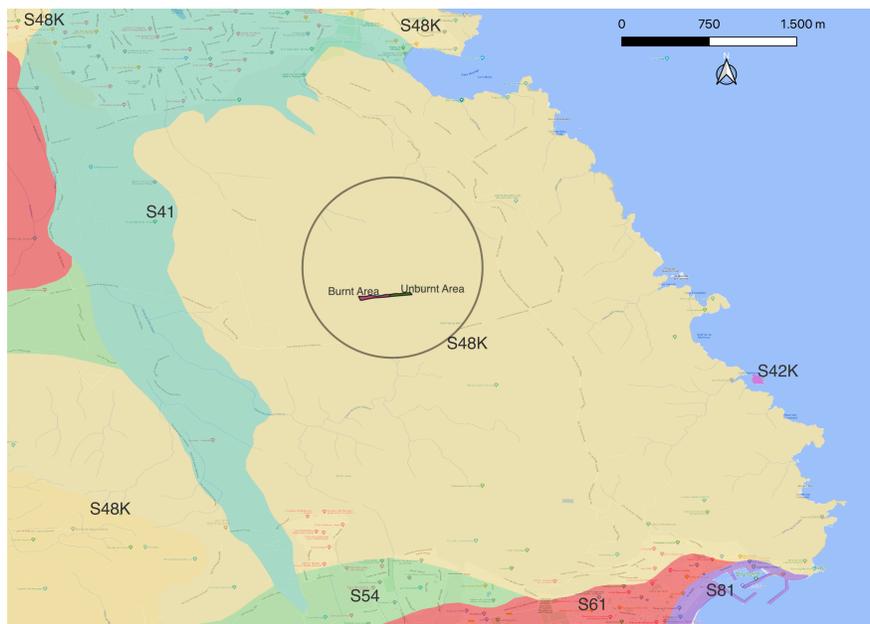


Figura 4. Mapa de suelos de la parcela de estudio.

Fuente: Elaboración propia a partir del mapa de suelos de Cataluña (Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya, 2022c).

4.7. CLIMATOLOGÍA

Torroella de Montgrí al estar situado en el hemisferio norte, la época de verano se presenta en los meses de junio, julio, agosto, septiembre y el invierno abarca desde diciembre hasta el mes de marzo.

Köppen & Geiger (1936) El clima en Torroella de Montgrí, de acuerdo con la clasificación Köppen & Geiger (1936), se codifica Csa, que corresponde al clima templado y mediterráneo, con meses de invierno más lluviosos que los de verano, donde agosto es el mes más seco y cálido alcanzando temperaturas de 37°C y precipitaciones menores a 14mm tal como lo muestra la Figura 5, aquí, la línea roja continua indica la temperatura máxima media diaria en grados centígrados y la línea roja punteada, el valor máximo de temperatura media del día más caliente. De la misma forma se interpretan las líneas de temperaturas mínimas; la línea azul continua indica la temperatura mínima media diaria registrada en grados centígrados y la línea azul punteada, el valor mínimo medio de la noche más fría, para lo cual se registran los datos más bajos en el mes de enero con una temperatura mínima diaria media de 5° C (Meteoblue, 2023).

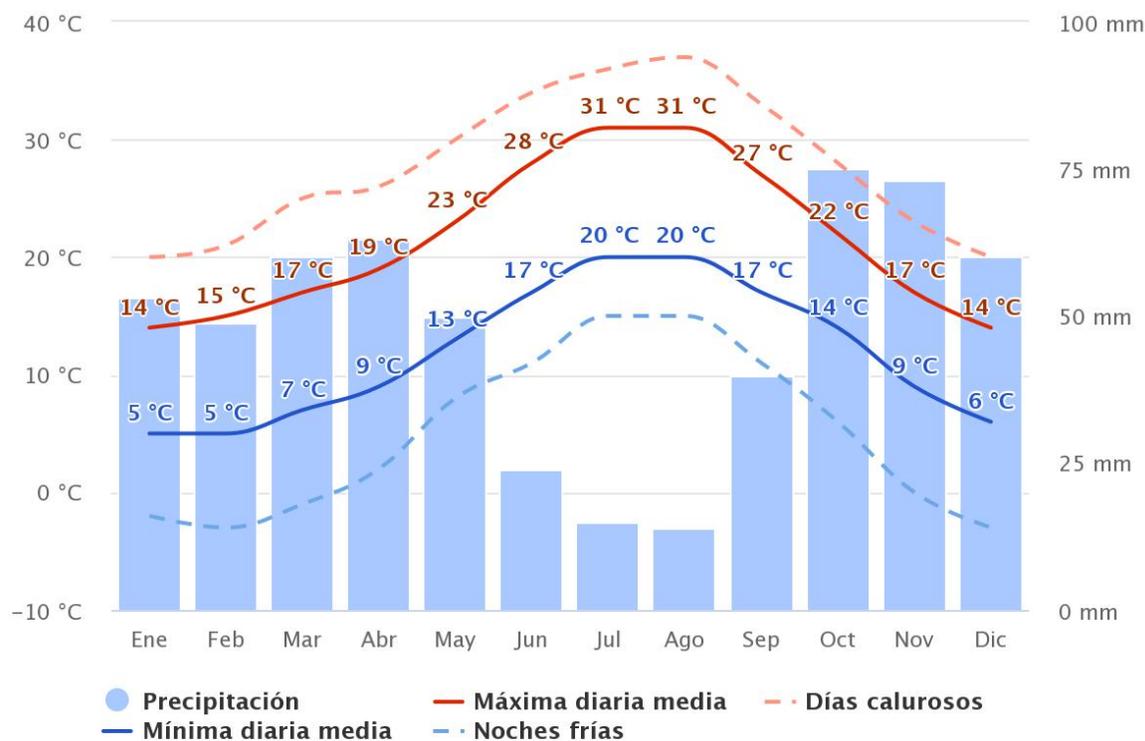


Figura 5. Climograma de Torroella de Montgrí.

Fuente: (Meteoblue, 2023)

Dado lo anterior se concluye que la temperatura promedio de este municipio corresponde a 15,5 °C y su precipitación promedio anual es de 571 mm particularizándose por tener precipitaciones medias mensuales menores a 30 mm, característico de un clima seco.

4.8. VEGETACION

(Generalitat de Catalunya, 2023; Papers del Montgrí, 1986; Polo Alberti & Masip Salvi, 1987)(Generalitat de Catalunya, 2023; Papers del Montgrí, 1986; Polo Alberti & Masip Salvi, 1987)La vegetación presente en el macizo de Montgrí se caracteriza por tener formaciones arbóreas dispersas con algunas especies de encina (*Quercus ilex* y *Quercus suber*), pero con mayor frecuencia se hallan especies de *Olea europaea* var. *silvestris*, *Pistacia lentiscus*, *Quercus coccifera* y principalmente pinares naturales y repoblados de *Pinus halepensis*, *Pinus pinea* y *Cupressus sempervirens* (Generalitat de Catalunya, 2023; Papers del Montgrí, 1986; Polo Alberti & Masip Salvi, 1987).

En el sector de la parcela, predominan arboles jóvenes de *Pinus halepensis* M. Figura 6, perteneciente a la familia de las pináceas de origen mediterráneo. Este pino puede llegar a alcanzar una altura de 20 metros y una edad estimada de 120 años siendo el menos robusto de la península Ibérica. Se caracteriza por soportar la sequía, su madera es resinosa, dura y de calidad media usada para para pequeñas piezas de carpintería y para maderas de conglomerado (Área Metropolitana de Barcelona, 2023). Bajo el dosel arbóreo se encuentra poblaciones de herbáceas y arbustos mediterráneos como son *Brachypodium retusum* Pers., *Cistus monspeliensis* L., *Cistus salviifolius* L., *Asparagus acutifolius* L. y *Rubia peregrina* L.



Figura 6. Vegetación de la parcela de estudio un año después de la quema prescrita.
Fuente: Imágenes propias (2023).

5. METODOLOGÍA

5.1. DISEÑO EXPERIMENTAL

La quema prescrita fue realizada a finales de invierno, el 1 de marzo del 2022 por el grupo GRAF de Bomberos de la Generalitat de Cataluña semejando zonas de contrafuegos seguras, para lo que procedieron a quemar el sustrato arbustivo de 1 m de altura, dispuestos de manera homogénea y medianamente densa, que era evidentemente considerada una fuente de combustión. La ventana de prescripción para llevar a cabo la quema controlada cumplió con las siguientes características:

Temperatura: entre 5 y 20 °C

Humedad relativa: entre 30 y 70 %

Velocidad del viento: entre 5 y 25 km/h.

El diseño de las parcelas fue realizado por GRAF de bomberos de la Generalitat de Cataluña de acuerdo con su Plan de Quema Prescrita de Gestión de Combustible redacta por Nebot Hernández (2018). De este diseño inicial de parcelas se seleccionó la P12 de acuerdo con la identificación dada por el GRAF como se muestra a continuación en la Figura 7.

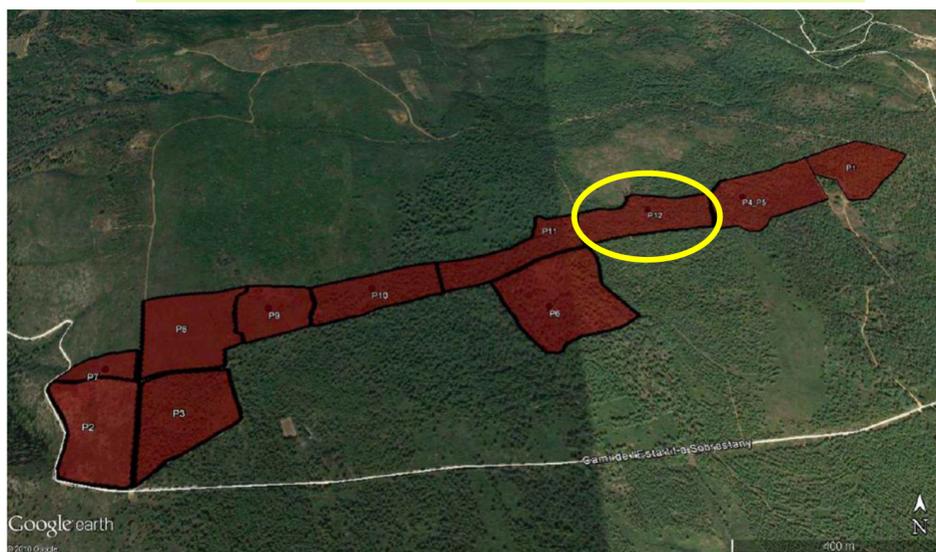


Figura 7. Diseño de las parcelas de la quema prescrita.

Fuente: (Nebot Hernández, 2018, p. 17)

La parcela P12 se dividió en dos, llevándose a cabo en la parte Oeste la quema prescrita, mientras que la parte Este se tomó como parcela control y no se realizó ninguna intervención con fuego.

Cada una de estas dos áreas fue subdividida en 5 subparcelas (n=5) de igual tamaño (10x10 m) y de cada subparcela, se recolectaron muestras de suelos en cinco lugares diferentes que se dispusieron en cruz, cuatro de estos lugares estaban separados a 2 metros de un lugar central que dirigía a un punto cardinal diferente (N, E, S, W).

Estas muestras fueron tomadas a 5 cm de profundidad y se mezclaron para crear una muestra compuesta representativa que se nombraron PF1, PF2, PF3, PF4 y PF5 a las pertenecientes a la quema prescrita y C1, C2, C3, C4 y C5 a las subparcelas control tal como se observa en la Figura 8. Los muestreos se realizaron un día después de la quema prescrita (1 de marzo 2023) y se repitió al año siguiente (9 de marzo 2023).

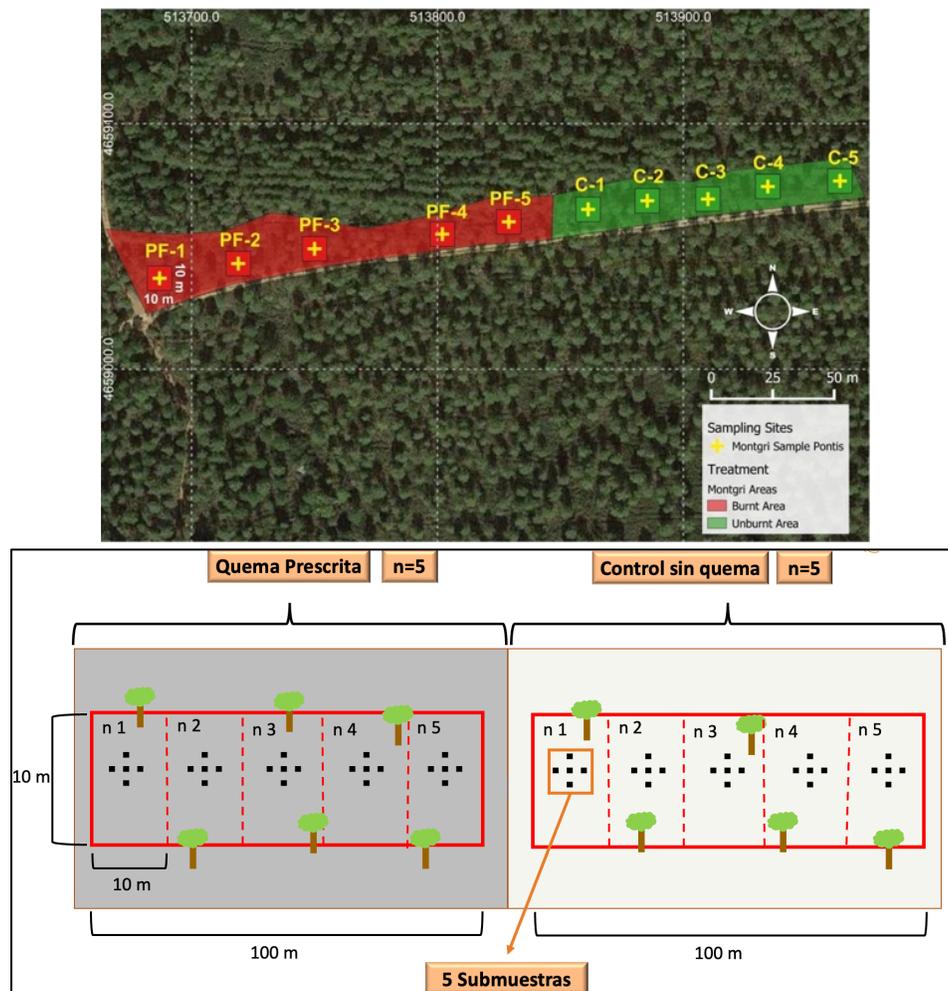


Figura 8. Diseño de toma de muestras de las parcelas de estudio.

Fuente: Elaboración propia grupo GRAM (2022).

5.2. MEDICIÓN DE PARÁMETROS FÍSICOS, QUÍMICOS Y BIOLÓGICOS

Las muestras colectadas en campo en los dos momentos diferentes (1 de marzo 2023 y 9 de marzo 2023) fueron analizadas siguiendo exactamente los mismos protocolos y metodologías para evaluar sus parámetros físicos, químicos y biológicos como se describen a continuación.

Estas fueron llevadas al laboratorio de Geografía Física de la Facultad de Geografía e Historia de la Universidad de Barcelona, donde se dejaron secar por un par de días a temperatura ambiente, posteriormente fueron tamizadas con tamiz de 2mm y se registró el porcentaje (%) de partículas mayores de 2 mm (Figura 9). Por último, fueron almacenadas en bolsas de plástico a temperatura ambiente ($\pm 23^{\circ}\text{C}$). Una alícuota de las muestras fue molida y almacenada en tubos de plástico a temperatura ambiente.



Figura 9. Secado, tamizaje y almacenamiento de las muestras en laboratorio.

Fuente: Imágenes propias (2023).

Luego, las muestras molidas se sometieron a una serie de métodos destinados a analizar los siguientes parámetros:

5.2.1. GRANULOMETRÍA

Esta se determinó a través del método del densímetro de Bouyoucos (Gee & Bauder, 1986) donde a partir de la muestra seca y tamizada se pesaron 50 g a la que se le agregó 200 ml de agua destilada y 20 ml de dispersante en este caso hexametáfosfato sódico y se procedió a mezclar mediante agitador durante 30 minutos. Posteriormente, ésta fue colocada en una probeta de 1.000 ml y llevado su volumen con agua destilada hasta un litro. La mezcla fue homogenizada con una varilla y se dejó reposar durante 5 minutos que corresponde al tiempo en que tardan las arenas en precipitarse para introducir suavemente el hidrómetro o densímetro en la probeta donde se esperó a que se estabilizara para tomar a la lectura.

Esta misma solución se dejó sin remover 2 horas más, tiempo que tardan en precipitar los limos y nuevamente se introdujo el hidrómetro dentro de la probeta para realizar la lectura. Efectuada cada lectura también se realizó la medición de temperatura de la solución con el termómetro con el fin de poder hacer corrección de datos dependiendo el caso Figura 10.

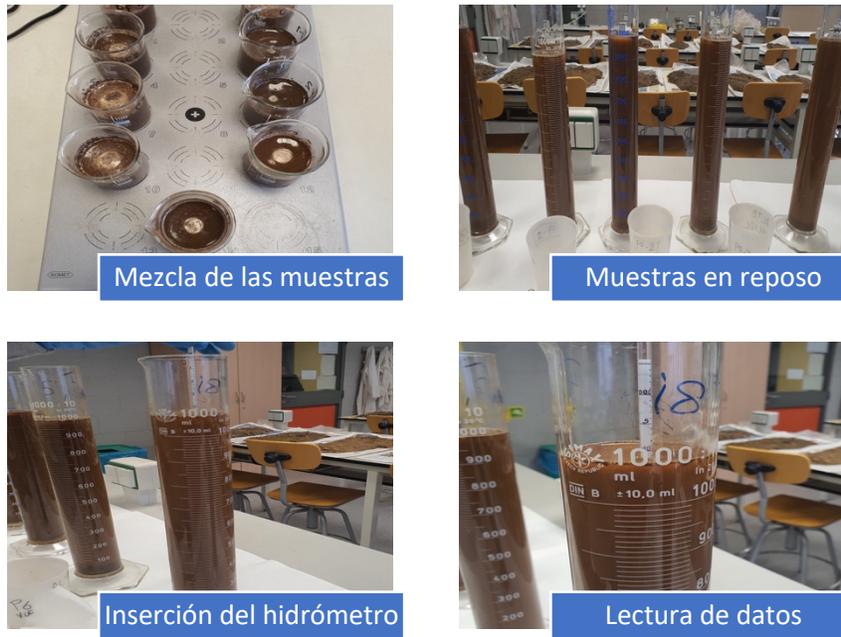


Figura 10. Proceso en laboratorio para la medición de granulometría por el método de Bouyoucos (Gee & Bauder, 1986).

Fuente: Imágenes propias (2023).

5.2.2. ESTABILIDAD DE AGREGADOS

Para el análisis de la estabilidad de agregados se siguió el protocolo de Low, (1954), donde 10 agregados de suelo entre de 4 a 4,8 mm de diámetro por muestra fueron seleccionados, pesados y utilizados para el método simulador de lluvia Ten Drop Impact (TDI), que consiste en simular el impacto de 10 gotas de agua sobre cada uno de los 10 agregados seleccionados de cada muestra. Esta simulación se realizó desde una altura de un metro y poniendo los agregados sobre un tamiz de 2,8 mm. Después de haber sido impactado los agregados con las 10 gotas de agua destilada, se procedió a secar y pesar los disgregados, peso que fue restado al peso inicial del agregado y su resultado fue expresado en porcentaje de estabilidad después de la prueba TDI (Figura 11).



Figura 11. Proceso para evaluación de estabilidad de agregados.

Fuente: Imágenes propias (2023).

5.2.3. HIDROFOBICIDAD

La Hidrofobicidad se midió de acuerdo con el método de tiempo de penetración de gota de agua (WDPT) (Wessel, 1988). Para esto, las muestras de suelo fueron colocadas en placas de 50 mm de diámetro y se expusieron a una atmósfera controlada (20 °C, 50 % de humedad relativa) durante 7 días (Figura 12). Luego, se depositaron diez gotas de agua destilada sobre las superficies de cada una de las muestras y se registró el tiempo que tardaron en penetrar completamente en el suelo cada una de las gotas.



Figura 12. Preparación de muestras para prueba de hidrofobicidad.

Fuente: Imagen propia (2023)

5.2.4. MEDICIÓN DE pH

Una alícuota de las muestras tomadas se llevaron a disolución con agua pura (1:2,5 suelo: agua) para obtener extractos hidrosolubles y usando el pH-metro Crison GLP 22 se tomó la lectura arrojada por éste (Figura 13).



Figura 13. Medición de pH en laboratorio.

Fuente: Imágenes propias (2023).

5.2.5. CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

Al igual que con la medición de pH, se procedió a preparar un extracto hidrosoluble (1:2,5) de las muestras del suelo con agua y esta solución fue medida con el conductímetro Crison Basic 30 donde se tomaron las lecturas de los datos (Figura 14).



Figura 14. Medición de Conductividad Eléctrica en laboratorio.

Fuente: Imágenes propias (2023).

5.2.6. CATIONES MAYORITARIOS (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+)

La medición de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+ extraíbles del suelo, se determinó a través de extracción con acetato de amonio (1:20) se filtraron con un filtro de tamaño de $0,45 \mu\text{m}$ (Prat Dumas, Francia) (Figura 15) y se analizaron con un cromatógrafo iónico (Metrohm 861) (Knudsen et al., 1986). Procedimiento que fue realizado por el laboratorio del CCiTUB – Centro Científico y Tecnológico de la Universidad de Barcelona. La cantidad de cationes extraíbles se expresó en mg kg^{-1} de suelo seco.

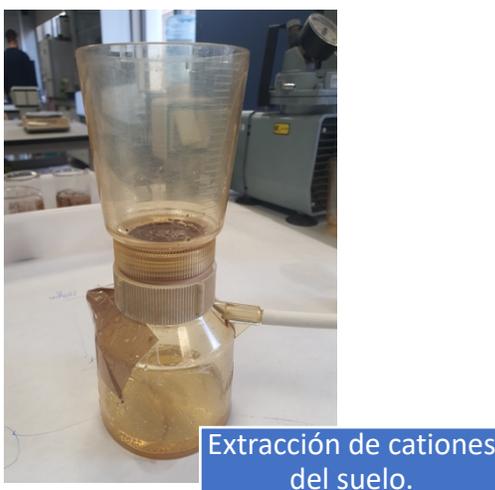


Figura 15. Extracción de disolución de suelo para medición de cationes mayoritarios.
Fuente: Imagen propia (2023).

5.2.7. CARBONO TOTAL Y NITRÓGENO TOTAL

El Carbono total y el Nitrógeno total fueron medidos en los laboratorios de la Universidad Politécnica de Cartagena por el método del analizador elemental (LECO CHN628) a partir de la muestra molida en el laboratorio de Geografía Física de la Facultad de Geografía e Historia de la Universidad de Barcelona.

5.2.8. TEMPERATURA Y HUMEDAD DEL SUELO:

Estos parámetros fueron tomados durante todo el año a través de un sensor TMS, TOMST® el cual registra datos cada 15 minutos. La temperatura fue tomada a tres niveles diferentes, una superficie del suelo, otra a 13 cm sobre éste y otro a 6 cm de profundidad del suelo, en cambio la humedad solo tuvo un registro a 6 cm de profundidad (Figura 16).

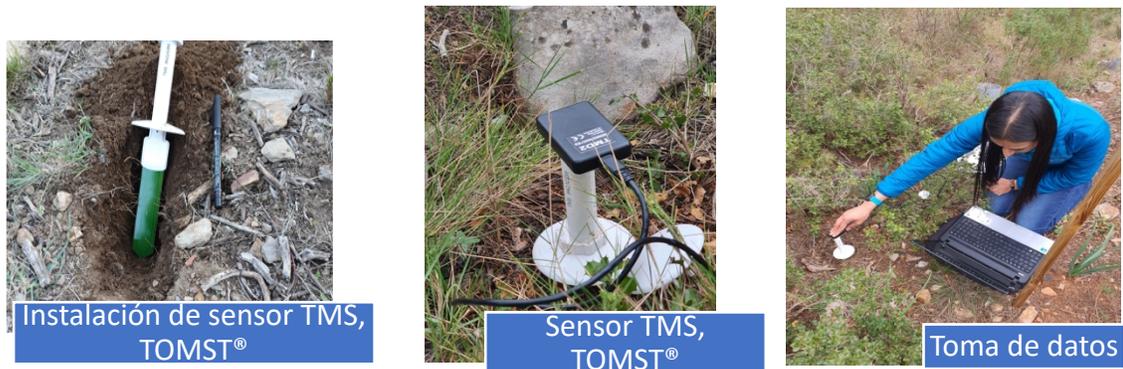


Figura 16. Medición de temperatura y humedad con sensor TMS, TOMST®.

Fuente: Imagen propia (2023).

5.2.9. RESPIRACIÓN DEL SUELO

Durante el año después de la quema prescrita, la respiración del suelo fue tomada seis veces, (aproximadamente cada dos meses). Este parámetro fue obtenido a través de un sistema automatizado portátil LI-8100A para flujo de CO₂ (Figura 17). obteniéndose datos de manera inmediata en $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ para su posterior análisis.



Figura 17. Medición del flujo de CO₂ con LI-8100A.

Fuente: Imagen propia (2023).

5.3. INVENTARIO DE VEGETACIÓN

Con el propósito de establecer el inventario vegetal de las parcelas en estudio, tanto la sometida a quema prescrita (PF) como la de control (C), se procedió a realizar dos tomas de datos, la primera dos meses después de la quema prescrita (mayo de 2022) y la segunda un año después de este primer inventario (mayo de 2023). Para esto se procedió a trazar 3 transectos lineales de 20 metros cada uno que atravesaba cada uno de los puntos de muestreo designados. A intervalos regulares de 20 centímetros a lo largo de este transecto, se llevó a cabo la identificación de las diferentes especies vegetales presentes alrededor de cada punto (Figura 18). Estos puntos se denominaron "puntos de contacto".

En total, se recolectaron y registraron 300 puntos de contacto en cada parcela. Los datos resultantes de esta identificación fueron registrados y, posteriormente, se plasmaron en gráficos utilizando Microsoft Excel (2023) para su posterior análisis de la composición vegetal en las parcelas bajo estudio.



Figura 18. Procedimiento para realización de inventario vegetal.

Fuente: Imagen propia (2023).

5.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Una vez recopilados todos los resultados de las pruebas fisicoquímicas, se procedió a su análisis estadístico utilizando el software IBM SPSS Statistics 27. Para discernir las diferencias estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95%, aplicamos un ANOVA de medidas repetidas. Posteriormente, realizamos una prueba post-hoc de

Bonferroni para evaluar las diferencias específicas entre las muestras. Esta comparación se efectuó entre las muestras de la parcela sometida a quema prescrita, tanto un día como un año después, en comparación con la parcela de control.

Finalmente, se presenta los resultados de manera visual mediante gráficos elaborados con Microsoft Excel (2023).

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A manera general se observa que, en el transcurso de un año, la parcela que fue sometida a quema prescrita muestra una tendencia global de disminución en los valores de todos los parámetros evaluados, a excepción del pH. Estos resultados se sintetizan en la Figura 19 y Figura 20, tablas que serán objeto de discusión en términos de cada parámetro como también sus posibles interacciones en detalle más adelante.

Parámetro	1 día después de la quema prescrita (Marzo 1 del 2022)		1 año después de la quema prescrita (Marzo 9 del 2023)	
	Control	Quema Prescrita	Control	Quema Prescrita
Estabilidad de agregados (%)	94,50	94,43	90,84	90,92
SD	1,74	3,01	10,79	3,49
SE	0,78	1,34	4,83	1,56
Hidrofobicidad (tiempo en segundos)	1,04	4,01	1,02	1,16
SD	0,6709	2,4199	0,3293	0,4694
SE	0,3001	1,0822	0,1473	0,2099
pH	7,09	7,21	7,35	7,68
SD	0,0288	0,1385	0,1668	0,2217
SE	0,0129	0,0619	0,0746	0,0991
Conductividad eléctrica - CE ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	192	412	192	202
SD	35,34	115,70	59,02	135,69
SE	15,81	51,74	26,40	60,68
Ca (mg kg⁻¹)	6.577	6.490	6.754	5.351
SD	1.715	1.516	858	1.333
SE	767	678	384	596
Mg (mg kg⁻¹)	377	394	410	289
SD	60,76	111,91	73,96	84,35
SE	27,17	50,05	33,07	37,72
Na (mg kg⁻¹)	137	156	131	88
SD	62,68	112,79	33,07	26,67
SE	28,03	50,44	14,79	11,93
K (mg kg⁻¹)	457	442	500	349
SD	74,16	143,77	76,00	127,90
SE	33,16	64,29	33,99	57,20
Carbono total - CT (mg kg⁻¹)	6,75	6,61	6,75	4,52
SD	1,2463	1,9529	1,3016	1,3615
SE	0,5574	0,8733	0,5821	0,6089
Nitrógeno total - NT (mg kg⁻¹)	0,3816	0,3807	0,4125	0,2866
SD	0,0390	0,1260	0,0757	0,0783
SE	0,0174	0,0563	0,0339	0,0350

Figura 19. Tabla resumen de los parámetros físicos y químicos.

Fuente: Elaboración propia (2023).

Parámetro	04/05/2022		17/06/2022		06/09/2022		17/11/2022		26/01/2023		09/03/2023	
	Control	Quema prescrita										
Respiración (Flujo de CO ₂ en $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	3,63	3,06	2,26	2,66	0,95	1,36	1,77	2,52	1,14	1,51	1,81	2,34
SD	1,1716	0,9231	0,8255	0,5590	0,1410	0,3819	0,4522	0,7927	0,2188	0,3376	0,3528	0,3895
SE	0,5239	0,4128	0,3692	0,2500	0,0630	0,1708	0,2022	0,3545	0,0978	0,1510	0,1578	0,1742
Temperatura del suelo a 6 cm de profundidad (°C)	16,24	18,89	25,78	28,12	25,12	28,47	15,99	16,50	6,41	3,13	11,83	12,90
SD	0,8732	0,0808	2,4223	0,2607	1,5628	0,0931	0,5728	0,2892	3,4339	3,2820	0,7607	0,3917
SE	0,3905	0,0361	1,0833	0,1166	0,6989	0,0416	0,2562	0,1293	1,5357	1,4678	0,3402	0,1752
Temperatura a superficie del suelo (°C)	16,35	18,43	31,33	30,87	27,88	28,83	14,31	14,97	3,72	1,97	13,32	14,01
SD	1,1459	0,5283	3,1807	0,1616	4,4526	0,7628	1,0232	0,5324	2,4175	2,1598	0,7907	0,1945
SE	0,5125	0,2363	1,4224	0,0723	1,9913	0,3411	0,4576	0,2381	1,0812	0,9659	0,3536	0,0870
Temperatura a 12 cm sobre el suelo (°C)	15,54	16,85	31,87	29,91	27,91	26,74	13,80	13,94	3,22	1,60	13,55	13,93
SD	0,8263	1,1538	3,6242	0,3216	4,8984	0,3696	0,7902	0,2473	2,2030	2,0139	0,5936	0,2717
SE	0,3695	0,5160	1,6208	0,1438	2,1906	0,1653	0,3534	0,1106	0,9852	0,9006	0,2655	0,1215
Humedad del suelo (%)	15,48	12,39	4,08	2,87	4,14	2,60	10,48	5,29	13,07	4,58	14,52	12,70
SD	5,02	3,87	2,76	0,40	3,30	0,14	4,40	1,30	8,18	6,31	4,39	1,26
SE	2,25	1,73	1,23	0,18	1,48	0,06	1,97	0,58	3,66	2,82	1,96	0,56

Figura 20. Tabla resumen de los parámetros físicos y biológicos.

Fuente: Elaboración propia (2023).

6.1. GRANULOMETRÍA Y TEXTURA

Realizada la granulometría de las muestras de suelo y de acuerdo a los resultados obtenidos con el triángulo textural de Soil survey Staff (2014) los suelos de las parcelas control como en la sometida a quema prescrita, tanto para el 2022 como el 2023 tuvieron una textura arenosa con contenido de arena mayor al 87% y de arcilla que no supero el 7%. A pesar de que los resultados dejan ver ligeros cambios en cuanto a porcentajes de arena, limo y arcilla entre un año y otro, estos cambios no son estadísticamente significativos en ninguna de las dos fechas de evaluación que fueron: un día después de la quema prescrita y un año posterior a esta, como tampoco hubo diferencias entre tratamientos lo cual se observa gráficamente en la Figura 21.

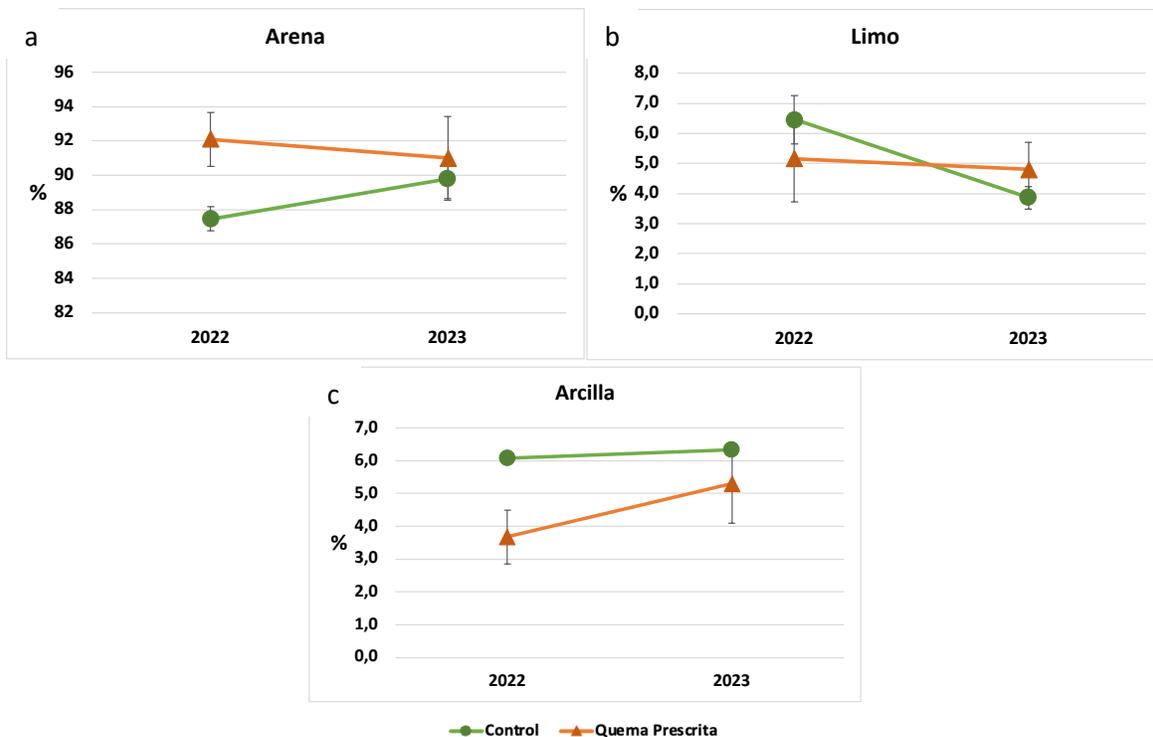


Figura 21. Comparación evolución anual de la granulometría.

Fuente: Elaboración propia (2023).

Valores en % de partículas de arena, limo y arcilla de la parcela sometida a quema prescrita (triángulos y línea anaranjada); valores en % de partículas de arena, limo y arcilla de la parcela control (puntos y línea verde); valores medios y error estándar (barras colgantes); análisis con ANOVA de medidas repetidas con test post-hoc de Bonferroni $p < 0.05$.

6.2. ESTABILIDAD DE AGREGADOS

Uno de los parámetros físicos importantes para evaluar los suelos es la estabilidad de los agregados, ya que los agregados del suelo funcionan como reservorios de humedad, nutrientes y carbono orgánico, que pueden verse afectados por los incendios forestales, así como también por las quemas prescritas dependiendo de su intensidad y su severidad (Albalasmeh et al., 2013; Keeley, 2009). Las altas temperaturas y su larga duración pueden afectar considerablemente a los contenidos de materia orgánica en el suelo siendo ésta la encargada de mantener a los agregados de forma estable. Al destruirse la materia orgánica, los agregados del suelo colapsan y por ende su estructura se ve afectada reduciéndose la cantidad de poros. Las altas temperaturas también pueden conllevar a la volatilización, carbonización y oxidación de elementos menores (Alcañiz et al., 2018; Granged et al., 2011).

Comprendiendo la importancia de este parámetro y conforme a lo observado en la Figura 22, se observa una ligera disminución de estos porcentajes de estabilidad de agregados tanto en la parcela sometida a quema prescrita como en la parcela control, a pesar de ello, no se observan diferencias estadísticamente significativas.

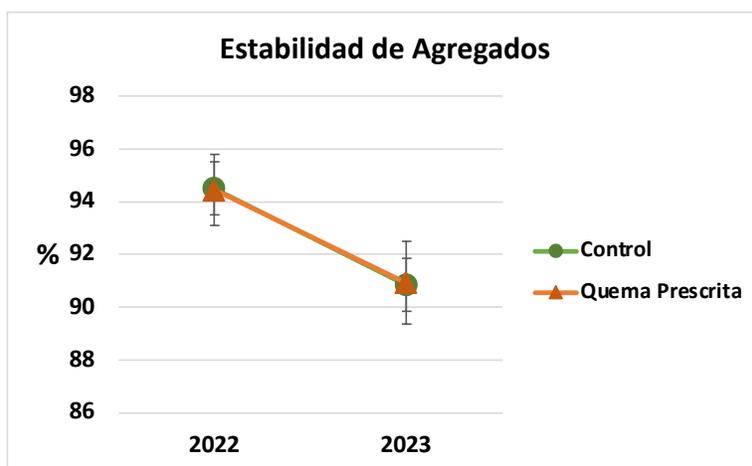


Figura 22. Comparación de la evolución anual de los valores de estabilidad de agregados por el método simulador de lluvia Ten Drop Impact (TDI) Low, (1954).

Fuente: Elaboración propia (2023).

Valores en % de estabilidad de agregados de la parcela sometida a quema prescrita (triángulos y línea anaranjada); valores en % de estabilidad de agregados de la parcela control (puntos y línea verde); valores medios y error estándar (barras colgantes); análisis con ANOVA de medidas repetidas con test post-hoc de Bonferroni $p < 0.05$.

6.3. HIDROFOBICIDAD

La hidrofobicidad o repelencia al agua en nuestra parcela de experimentación se vio aumentada una vez fue sometida a la quema prescrita, llegando a alcanzar valores estadísticamente significativos al contrastarlo con la parcela control, pero un año después esta volvió a sus valores iniciales Figura 23, este mismo comportamiento lo obtuvo Plaza-Álvarez et al., (2018) en su estudio. Estos cambios de hidrofobicidad han sido reportados por varios autores de manera diversa; el aumento de esta repelencia Granged et al., (2011) lo observó en suelos australianos cuando se superaron temperaturas de 142 °C y Debano, (1981) lo citó cuando los suelos alcanzaron temperaturas entre 176 y 204 °C, pero una vez superado este rango, la hidrofobicidad decreció tal como el mismo autor lo observó en parcelas que llegaron a 317°C. La relación de esta repelencia Pierson et al., (2008) lo asocia con la alta presencia de cenizas ocasionando la reducción de la infiltración del agua en los suelos y consecuentemente aumentando la escorrentía.

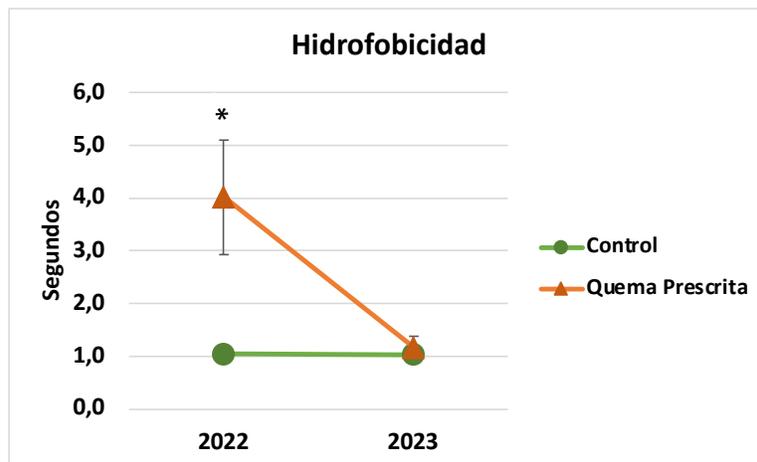


Figura 23. Comparación de la evolución anual de los valores de hidrofobicidad por el método de tiempo de penetración de gota de agua (WDPT) (Wessel, 1988).

Fuente: Elaboración propia (2023).

Tiempo en segundos de la parcela sometida a quema prescrita (triángulos y línea anaranjada); dato de tiempo en segundos de la parcela control (puntos y línea verde); valores medios y error estándar (barras colgantes); diferencia estadísticamente significativa entre tratamientos con ANOVA de medidas repetidas con test post-hoc de Bonferroni $p < 0.05$ ().*

6.4. pH

Al comparar los valores del pH de la parcela sometida a la quema prescrita con la parcela control, un día después de la quema prescrita (2022), se vio un aumento, pero no significativo, de $7,09 \pm 0,02$ a $7,20 \pm 0,13$ respectivamente (Figura 19). Un año después de la quema prescrita (2023) este pH siguió aumentando, alcanzando valores de $7,68 \pm 0,22$ en la parcela sometida a quema prescrita y $7,34 \pm 0,16$ en el control, datos que no llegan a demostrar un aumento estadísticamente significativo dentro del mismo tratamiento, pero que, si llegan a tenerlo al comparar los valores de la parcela control con los de la quema prescrita un año después, lo cual se ve representado con el * en la Figura 24.

Esta misma tendencia en los valores de pH un año después de ser sometido un suelo a quema prescrita la presentan varios autores. Alcañiz et al., (2016) lo reporto en bosques del macizo de Montgrí, Úbeda et al., (2005) y Granged et al., (2011) en suelos mediterráneos y Bennett et al., (2014) en bosques de eucalipto.

Estos aumentos de pH se pueden atribuir a la incorporación de cenizas al suelo (Pereira et al., 2014), a la oxidación de la materia orgánica y a la liberación de cationes (Arocena &

Opio, 2003), sin embargo, otros autores han visto disminuciones en los niveles del pH llegando incluso a sus valores iniciales. Úbeda et al.,(2005) afirma que, para comprender este comportamiento variable, se deben tener en cuenta muchos factores, incluidos el clima, el tipo de suelo, la acumulación de ceniza, los procesos de erosión y, sobre todo, la regeneración de la vegetación.

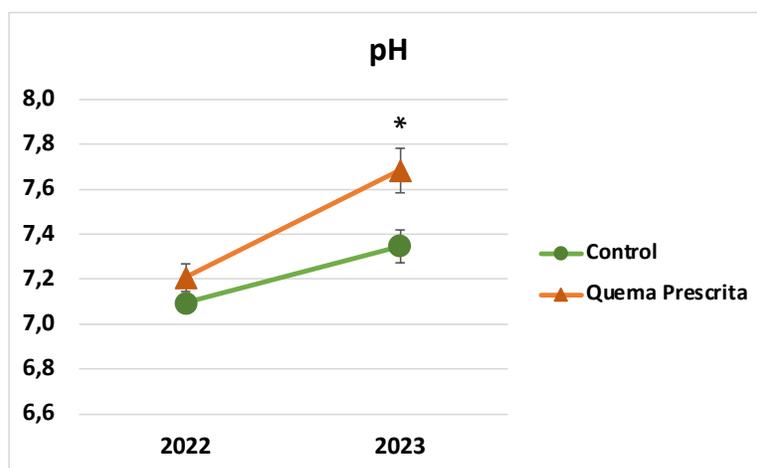


Figura 24. Comparación de la evolución anual de los valores de pH.

Fuente: Elaboración propia (2023).

Valores de pH de la parcela sometida a quema prescrita (triángulos y línea anaranjada); valores de pH de la parcela control (puntos y línea verde); valores medios y error estándar (barras colgantes); diferencia estadísticamente significativa entre tratamientos con ANOVA de medidas repetidas con test post-hoc de Bonferroni $p < 0.05$ (asterisco).*

6.5. CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

Los valores de conductividad eléctrica (CE) de la parcela sometida a la quema prescrita comparada con la parcela control, aumentaron más del doble un día después del incendio (2022), pasando de $192,40 \pm 35,34 \mu\text{S cm}^{-1}$ a $411,80 \pm 115,70 \mu\text{S cm}^{-1}$ (Figura 19), cifras que comparadas entre las dos parcelas muestran diferencias estadísticamente significativas (* en la Figura 25). Después de un año, los valores de CE de la parcela sometida a la quema prescrita cayeron por debajo de sus valores previos ($202,48 \pm 135,69 \mu\text{S cm}^{-1}$), sin embargo, la parcela control no presentó cambios significativos en sus datos ($192,10 \pm 59,02 \mu\text{S cm}^{-1}$) tal como se representa en la Figura 25.

La disminución de los valores de CE en el suelo un año después de la quema prescrita se puede atribuir a la lixiviación de iones del suelo (Úbeda et al., 2005), esto también es

reforzado con los resultados obtenidos en los estudios de Alcañiz et al., (2016) y Granged et al., (2011). Este mismo comportamiento ha sido registrado en incendios forestales, debido a la liberación de iones solubles durante la combustión de materia orgánica y la incorporación de cenizas al suelo (Certini, 2005).

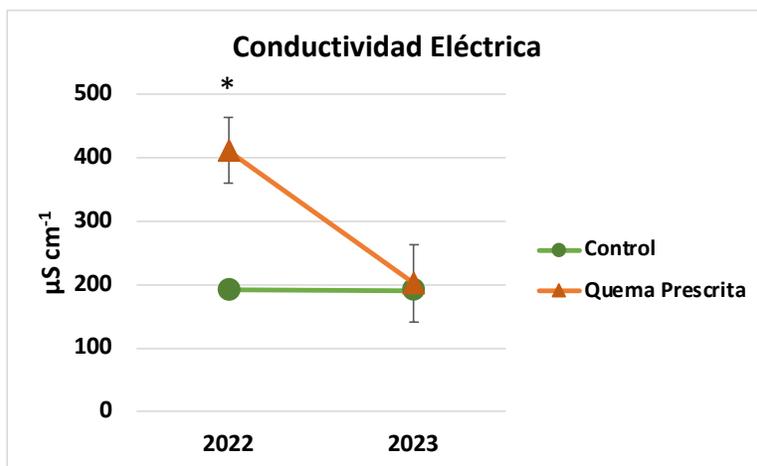


Figura 25. Comparación de la evolución anual de los valores de conductividad eléctrica (CE).

Fuente: Elaboración propia (2023).

Valores de CE de la parcela sometida a quema prescrita (triángulos y línea anaranjada); valores de CE de la parcela control (puntos y línea verde); valores medios y error estándar (barras colgantes); diferencia estadísticamente significativa entre tratamientos con ANOVA de medidas repetidas con test post-hoc de Bonferroni $p < 0.05$ ().*

6.6. CATIONES MAYORITARIOS (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+)

El comportamiento de los valores de los cationes mayoritarios Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+ fue similar en todos, presentando una reducción de sus contenidos en la parcela sometida a la quema prescrita un año después de ésta. Es así como estos elementos para el 2022 tuvieron valores mayores que en 2023, tal como se reporta en la Figura 19 y se ve reflejado gráficamente en la Figura 26. Cabe resaltar, que a lo largo de un año y teniendo en cuenta la topografía regular de la parcela con baja pendiente, no se detectan procesos activos de erosión y por tanto este no sería un factor al cual se le atribuya la pérdida de cationes, sin embargo, este patrón de cambio que se presenta en este estudio, se asemeja a los resultados obtenidos por Alcañiz et al., (2016) y Outeiro et al., (2008), donde atribuyen la caída de estos niveles de nutrientes a la lixiviación y el consumo que demandan las plantas que rebrotan después de incendio. De acuerdo con un informe de Triad Inc (2001), este concluyó que, debido al crecimiento de la vegetación, el K^+ es consumido en una tasa promedio de $112\text{--}224 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

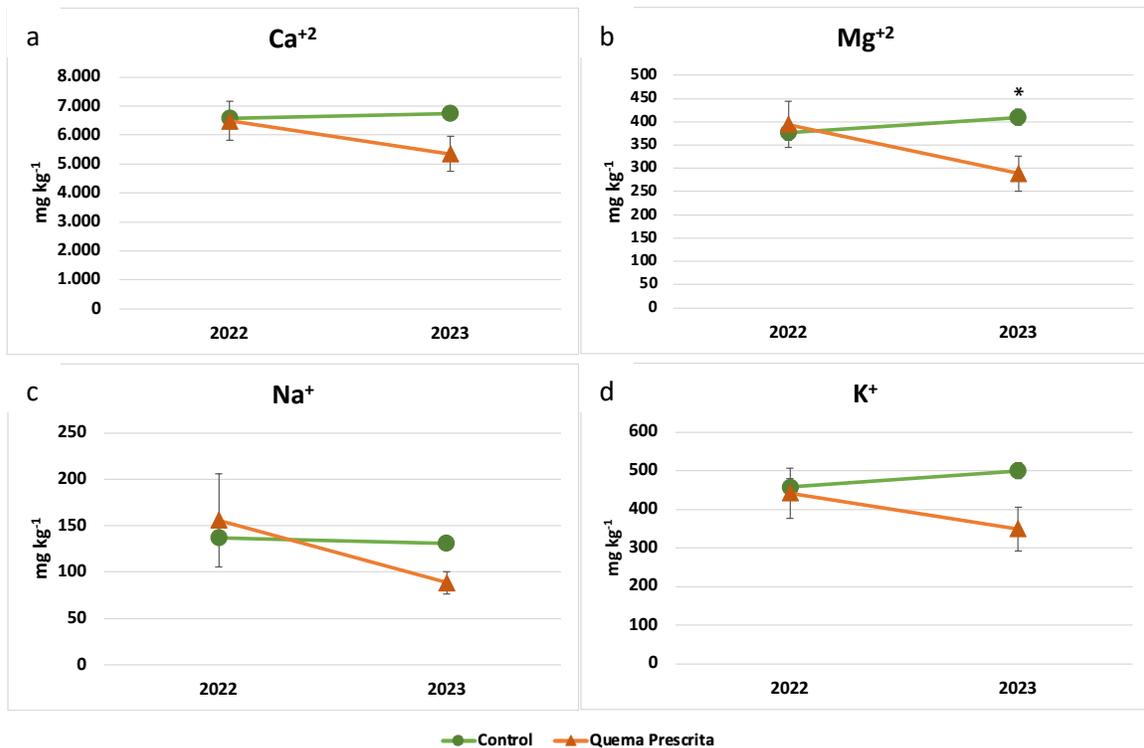


Figura 26. Comparación de la evolución anual de los valores de los cationes Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+ .

Fuente: Elaboración propia (2023).

Valores en mg kg^{-1} de concentración de los cationes Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+ de la parcela sometida a quema prescrita (triángulos y línea anaranjada); valores en mg kg^{-1} de concentración de los cationes Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+ de la parcela control (puntos y línea verde); valores medios y error estándar (barras colgantes); diferencia estadísticamente significativa entre tratamientos con ANOVA de medidas repetidas con test post-hoc de Bonferroni $p < 0.05$ (*).

6.7. CARBONO TOTAL

Los valores de carbono total fueron similares para las dos parcelas un día después de la quema prescrita (2022) con $6,75 \pm 1,24 \text{ mg kg}^{-1}$ y $6,61 \pm 1,95$ para la parcela control y la parcela intervenida con quema prescrita respectivamente (Figura 19). Sin embargo, un año después del fuego (2023) el contenido de carbono total en la parcela sometida a quema prescrita disminuyó considerablemente a $4,52 \pm 1,36 \text{ mg kg}^{-1}$, mientras que los valores de la parcela control se mantuvieron exactamente igual, evidenciando diferencias estadísticamente significativas entre parcelas un año después de la quema tal como lo muestra la Figura 27.

Respecto a estos valores, algunos autores como Alcañiz et al., (2016) reportan aumentos de hasta 23% en los contenidos de C un año después de la quema prescrita, siendo un cambio estadísticamente significativo, sin embargo, otros estudios como los de Certini,(2005), Afif Khouri & Oliveira Prendes, (2006) y Granged et al., (2011), reportan disminuciones graduales y leves a lo largo del tiempo lo cual lo atribuyen a una creciente mineralización de la tasa de C que resulta en una mayor presencia de nutrientes disponibles para las plantas.

Certini, (2005) explicó que es típico encontrar una pérdida marcada en el carbono del suelo como consecuencia de incendios de alta intensidad, sin embargo, el estudio de las reservas de carbono a largo plazo en los suelos sometidos a quemas prescritas debe seguir estudiándose de acuerdo al ambiente y a la intensidad y recurrencia de éstas, ya que el suelo es el principal reservorio de carbono que existe, de ahí su gran importancia para el equilibrio de los ecosistemas (Alcañiz et al., 2018).

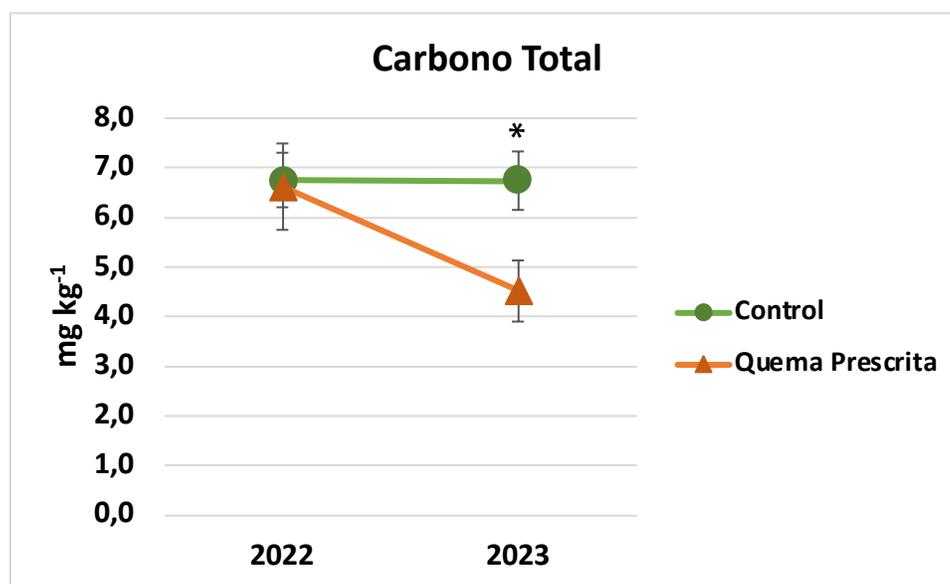


Figura 27. Comparación de la evolución anual del contenido de Carbono total.

Fuente: Elaboración propia (2023).

Valores en mg kg⁻¹ de concentración de Carbono total de la parcela sometida a quema prescrita (triángulos y línea anaranjada); valores en mg kg⁻¹ de concentración de Carbono total de la parcela control (puntos y línea verde); valores medios y error estándar (barras colgantes); diferencia estadísticamente significativa entre tratamientos con ANOVA de medidas repetidas con test post-hoc de Bonferroni $p < 0.05$ (*).

6.8. NITRÓGENO TOTAL

La tendencia en los contenidos de Nitrógeno total (Figura 28) se reflejaron exactamente igual a los de Carbono total (Figura 27). El Nitrógeno total pasó de $0,38 \pm 0,03 \text{ mg kg}^{-1}$ y $0,38 \pm 0,12 \text{ mg kg}^{-1}$ en la parcela control para el año 2022 y 2023 respectivamente a $0,41 \pm 0,07 \text{ mg kg}^{-1}$ y $0,28 \pm 0,07 \text{ mg kg}^{-1}$ en la parcela sometida a quema prescrita un día y un año después del fuego respectivamente tal como se resume en la tabla de la Figura 19.

Respecto a este elemento, autores como Úbeda et al., (2005) atribuyen su disminución a la facilidad con que el fuego puede afectar al Nitrógeno orgánico del suelo, convirtiéndolo en amonio y nitrato, que puede luego ser adsorbido en partículas cargadas al suelo o absorbido por las plantas. Por otro lado, Afif Khouri & Oliveira Prendes, (2006) atribuyen el descenso de este elemento a la lixiviación y a la germinación de algunas especies vegetales que posteriores al fuego consumen este elemento para su desarrollo. Lo anterior también se apoya en Antos et al., (2003), quien afirma que la rápida disminución de este parámetro en el periodo de recuperación post-incendio podría atribuirse a la lixiviación, la inmovilización microbiana y absorción de este elemento por las plantas.

Algunos estudios concluyen que las quemas prescritas de baja intensidad son a menudo beneficiosas porque las bajas temperaturas alcanzadas provocan una mínima volatilización de N (Afif Khouri & Oliveira Prendes, 2006; Úbeda et al., 2005).

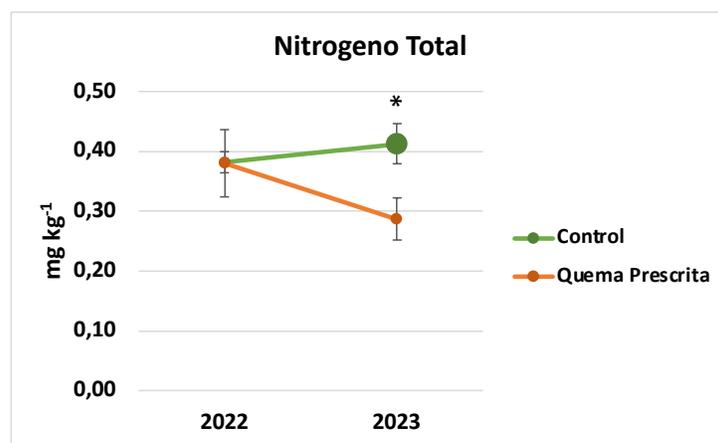


Figura 28. Comparación de la evolución anual del contenido de Nitrógeno total.

Fuente: Elaboración propia (2023).

Valores en mg kg^{-1} de concentración de Nitrógeno total de la parcela sometida a quema prescrita (triángulos y línea anaranjada); valores en mg kg^{-1} de concentración de Nitrógeno total de la parcela control (puntos y línea verde); valores medios y error estándar (barras colgantes); diferencia estadísticamente significativa entre tratamientos con ANOVA de medidas repetidas con test post-hoc de Bonferroni $p < 0.05$ (*).

6.9. TEMPERATURA DEL SUELO

En la siguiente Figura 29, a, b y c, se pueden observar las medidas de temperatura en 3 lugares diferentes del perfil del suelo (6 cm de profundidad; en la superficie del suelo y a 12 cm de altura desde la superficie).

Se tienen valores continuos de la temperatura y humedad, pero solo se grafican estos seis momentos, para que coincidan con los datos posteriores de respiración del suelo.

Las tres graficas a, b, y c de la Figura 29 dejan ver un comportamiento similar, sin embargo, en última de éstas Figura 29c (temperatura del suelo a 6 cm de profundidad), se pueden comprobar cambios significativos entre tratamientos (C y PF) en los meses de mayo y septiembre, lo que indica que la quema prescrita ha tenido un efecto en el calentamiento del suelo, seguramente al estar más desprotegida de vegetación. Tanto en superficie como en altura (Figura 29 a y b) las temperaturas no muestran diferencias entre los dos tratamientos (C y PF).

Los procesos de calentamiento y enfriamiento en el suelo suelen ser más lentos a mayor profundidad, lo que es lógico debido a la mala conducción de la temperatura en el suelo.

Se puede observar con los datos obtenidos que el periodo del año tiene más importancia que el tratamiento para poder observar diferencias entre las temperaturas.

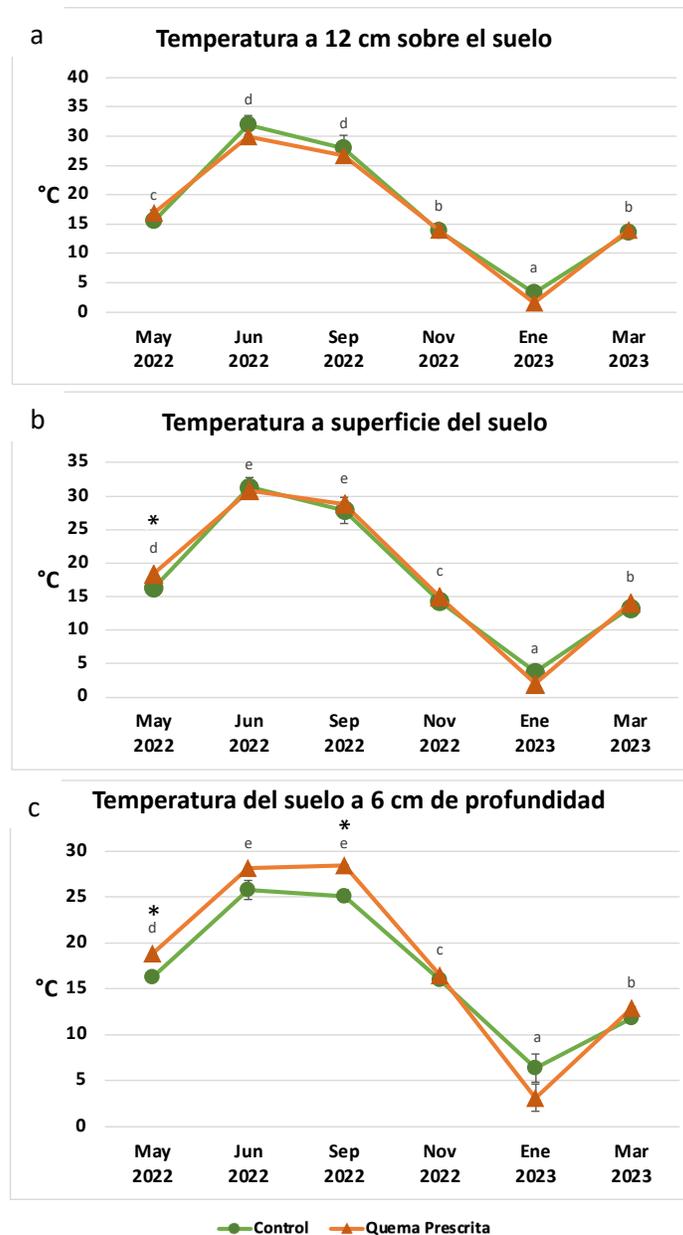


Figura 29. Comparación de la temperatura del suelo a distintos niveles en 6 tiempos diferentes.

Fuente: Elaboración propia (2023).

Valores de temperatura en °C de la parcela sometida a quema prescrita (triángulos y línea anaranjada); Valores de temperatura en °C de la parcela control (puntos y línea verde); valores medios y error estándar (barras colgantes); diferencia estadísticamente significativa entre tratamientos (*); distintas letras indican la diferencia estadísticamente significativa entre tiempos. Análisis con ANOVA de medidas repetidas con test post-hoc de Bonferroni $p < 0.05$.

6.10. HUMEDAD DEL SUELO

En la siguiente Figura 30, se puede observar cómo en todos los momentos la parcela control conserva más humedad que la parcela tratada con quema prescrita. Este hecho podemos atribuirlo a una presencia mayor de vegetación que puede mantener esta humedad y no favorecer procesos de evaporación. Otro factor que también llega a influir es la presencia de cenizas que hacen que el suelo aumente ligeramente su hidrofobicidad. De todos modos, las variaciones no son en ningún caso significativamente diferentes entre las dos parcelas. Si se observan diferencias significativas entre los tiempos de muestreo ya que la estacionalidad tiene una importante influencia en la humedad, observándose en la Figura 30 un cambio gradual entre los seis tiempos, la cual, si se compara con las gráficas de temperaturas del apartado anterior, se relaciona inversamente. Así las cosas, en cuanto la temperatura tiende a subir, la humedad comienza a bajar.

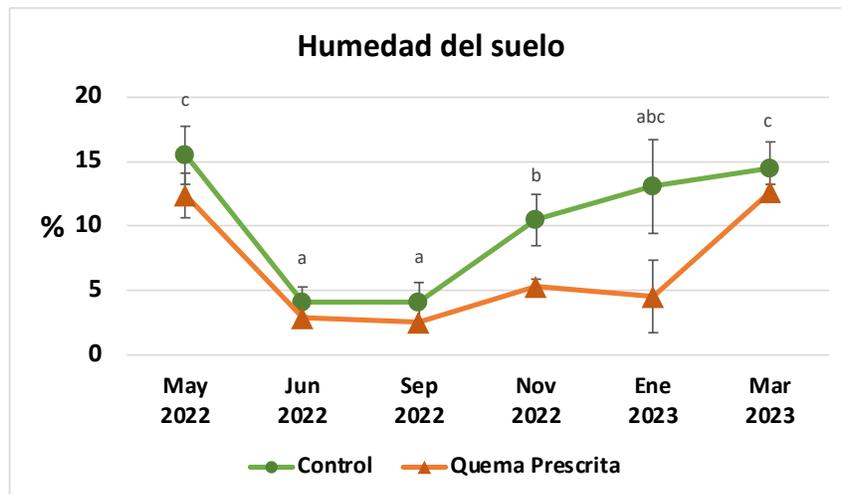


Figura 30. Comparación de la humedad del suelo en 6 tiempos diferentes.

Fuente: Elaboración propia (2023).

Porcentaje de la humedad del suelo de la parcela sometida a quema prescrita (triángulos y línea anaranjada); porcentaje de la humedad del suelo de la parcela control (puntos y línea verde); valores medios y error estándar (barras colgantes); diferencia estadísticamente significativa entre tratamientos (*); distintas letras indican la diferencia estadísticamente significativa entre tiempos. Análisis con ANOVA de medidas repetidas con test post-hoc de Bonferroni $p < 0.05$.

6.11. RESPIRACIÓN DEL SUELO

La respiración del suelo es medida a través del flujo de CO₂ el cual es emitido en parte por las raíces de las plantas, pero principalmente por la actividad microbiana del suelo que descompone la materia orgánica (Plaza Álvarez, 2022). Según los datos de flujo de CO₂ representados en la Figura 31, se puede observar que la respiración del suelo no presenta diferencias significativas entre las dos parcelas, excepto en la parcela de quema prescrita donde hay más actividad que en la parcela control, salvo en el mes de mayo, como también sucedió de manera similar en el estudio de Plaza-Álvarez et al., (2017). Sin embargo, entre los distintos tiempos de muestreo si hay diferencias significativas, las cuales se representan con las diferentes letras. Es así como en septiembre de 2022 y en enero de 2023 se presentan los valores de respiración más bajos y similares entre ellos, en mayo del 2022 obtenemos los valores más altos y en junio 2022, noviembre 2022 y marzo 2023 los valores son intermedios.

Estos resultados parecen estar influenciados por las condiciones ambientales durante el año de muestreo. La actividad microbiana se desarrolla de manera óptima cuando la temperatura y la humedad tienen valores intermedios. También, cuando estos parámetros sobrepasan estos rangos, la actividad se disminuye ya sea por muy altas temperaturas o muy bajas. Lo anterior es respaldado a nivel laboratorio por Ramos Vásquez & Dávila (2008), donde concluyó que los factores determinantes que condicionan la actividad microbiana del suelo son la temperatura y la humedad. Lo anterior se refleja en los resultados obtenidos en septiembre de 2022, donde la respiración obtuvo los niveles más bajos, coincidiendo con la finalización del verano y menores registros de humedad como se ve en la Figura 30.

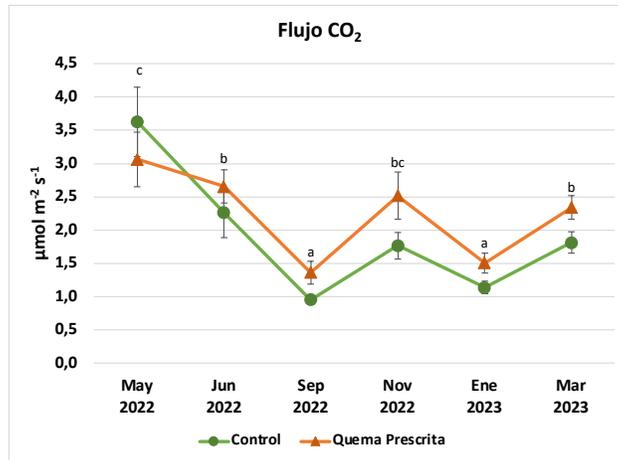


Figura 31. Comparación de la respiración del suelo en 6 tiempos diferentes.

Fuente: Elaboración propia (2023).

Valores del flujo de CO₂ de la parcela sometida a quema prescrita (triángulos y línea anaranjada); valores del flujo de CO₂ de la parcela control (puntos y línea verde); valores medios y error estándar (barras colgantes); diferencia estadísticamente significativa entre tratamientos (*); distintas letras indican la diferencia estadísticamente significativa entre tiempos. Análisis con ANOVA de medidas repetidas con test post-hoc de Bonferroni $p < 0.05$.

6.12. RELACIÓN RESPIRACION DEL SUELO Y CONDICIONES AMBIENTALES

De acuerdo con los resultados obtenidos (Figura 32), se puede apreciar que el comportamiento de respiración y temperatura fue el mismo tanto en la parcela sometida a quema prescrita como la parcela control. Según Plaza-Álvarez et al., (2017) la temperatura y la respiración muestran tendencias positivas, donde a mayor temperatura del suelo hay mayor respiración. Sin embargo, teniendo en cuenta lo expuesto por Zak et al., (1994) a exposición prolongada del sol o rayos UV y temperaturas superiores a 25°C la respiración del suelo se puede reducir debido a la disminución de la actividad microbiana por sobreexposición, como parece ser que sucedió en este estudio. Además, se puede apreciar que en el mes de mayo con época de primavera ocurrieron las respiraciones máximas del suelo con valores superiores a 3 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y temperaturas entre 15 y 20 °C. Sin embargo, en verano con las temperaturas más altas, la respiración del suelo fue menor, de esto se puede inferir que este comportamiento puede depender de factores microclimáticos, como exposición, orientación, cobertura vegetal, capa de hojarasca, temperaturas promedio y precipitaciones tal como lo expuso Curiel Yuste et al., (2004).

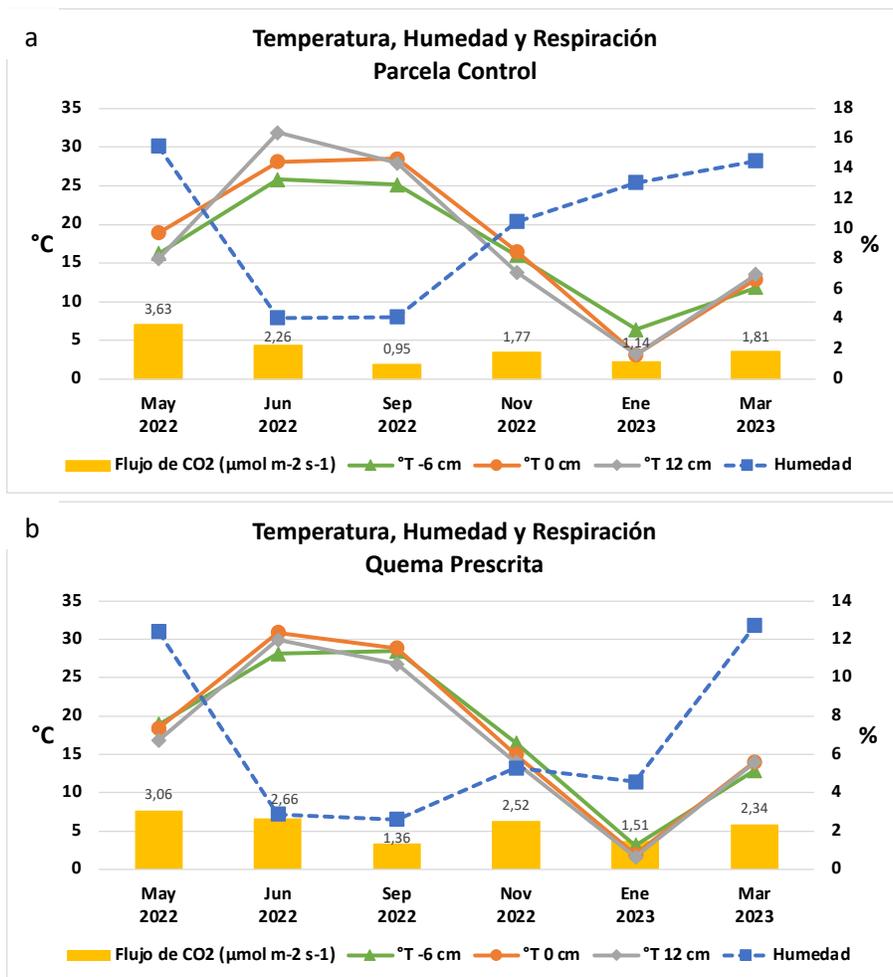


Figura 32. Relación de temperatura, humedad y respiración del suelo de la parcela sometida a quema prescrita.

Fuente: Elaboración propia (2023).

Valores en °C de la temperatura del suelo a 6 cm de profundidad (triángulos y línea verde); valores en °C de la temperatura del suelo en superficie (círculos y línea anaranjada); valores en °C de la temperatura a 12 cm sobre la superficie del suelo (rombos y línea gris); valores en % de la humedad del suelo (cuadrados y línea punteada azul); valores en μmol m⁻² s⁻¹ del flujo de CO₂ (barras amarillas).

6.13. INVENTARIO DE VEGETACIÓN

Tomados los contactos de vegetación de las parcelas de estudio sembradas con *Pinus halepensis* Mill., se contabilizaron el número de especies por transectos en las parcelas. Se pudieron determinar 13 especies diferentes de plantas, pero las especies más abundantes bajo su dosel fueron *Quercus coccifera* L., *Brachypodium retusum* Pers. y *Asparagus acutifolius* L. lo cual se puede ver representado en la Figura 33. En el inventario que se realizó dos meses después de la quema prescrita no se observó un patrón general de presencia de estas especies entre parcelas. La cantidad de algunas especies en la parcela de quema prescrita fue menor que en la parcela control, como fue el caso de *Asparagus acutifolius*, *Asphodelus* L., *Cistus monspeliensis* L., *Genista scopius* L. *Quercus coccifera* L., *Smilax aspera* L., *Trifolium* L. y *Salvia rosmarinus* Spenn, otras se mantuvieron igual como es el caso de *Cistus albidus* L. y otras donde la presencia fue mayor en la parcela de quema prescrita que en la de control, como fue el caso de *Brachypodium retusum* Pers. *Carduus pycnocephalus* L., *Cistus salviifolius* L. y *Rubia peregrina* L. Sin embargo, hay un patrón donde la cantidad de especies tendió a ser menor en la parcela que fue sometida a quema prescrita lo cual puede demostrar la eficacia de remoción de material combustible tras la quema.

Al analizar el comportamiento de presencia de individuos de cada una de las diferentes especies entre un año y el otro se observa una tendencia general de aumento, sin embargo la proporción es mayor en la parcela que fue sometida a quema prescrita, lo cual se puede deber a la disponibilidad de nutrientes que la planta toma para su rebrote y crecimiento, hecho que también se puede relacionar con la tendencia que se observó de disminución de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Nitrógeno total y Carbono total en el suelo. Sin embargo, para entender un poco más la recolonización de estas especies, es importante analizar más en detalle no solo la presencia o no de ellas, sino su crecimiento y desarrollo.

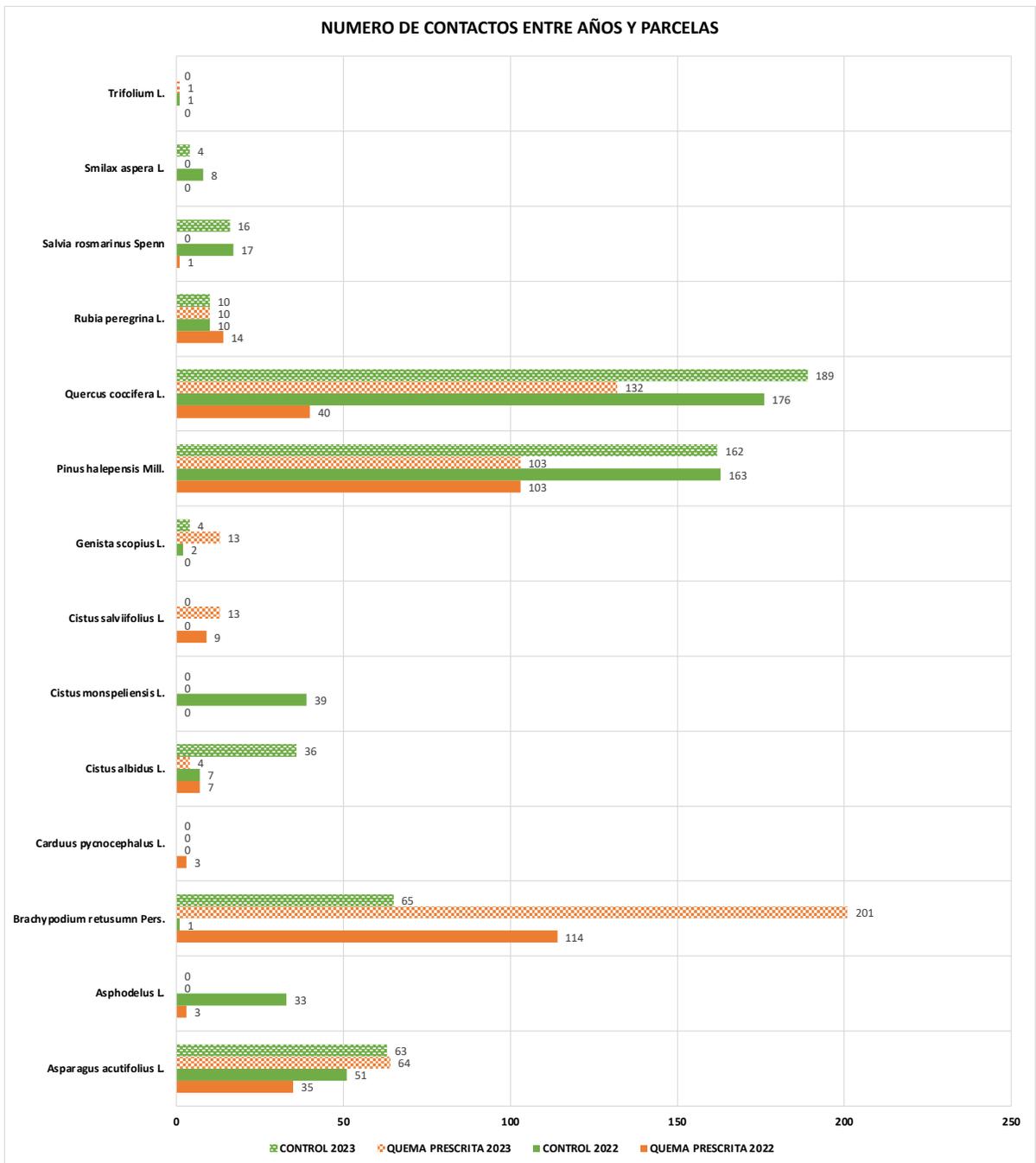


Figura 33. Comparación de la vegetación presente en las parcelas dos meses después de la quema prescrita (2022) y un año después (2023).

Fuente: Elaboración propia (2023).

Número de muestras de la especie vegetal en la parcela sometida a quema prescrita dos meses después de realizar la quema prescrita (barras anaranjadas); número de muestras de la especie vegetal en la parcela sometida a quema prescrita un año después de realizar la quema prescrita (barras con trama anaranjada); número de muestras de la especie vegetal en la parcela control dos meses después de realizar la quema prescrita (barras verdes); número de muestras de la especie vegetal en la parcela control un año después de realizar la quema prescrita (barras con trama verde).

7. CONCLUSIONES

Este estudio tiene como objetivo evaluar a corto plazo algunas propiedades del suelo tras la realización de una quema prescrita en un bosque mediterráneo plantado con *Pinus halepensis* Mill. como parte de una estrategia de gestión forestal. El estudio ha revelado que, al igual que los incendios forestales, las quemas prescritas influyen en los parámetros del suelo. Sin embargo, es importante destacar que estos impactos parecen ser menos significativos y perjudiciales para la calidad del suelo en comparación con los efectos devastadores de un incendio forestal.

Se pudo observar que la mayoría de los parámetros químicos experimentaron una leve disminución un año después de la quema prescrita. Esta disminución se atribuyó a la lixiviación, así como al consumo de nutrientes que las plantas demandan para rebrotar y crecer después de la quema. Sin embargo, a pesar de estos procesos, se puede afirmar que los suelos en estos entornos no lograron una completa recuperación en su estado nutricional en este corto período de tiempo.

En lo que respecta a la respiración del suelo, en relación con los parámetros ambientales, se pudo concluir que está más condicionada por la estacionalidad que por la ejecución de la quema prescrita. La respiración del suelo está asociada a la actividad de los organismos presentes en el suelo y se observa que es más alta durante los periodos del año en los que tanto la temperatura como la humedad del suelo alcanza valores intermedios.

A pesar de haber llevado a cabo un inventario vegetal en dos momentos distintos después de la quema prescrita, resulta esencial continuar monitoreando el crecimiento y desarrollo de la vegetación para obtener una comprensión más completa de la recolonización de estas especies a lo largo del tiempo.

A corto plazo, las ventajas de las quemas prescritas son evidentes en términos de la reducción del combustible, ya que disminuyen tanto la continuidad vertical como horizontal de este material inflamable. Esto resulta en una disminución de la intensidad del fuego en caso de un incendio forestal. Sin embargo, hasta la fecha, existen limitados estudios que aborden el impacto a largo plazo de las quemas prescritas, lo que ha dejado lagunas significativas en nuestro entendimiento de sus efectos en diversos entornos.

Por lo tanto, resulta imperativo continuar investigando en este campo con el propósito de obtener respuestas más precisas sobre la eficacia de este método de gestión forestal para la prevención de incendios de gran magnitud. También es fundamental determinar la

frecuencia adecuada de estas intervenciones de quema prescrita para evitar la degradación del suelo. Estos esfuerzos de investigación son esenciales para tomar decisiones sobre la idoneidad de las quemas prescritas como herramienta de gestión forestal a largo plazo y su impacto en la sostenibilidad de los ecosistemas.

8. AGRADECIMIENTOS

A mi mamá, mi papá y mis hermanos, que han confiado en mí más que yo misma, me han apoyado incondicionalmente y siempre me sostienen de su mano.

A mi tutor de TFM Xavi Úbeda, que a ciegas desde un principio creyó en mí, me brindó su confianza, me guió y me acogió en su familia académica del grupo de investigación GRAM de la Facultad de Geografía e Historia de la Universidad de Barcelona, quienes no me dejaron sentir sola en el desarrollo de las actividades de campo y laboratorio; junto con Antonio Peñalver, que siempre con su total disposición me enseñó a realizar las pruebas de laboratorio y la estadística de los datos, además con su paciencia siempre estuvo atento a resolver todas mis dudas.

A la Universidad de Barcelona y su equipo de docentes del Máster de Planificación Territorial y Gestión Ambiental por su entrega académica en cada curso recibido, de cada uno de ellos recibí invaluable conocimiento.

A mis amigos en Colombia y los nuevos que la multiculturalidad de Barcelona me ha dado siendo ellos el empujón emocional en momentos reflexivos a miles de kilómetros de casa.

Por último, al programa de becas de AECID que fue el que me permitió estar aquí y poder cursar mis estudios de máster.



9. BIBLIOGRAFIA

- Afif Khouri, E., & Oliveira Prendes, J. A. (2006). *Efectos del fuego prescrito sobre matorral en las propiedades del suelo*.
- Albalasmeh, A. A., Berli, M., Shafer, D. S., & Ghezzehei, T. A. (2013). Degradation of moist soil aggregates by rapid temperature rise under low intensity fire. *Plant and Soil*, 362(1–2), 335–344. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1408-z>
- Alcañiz, M., Outeiro, L., Francos, M., Farguell, J., & Úbeda, X. (2016). Long-term dynamics of soil chemical properties after a prescribed fire in a Mediterranean forest (Montgrí Massif, Catalonia, Spain). *Science of the Total Environment*, 572, 1329–1335. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.115>
- Alcañiz, M., Outeiro, L., Francos, M., & Úbeda, X. (2018). Effects of prescribed fires on soil properties: A review. *Science of the Total Environment*, 613–614, 944–957. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.144>
- Antos, J. A., Halpern, C. B., Miller, R. E., Cromack, K., & Halaj, M. G. (2003). *Temporal and Spatial Changes in Soil Carbon and Nitrogen After Clearcutting and Burning of an Old-Growth Douglas-Fir Forest*.
- Àrea Metropolitana de Barcelona. (2023). *Pi blanc (el Pi Dret)*. <https://www.amb.cat/es/web/territori/espai-public/parcs/biodiversitat/vegetacio-catalogada/detall/-/puntinteres/pi-blanc--el-pi-dret-/6366046/11656>
- Arocena, J. M., & Opio, C. (2003). Prescribed fire-induced changes in properties of sub-boreal forest soils. *Geoderma*, 113(1–2), 1–16. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(02\)00312-9](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(02)00312-9)
- Bennett, L. T., Aponte, C., Baker, T. G., & Tolhurst, K. G. (2014). Evaluating long-term effects of prescribed fire regimes on carbon stocks in a temperate eucalypt forest. *Forest Ecology and Management*, 328, 219–228. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.05.028>
- Certini, G. (2005). Effects of fire on properties of forest soils: A review. En *Oecologia* (Vol. 143, Número 1, pp. 1–10). <https://doi.org/10.1007/s00442-004-1788-8>
- Costa Alcubierre, P., Castellnou, M., Larrañaga, A., Miralles, M., & Kraus, D. (2011, marzo). *La prevención de los grandes incendios forestales adaptada al incendio tipo*. 1–89.
- Curiel Yuste, J., Janssens, I. A., Carrara, A., & Ceulemans, R. (2004). Annual Q10 of soil respiration reflects plant phenological patterns as well as temperature sensitivity. *Global Change Biology*, 10(2), 161–169. <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2003.00727.x>
- DeBano, L. F. (1981). *United States Department of Agriculture Forest Service Pacific Southwest Forest and Ranae Experiment station General Technical Report PSW-46*

- Water Repellent Soils: a state-of-the-art.*
<https://doi.org/https://doi.org/10.2737/PSW-GTR-46>
- Eugenio, M., Lloret, F., & Alcañiz, J. M. (2006). Regional patterns of fire recurrence effects on calcareous soils of Mediterranean *Pinus halepensis* communities. *Forest Ecology and Management*, 221(1–3), 313–318. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.10.011>
- Fernandes, P. M., Davies, G. M., Ascoli, D., Fernández, C., Moreira, F., Rigolot, E., Stoof, C. R., Vega, J. A., & Molina, D. (2013). Prescribed burning in southern Europe: Developing fire management in a dynamic landscape. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 11(SUPPL. 1). <https://doi.org/10.1890/120298>
- Fernandes, P. M., & Rigolot, E. (2007). The fire ecology and management of maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.). En *Forest Ecology and Management* (Vol. 241, Números 1–3, pp. 1–13). <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.01.010>
- Gee, G. W., & Bauder, J. W. (1986). Particle-size analysis. In A. Klute (Ed.), *Methods of soil analysis. Part 1: Physical and Mineralogical Methods* (second ed, pp. 383–410). American Society of Agronomy and Soil Science Society of America.
<https://doi.org/10.1038/159717a0>
- Generalitat de Catalunya. (2023). *Parque Natural del Montgrí, las Islas Medas y el Baix Ter.*
<https://parcsnaturals.gencat.cat/ca/xarxa-de-parcs/illes-medes/inici/>
- Gonçalves Vaz, P. J. (2013). *Long-term effects of Portuguese forest fires on morphology and aquatic habitat structure of lotic ecosystems* [University of Évora].
<https://dspace.uevora.pt/rdpc/bitstream/10174/10811/1/Thesis.pdf>
- González, J. R., Kolehmainen, O., & Pukkala, T. (2007). Using expert knowledge to model forest stand vulnerability to fire. *Computers and Electronics in Agriculture*, 55(2), 107–114. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2006.12.005>
- Granged, A. J. P., Zavala, L. M., Jordán, A., & Bárcenas-Moreno, G. (2011). Post-fire evolution of soil properties and vegetation cover in a Mediterranean heathland after experimental burning: A 3-year study. *Geoderma*, 164(1–2), 85–94.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.05.017>
- Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya. (2022a). *Classes de capacitat agrològica dels sòls.* www.icgc.cat
- Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya. (2022b). *Guia metodològica per a la redacció dels projectes del cartografia de sòls escala 1:25.000 (v. 2022).*
- Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya. (2022c). *Mapa de Sòls de Catalunya Llegendes del visor Geoindex - Sòls 1:250.000.* www.icgc.cat
- Keeley, J. E. (2009). Fire intensity, fire severity and burn severity: A brief review and suggested usage. *International Journal of Wildland Fire*, 18(1), 116–126.
<https://doi.org/10.1071/WF07049>

- Köppen, W., & Geiger, R. (1936). *Das geographische System der Klimate (Handbuch der Klimatologie)* (1a ed.). Gebrüder Borntraeger. http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/pdf/Koppen_1936.pdf
- Knudsen, D., Peterson, G. A., & Pratt, P. F. (1986). *Lithium, Sodium, and Potassium* (Page A., Ed.; pp. 225–246). <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c13>
- Low, A. J. (1954). THE STUDY OF SOIL STRUCTURE IN THE FIELD AND THE LABORATORY. *Journal of Soil Science*, 5(1), 57–74. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1954.tb02176.x>
- Meteoblue. (2023). *Datos climáticos y meteorológicos históricos simulados para Torroella de Montgrí*. Meteoblue. https://www.meteoblue.com/es/tiempo/historyclimate/climatemodelled/torroella-de-montgr%C3%AD_esp%C3%B1a_3107700
- Natural Resources Institute Finland. (2023). *HoliSoils*. <https://holisoils.eu/>
- Nebot Hernández, E. (2018). Pla de Crema Prescrita de Gestió de Combustible. En *GRAF Bomberos de Catalunya*.
- Outeiro, L., Asperó, F., & Úbeda, X. (2008). Geostatistical methods to study spatial variability of soil cations after a prescribed fire and rainfall. *Catena*, 74(3), 310–320. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.03.019>
- Papers del Montgrí. (1986). *Flora y fauna del macizo de Montgrí*. 6, 33–40. <https://raco.cat/index.php/PapersMontgri/article/view/110302/137839>
- Pereira, P., Úbeda, X., Martin, D., Mataix-Solera, J., Cerdà, A., & Burguet, M. (2014). Wildfire effects on extractable elements in ash from a *Pinus pinaster* forest in Portugal. *Hydrological Processes*, 28(11), 3681–3690. <https://doi.org/10.1002/hyp.9907>
- Pierson, F. B., Robichaud, P. R., Moffet, C. A., Spaeth, K. E., Williams, C. J., Hardegree, S. P., & Clark, P. E. (2008). Soil water repellency and infiltration in coarse-textured soils of burned and unburned sagebrush ecosystems. *Catena*, 74(2), 98–108. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.03.011>
- Piqué, M., Valor, T., Castellnou, M., Pagés, J., Larrañaga, A., Miralles, M., & Cervera, T. (2011). *Integració del risc de grans incendis forestals (GIF) en la gestió forestal*.
- Plaza Álvarez, P. A. (2022). *Prescribed underburning effects on soil hydrology and microbiological soil properties across different Mediterranean pine ecosystems* [Universidad de Castilla - la Mancha]. <file:///Users/mayrafigue/Downloads/TESIS%20Plaza%20Alvarez.pdf>
- Plaza-Álvarez, P. A., Lucas-Borja, M. E., Sagra, J., Moya, D., Alfaro-Sánchez, R., González-Romero, J., & De las Heras, J. (2018). Changes in soil water repellency after prescribed burnings in three different Mediterranean forest ecosystems. *Science of*

- the Total Environment*, 644, 247–255.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.364>
- Plaza-Álvarez, P. A., Lucas-Borja, M. E., Sagra, J., Moya, D., Fontúrbel, T., & de las Heras, J. (2017). Soil respiration changes after prescribed fires in Spanish black pine (*Pinus nigra* Arn. ssp. *salzmannii*) monospecific and mixed forest stands. *Forests*, 8(7).
<https://doi.org/10.3390/f8070248>
- Polo Alberti, L., & Masip Salvi, R. (1987). Aproximación al conocimiento de la vegetación del macizo de Montgrí (Ampurdán, NE de la península ibérica). *Ecología*, 1, 121–132.
https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/Biblioteca/Revistas/pdf_REPN%2FREPN_1987_121-132.pdf
- Ramos Vásquez, E., & Dávila, D. Z. (2008). Efecto de la Humedad, Temperatura y pH del Suelo en la Actividad Microbiana a Nivel de Laboratorio. *Ecología Aplicada*, 7(1).
- Soil Survey Staff. (2014). *Claves para la Taxonomía de Suelos* (12th ed).
<https://www.nrcs.usda.gov/resources/guides-and-instructions/keys-to-soil-taxonomy>
- Triad Inc. (2001). *Special K. The Compost*. 1–2.
- Úbeda, X. (2021). El foc com a element estructural del paisatge i el fenomen dels grans incendis forestals. *Institut d'Estudis Catalans. Sociedad Catalana de Geografía*, 283–293.
- Úbeda, X., & Francos, M. (2018). Incendios forestales. Un fenómeno global. *Revista Bibliográfica de Geografía y Ciencias Sociales Universitat de Barcelona*, 23.
- Úbeda, X., Lorca, M., Outeiro, L. R., Bernia, S., & Castellnou, M. (2005). Effects of prescribed fire on soil quality in Mediterranean grassland (Prades Mountains, north-east Spain). *International Journal of Wildland Fire*, 14(4), 379–384.
<https://doi.org/10.1071/WF05040>
- Úbeda Xavier, Mataix-Solera Jorge, Francos Marcos, & Farguell Joaquim. (2021). Grandes incendios forestales en España y alteraciones de su régimen en las últimas décadas. *Geografía, Riscos e Proteção Civil*, 2, 141–161. https://doi.org/10.34037/978-989-9053-06-9_1.2_11
- Vélez Muñoz, R. (2000). *La defensa contra incendios forestales. Fundamentos y experiencias*.
- Wessel, A. T. (1988). On using the effective contact angle and the water drop penetration time for classification of water repellency in dune soils. *Earth Surface Processes and Landforms*, 13(6), 555–561. <https://doi.org/10.1002/esp.3290130609>
- Zak, J. C., Willig, M. R., Moorhead, D. L., & Wildman, H. G. (1994). Functional Diversity of Microbial Communities: A Quantitative Approach. En *Soil Bid. Eiockm* (Vol. 26, Número 9).