



UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE  
COMPOSTELA

DOBLE GRADO DE BIOLOGÍA Y QUÍMICA

TRABAJO DE FIN DE GRADO DE QUÍMICA

Aplicación de Tecnosol como enmienda  
para la recuperación de suelos quemados

Andrea Serantes Pérez

Julio 2022

**Juan Antelo Martínez**, investigador asociado del Departamento de Edafología y Química Agrícola y **Sarah Fiol López**, Catedrática del Departamento de Química Física de la Universidad de Santiago de Compostela

**INFORMAN:** Que el presente trabajo titulado “Aplicación de Tecnosol como enmienda para la recuperación de suelos quemados” ha sido realizado bajo nuestra dirección por Andrea Serantes Pérez en los laboratorios de CRETUS y del Departamento de Edafología y Química Agrícola.

Considerando que cumple los requisitos para ser considerado un Trabajo de Fin de Grado, **autorizamos** su presentación y para que así conste, expedimos el presente certificado.

Santiago de Compostela, 04 de julio de 2022



Fdo. Juan Antelo Martínez



Fdo. Sarah Fiol López

## ÍNDICE

1. RESUMEN.....	3
2. INTRODUCCIÓN .....	5
2.1. Situación actual de los incendios en España y el Norte de Portugal.....	5
2.2. Efectos de los incendios en el suelo.....	7
2.3. Enmiendas .....	9
2.3.1. Compost.....	9
2.3.2. Tecnosol.....	10
3. OBJETIVOS.....	12
4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	13
4.1. Reactivos, materiales y equipos.....	13
4.2. Métodos .....	14
4.2.1. Muestras de trabajo.....	14
4.2.2. Preparación de los suelos enmendados.....	15
4.2.3. Caracterización química de las muestras de trabajo.....	16
4.2.3.1. Determinación del pH en agua y en KCl .....	16
4.2.3.2. Determinación de carbono y nitrógeno total.....	16
4.2.3.3. Determinación de azufre total .....	17
4.2.3.4. Determinación de carbono oxidable .....	17
4.2.3.5. Determinación de la capacidad de intercambio catiónico efectivo (CICe).....	17
4.2.3.6 Determinación de fósforo total y fósforo asimilable (P-Olsen).....	18
4.2.3.7.Extracción de aluminio y hierro con oxalato amónico.....	19
4.2.3.8. Determinación de concentración total de metales.....	19
4.2.3.9. Extracción de hierro y aluminio en pirofosfato.....	20
4.2.4. Ensayo de germinación .....	20
5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	22
5.1. Medida de pH en agua y KCl.....	22
5.2. Contenido en carbono total, carbono oxidable y nitrógeno.....	24
5.3 Concentración total de aluminio y hierro.....	26
5.4 Concentración de aluminio y hierro extraídos con oxalato.....	26

5.5 Concentración de aluminio y hierro extraídos con pirofosfato.....	27
5.6. Concentración de elementos minoritarios y traza .....	28
5.7 Concentración de fósforo total y fósforo asimilable.....	29
5.8 Capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICe) .....	30
5.9 Ensayo de germinación.....	32
5.9.1. Crecimiento de raíz y tallo.....	32
5.9.2 Análisis de índices.....	33
5.9.3. Correlación entre los índices y otros parámetros.....	35
6. CONCLUSIONES .....	37
7. BIBLIOGRAFÍA .....	41
ANEXO I .....	48

## 1. Resumen

Español:

En este trabajo se analizaron los efectos que tiene una quema a 800°C sobre las propiedades físico-químicas del suelo. Posteriormente, se emplearon dos enmiendas para estudiar la posibilidad de que su aplicación contribuya a la mejora de las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo quemado, favoreciendo además su productividad vegetal. Las enmiendas utilizadas son: compost, obtenido a partir de la descomposición aeróbica de materia orgánica de origen animal, y tecnosol, un suelo preparado artificialmente a partir de residuos, cuya formación y propiedades están afectados por la actividad humana. Para el análisis químico de las muestras de suelo quemadas y enmendadas se llevaron a cabo métodos como medición de pH, determinación de carbono total y oxidable, determinación de nitrógeno, determinación de contenido total de elementos, extracción selectiva de hierro y aluminio, determinación de fósforo total y fósforo asimilable y capacidad de intercambio catiónico efectiva. Para estudiar la productividad vegetal, se prepararon disoluciones de equilibrio a partir del suelo quemado y enmendado, y se utilizaron en ensayos de germinación para evaluar los efectos de las enmiendas sobre semillas de *Lolium perenne*.

Galego:

Neste traballo analizáronse os efectos que ten una queima a 800°C sobre as propiedades físico-químicas do solo. Posteriormente empregáronse dúas emendas para estudar a posibilidade de que a súa aplicación contribúa á mellora das propiedades químicas, físicas e biolóxicas do solo queimado, favorecendo ademáis a súa produtividade vexetal. As emendas utilizadas son: compost, obtido a partir da descomposición aeróbica da materia orgánica de orixe animal, e tecnosol, un solo preparado artificialmente a partir de residuos, cuxa formación e propiedades están afectadas pola actividade humana. Para a análise química das mostras de solo queimado e emendas leváronse a cabo métodos como medición de pH, determinación de carbono total e oxidable, determinación de nitróxeno, determinación de contido total de elementos, extracción selectiva de ferro e aluminio, determinación de fósforo total e fósforo asimilable e capacidade de intercambio catiónico efectiva. Para estudar a produtividade vexetal preparáronse disolucións de equilibrio a partir do solo queimado e emendado, e

se utilizaron en ensaios de xerminación para avaliar os efectos das emendas sobre sementes de *Lolium perenne*.

English:

In this essay the effects that a 800°C burning has on the physical and chemical properties of soil were analyzed. Afterwards, two amendments were added to study the possibility that their application contributes to an improvement on the burnt soil's chemical, physical and biological properties, as well as improving its vegetal productivity. The amendments that were applied are: compost, which was obtained from the aerobic degradation of animal based organic matter, and technosol, which is an artificial soil made from residues, whose formation and properties are affected by human activity. Several methods were used for the chemical analysis of burnt and amended soil samples, such as pH measurement, both total and oxidisable carbon determination, nitrogen determination, total element concentration determination, selective iron and aluminium extraction, total and assimilable phosphorus and effective cationic exchange capacity. To study vegetal productivity, equilibrium solutions were prepared from burnt and amended soil, and they were used on germination studies to evaluate the amendment's effects on *Lolium perenne* seeds.

## 2. Introducción

### 2.1. Situación actual de los incendios en España y el Norte de Portugal

El fuego es un elemento natural con el que convive el paisaje. Mucha de la flora autóctona cuenta con estrategias diversas tras un incendio, algunas especies incluso viéndose beneficiadas por estos. Hoy en día, sin embargo, más del 80% de los incendios son de origen antrópico, y de ellos casi el 54% son intencionados, y un 23% son debidos a accidentes o negligencias. Esto altera el régimen natural de los incendios, por lo que estos dejan de ser sostenibles para el ecosistema. (Greenpeace, 2018).

A lo largo de las últimas décadas se ha visto un gran incremento de los impactos de los incendios en todo el mundo. Estos impactos no son solo ecológicos, también provocan grandes secuelas sociales y económicas, ya que en ocasiones dejan víctimas mortales y daños materiales. Este aumento tanto del número de incendios como de su severidad son una clara consecuencia de la emergente crisis climática a la que nos enfrentamos. A pesar de que en la Península Ibérica los incendios tienen una ocurrencia cíclica y recurrente, las predicciones en base al cambio climático vaticinan una situación de mayor complejidad, con un aumento en la probabilidad de incendios de alta intensidad independientemente de los recursos asignados para su extinción. (Hernández, 2021).

El cambio climático no solo provoca una mayor intensidad y número de incendios, también hace que la temporada de incendios empiece antes y acabe más tarde. De hecho, este año 2022, aún no entrado el verano y la supuesta temporada de incendios, en la Península Ibérica ya eran 4447 los incendios ocurridos, y concretamente los grandes incendios forestales ya son el doble de la media. (Greenpeace, 2022). Esto se debe a que con el cambio climático aumentan las temperaturas y olas de calor, y con ello los periodos de sequía prolongados, provocando la sequedad del suelo. Esto viene ligado a la desecación de la vegetación por pérdida de agua por evapotranspiración, con lo que esta se convierte en un combustible para el fuego. (Greenpeace, 2018).

El año 2017 fue un año especialmente marcado por la presencia de los incendios forestales en la Península Ibérica, ya que en España el número se incrementó en casi un 200% con respecto a la media de la década de 2007 a 2017, y en Portugal hubo un incremento incluso mayor, del 400%. Las zonas más afectadas fueron el norte y centro de Portugal, Galicia, Asturias, Zamora, León y Cantabria, es decir, la zona noroeste de la Península Ibérica. (Hernández, 2018). El caso de Galicia es especialmente relevante, ya

que a pesar de que solo representa el 6% de la superficie nacional, entre los años 1991 y 2010 la comunidad registró aproximadamente el 46% de los incendios forestales en España, y un 21% de la superficie quemada. Esta situación es en parte debida a la despoblación de las zonas rurales, lo que provoca que gran parte de los bosques queden abandonados, permitiendo una mayor facilidad para la expansión de los incendios. (Barreal et al, 2003).

En Galicia la mayoría de los incendios ocurren durante el verano, aunque existe un repunte entre los meses de febrero y abril, dado que en estos momentos es habitual la limpieza de terrenos con la consecuente quema de rastrojos. La localización de los incendios también es constante, siendo la provincia de Ourense la más afectada, donde se quema principalmente matorral. (Braña, 2015).

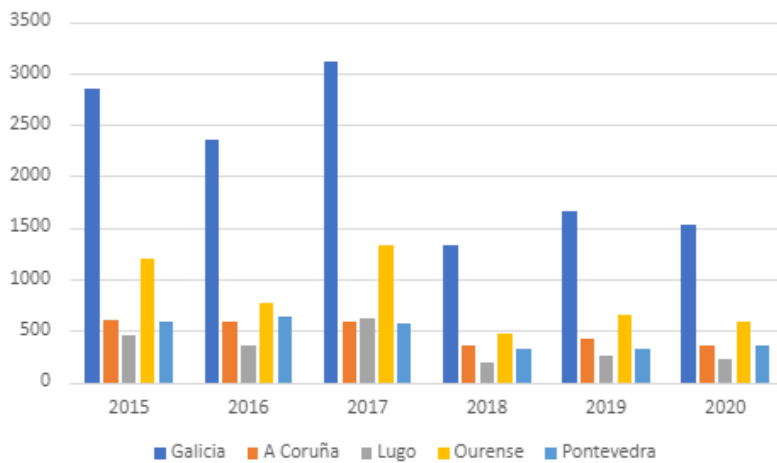


Figura 1: Número de incendios en Galicia y sus distintas provincias entre los años 2015 y 2020 (datos extraídos del IGE)

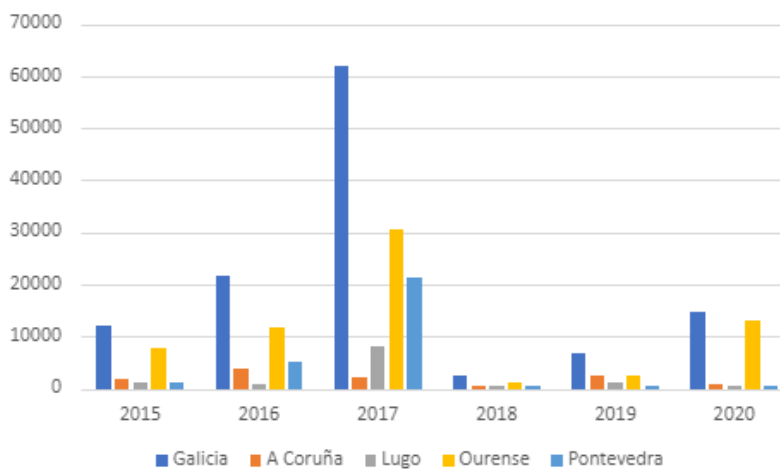


Figura 2: Hectáreas quemadas en Galicia y sus distintas provincias entre los años 2015 y 2020 (datos extraídos del IGE)

En la [Figura 1](#) se muestra el número de incendios en Galicia entre los años 2015 y 2020. Aquí se puede comprobar que en los años más recientes el 2017 fue el más afectado por los incendios, y permite confirmar que siempre se sigue aproximadamente la misma tendencia: la provincia de Ourense es la más afectada, seguida por A Coruña, Pontevedra y finalmente, Lugo. En la [Figura 2](#) queda más patente la gran presencia de incendios

que marcó el año 2017 en la comunidad gallega. Además, también se observa que es

Ourense con una gran diferencia la comunidad que se vio más afectada en cuanto a las hectáreas quemadas por los incendios.

## 2.2.Efectos de los incendios en el suelo

El impacto que un incendio tiene sobre el suelo va a depender de varios factores. De hecho, un incendio de baja intensidad puede llegar a ser beneficioso para el ecosistema, puesto que a veces esto puede retirar hojarasca y liberar materia orgánica que de otras formas no sería accesible para las plantas. La severidad del fuego es un producto de su intensidad y su duración, aunque también afectará la situación meteorológica posterior al incendio. (Certini, 2005; Francos, 2019).

Los incendios pueden causar en el suelo alteraciones físicas, químicas y biológicas (Mataix-Solera, 2009), aunque sus efectos no suelen sobrepasar los 2 cm de profundidad. (Francos, 2019).

El cambio más apreciable a simple vista tras un incendio es la alteración del color del suelo, que suele volverse de un tono rojizo debido a la pérdida de materia orgánica y alteración de los óxidos de hierro. También puede aparecer un tono negro que proviene de la materia orgánica carbonizada y la formación de cenizas. (Schmidt et al, 2001).

Los componentes minerales del suelo, así como su textura, no suelen experimentar muchos cambios salvo en aquellos casos en los que sean sometidos a temperaturas extremadamente elevadas. Lo primero que se ve afectado es la fracción de arcilla, que ya empieza a sufrir cambios en torno a los 400°C, y ocurre su destrucción completa a unos 700-800°C. Por otro lado, las arenas y limos tienen unas temperaturas de fusión mucho más elevadas, en torno a 1400°C. (Lide, 2001; Pascual-Granjed, 2011).

Es importante mencionar la estructura del suelo como una propiedad clave, ya que puede mejorar las relaciones y productividad del agua en suelos agrícolas y forestales. (DeBano et al, 2005). Esta estructura puede verse estabilizada en fuegos de severidad baja por la formación de una capa de cenizas hidrófoba con la destrucción de las arcillas. Sin embargo, tras la destrucción de materia orgánica puede disminuir drásticamente, no solo por su capacidad de cementación, sino porque con esto se alteran los microecosistemas de los organismos del suelo, disminuyendo tanto su biomasa como su diversidad. Con la falta de estos organismos el suelo pierde la capacidad de descomponer materia orgánica

y pierde así parte de su estructura, con lo que queda más expuesto a los procesos de erosión y escorrentía. (Badía et al, 2003; Bot et al, 2005; Pascual-Granjed, 2011).

Otra de las propiedades afectadas es la respuesta del suelo al agua, aunque dependerá de las condiciones previas del suelo, ya que este de forma natural ya tiene algunos componentes hidrófobos. Así, se ha concluido que el fuego puede inducir una mayor impermeabilidad del suelo (DeBano, 1974; Savage, 1974). Tras el incendio se degrada parte de la materia orgánica y se crea una capa de ceniza que repele el agua, reduce la impermeabilidad y aumenta la escorrentía al quedar la superficie del suelo descubierta (Doerr et al, 2000; Francos, 2019; Imeson et al, 1992). Autores como DeBano et al (1966) o Robichaud y Hungerford (2000) han determinado que temperaturas superiores a 350°C son suficientes para provocar una mayor repelencia al agua.

La materia orgánica es uno de los componentes del suelo más afectados por los incendios, al estar acumulada en el horizonte más superficial. Los primeros cambios irreversibles para los organismos vivos comienzan a ocurrir a temperaturas muy sencillas de alcanzar en el contexto de un incendio, alrededor de unos 50-60°C, aunque la degradación total de la materia orgánica ocurre a unos 400-450°C (Ibáñez et al, 1983). En incendios de poca intensidad puede llegar a aumentar la cantidad de materia orgánica debido a una menor combustión y a una contribución del material vegetal proveniente de las partes aéreas de las plantas. En incendios más severos la materia orgánica del suelo tiende a disminuir a causa de su combustión, lo que hace que se transforme en dióxido de carbono, que se emite a la atmósfera. A pesar de esto, la materia orgánica puede aumentar en los primeros años por la incorporación de tejidos muertos (al estar estos protegidos de su descomposición bioquímica), la transformación de materia orgánica fresca a formas más recalcitrantes y la incorporación de especies fijadoras de nitrógeno. Otra explicación de este primer aumento artificial de materia orgánica es la disminución de la tasa de mineralización (Certini, 2005; Francos, 2019). La materia orgánica es la base del suelo, por lo que su pérdida puede ocasionar alteraciones importantes en la capacidad de este para cumplir sus funciones de retención de nutrientes, mantener los ciclos biogeoquímicos o la retención de agua (Neary et al, 1999).

En cuanto al pH, este tiende a volverse más alcalino de forma general, si el incendio llega a valores de aproximadamente 450-500°C. Esto ocurre debido a que con la quema de combustibles se produce una liberación de bases y cationes alcalinos. Por otro lado, a elevadas temperaturas se degradan las arcillas, con lo que se liberan grupos hidroxilo y

se forman óxidos minerales, que también contribuyen a alcalinizar el suelo (Kutiel et al, 1992; Ulery et al, 1995). Estos cambios en el pH durarán más o menos tiempo dependiendo de las propiedades del suelo original, y también dependerá de la cantidad y composición de las cenizas, así como de la humedad que presente el suelo. (Gil et al, 2010).

También han sido muy estudiadas las repercusiones del fuego sobre los nutrientes, especialmente en el caso del nitrógeno y fósforo. En el caso del nitrógeno, este normalmente desciende en un principio por volatilización, aunque parte del nitrógeno cambia de forma, ya que fuegos moderados o intensos convierten el nitrógeno orgánico en inorgánico (Certini, 2005; Knicker et al, 1966). Para el fósforo el impacto no es el mismo, ya que las pérdidas de fósforo por volatilización o lixiviación son pequeñas. Tras un incendio, el fósforo orgánico se convierte en ortofosfato, forma mineral de fósforo y nutriente esencial para las plantas. Dado que la disponibilidad de este nutriente es máxima a un pH de aproximadamente 6,5 y el fuego tiende a alcalinizar el suelo, en principio podría decirse que el incendio aumenta la biodisponibilidad del fósforo, aunque disminuye rápidamente, dado que tiende a precipitar como fosfato de calcio (Certini, 2005).

### 2.3.Enmiendas

Las enmiendas son utilizadas bien para recuperar la calidad de suelos degradados por incendios, actividades mineras u otras situaciones, o bien para mejorar la productividad de un suelo no necesariamente degradado. Estas enmiendas suelen ser generalmente de origen orgánico, principalmente estiércol o residuos de silvicultura, aunque también es común utilizar enmiendas inorgánicas como la cal o caliza. Se ha concluido que la aplicación de estas enmiendas es una herramienta útil y económica para la restauración de suelos degradados. (Islas-Valdez et al, 2015; Pérez-Esteban et al, 2014).

#### 2.3.1. Compost

El compost es materia orgánica estable descompuesta aeróbicamente. Es un material biológicamente activo que suele ser de origen orgánico y tiene textura variada. El compost se forma a partir de una descomposición controlada con una combinación de microorganismos aeróbicos que rompen y transforman la materia orgánica en sustancias complejas, que darán al compost una alta calidad. Este proceso es conocido como compostaje (Paulin et al, 2008).

Aunque el uso más común del compost es su uso como fertilizante, en muchas ocasiones se utiliza como enmienda para mejorar la situación de suelos degradados por diversos motivos. El compost es utilizado para reducir la erosión del suelo y suprimir patógenos que pueda haber en este. Además, suelos con enmiendas orgánicas aplicadas tienen un contenido superior de carbono orgánico, macronutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio, y microbiota (Abbas et al, 2020).

El compost además mejora la estructura del suelo, estabiliza el pH e incrementa la capacidad de intercambio catiónico. Con todo esto, también incrementa la biodisponibilidad de los nutrientes en el suelo, favoreciendo el crecimiento de las plantas de forma correcta.

Una aplicación excesiva de compost puede ser problemática. Hay que tener especial cuidado con el compost proveniente de residuos sólidos urbanos, dado que puede tener un contenido elevado de cloruro y sodio, y el exceso de salinidad puede influir negativamente en la capacidad de germinación de las semillas y el crecimiento de las plantas, así como empeorar la estructura del suelo.

### 2.3.2. Tecnosol

Los tecnosoles son unos suelos cuya formación y propiedades dependen de la actividad humana, concretamente aquellos que presentan más de un 20% de artefactos. Es posible diseñar tecnosoles a partir de artefactos o residuos no tóxicos, normalmente derivados de material de minas, lodos estabilizados, o residuos de silvicultura. Estos suelos pueden prepararse con unas propiedades físico-químicas y contenido de nutrientes concreto, lo que hace posible que sean utilizados para dar a las plantas unas condiciones adecuadas para su crecimiento o mejorar la calidad del suelo, en el contexto de remediación de suelos. Así, dadas las condiciones conocidas de un suelo degradado, se puede crear un tecnosol con las características necesarias para cada zona concreta, atendiendo sus necesidades específicas. Concretamente en el caso de un incendio habrá que mejorar la estructura del suelo, incrementar su contenido de materia orgánica y nutrientes y evitar la disponibilidad de elementos tóxicos (Arán et al, 2018; Macías et al, 2007).

Los Tecnosoles diseñados “a la carta” cuentan por un lado con residuos fermentables, encargados de aportar materia orgánica y determinados nutrientes, y residuos inorgánicos, cuya función es estabilizar compuestos orgánicos, dando las

condiciones necesarias para que el suelo esté en equilibrio. Además, los tecnosoles deben suplir las funciones que tiene el suelo como elemento ecológico: deben producir alimentos y fibras, funcionar como reserva y movilizador de agua y otras sustancias, y servir de soporte para diversas actividades biológicas (Macías et al, 2012).

El uso de los tecnosoles tiene la ventaja de que parte de materiales baratos, que terminarían siendo tratados como residuos, pudiendo producir gases de efecto invernadero, . Con esto, el uso de tecnosoles permite recuperar carbono y nitrógeno de los residuos, dándoles a estos un nuevo valor, recuperando nutrientes esenciales o micronutrientes, como fósforo, potasio, magnesio, calcio y azufre, que de otra forma se perderían. Su utilización posibilita la corrección de toxicidad y acidificación de suelo y aguas, recuperando ecosistemas tanto acuáticos como terrestres. Además, el uso de tecnosoles diseñados para la remediación sigue una perspectiva de economía circular, ya que son preparados a partir de residuos que de otra forma tendrían que ser tratados o desechados, mientras que con este uso se da un valor añadido a los residuos (Macías et al, 2012).

### 3. Objetivos

El objetivo de este trabajo es comprobar cuáles son los efectos que una quema controlada de alta intensidad, a una temperatura de 800°C, tiene sobre las propiedades físico-químicas del suelo. Por otra parte, se estudia el efecto que tiene utilizar enmiendas para restaurar las propiedades originales de dicho suelo. En este caso las enmiendas cuyos efectos se analizan son tecnosol y compost, las cuales serán añadidas al suelo en cantidades variables para evaluar también la cantidad necesaria para tener un efecto positivo. Se harán también ensayos de germinación con extractos acuosos preparados a partir de suelo enmendado, para comprobar qué efecto tienen dichas enmiendas en la productividad del suelo y el crecimiento de plantas.

#### 4. Materiales y métodos

##### 4.1. Reactivos, materiales y equipos

Tabla 1: Listado de reactivos, materiales y equipos utilizados para el trabajo

Reactivos	Materiales	Equipos
H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> 85% Scharlan	Botes de plástico de 50 y 80 ml	Agitador orbital
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 95% VWR chemicals	Bureta de 5 ml de vidrio esmerilado clase A	Analizador de azufre LECO SC-144
H <sub>2</sub> O destilada	Cápsulas de cerámica	Analizador de carbono y nitrógeno LECO CN828
NaHCO <sub>3</sub> Panreac	Embudos	Analizador de metales Perkin Elmer pinAAcle 500
Carbón activo	Espátula	Balanza de precisión COBOS
K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> VWR chemicals	Gradillas para tubos de ensayo	Cámara de crecimiento
Indicador (difenilamina 1% en H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	Matraces aforados	Centrífuga Orto Alresa Digtor
KCl Panreac	Matraces Erlenmeyer	Electrodo de pH Crison micro pH 2000
H <sub>2</sub> C <sub>2</sub> O <sub>4</sub> VWR chemicals	Papel de estaño	Espectrofotómetro Jasco V-630
HNO <sub>3</sub> 65% VWR chemicals	Papel Parafilm	Estufa
HCl 37% VWR chemicals	Papel de filtro	Horno de digestión por microondas Milestone Ethos easy
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> C <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Scharlan	Patrón de azufre	Horno de Mufla
Na <sub>4</sub> P <sub>2</sub> O <sub>7</sub> · 10H <sub>2</sub> O Scharlan	Patrón de carbono y nitrógeno	Molino de bolas Retsch MM 400
NH <sub>4</sub> Cl Panreac	Patrones de fósforo	
	Pinzas	
	Pipetas automáticas y puntas	
	Placas Petri	
	Regla	
	Semillas de ryegrass (variedad de hierba)	
	Tarrinas de plástico	
	Trompa de vacío	
	Tubos de ensayo	
	Tubos Falcon	
	Vasos de precipitados	

## 4.2.Métodos

### 4.2.1. Muestras de trabajo

Las muestras utilizadas para este estudio fueron recogidas por los miembros del grupo AMBIOSOL por la realización del Proyecto Terramater en una parcela localizada en Sanfins, una parroquia portuguesa del ayuntamiento de Valença. Se trata de muestras de Umbrisoles Cámbicos Hiperdísticos, es decir, suelos que se encuentran a más de 50 cm de la superficie con una saturación con bases menores al 50% en todas las partes entre 20 y 100 cm desde la superficie del suelo. Dichas muestras fueron estudiadas en un TFG previo (López, 2021).

Antes de empezar el estudio, el suelo fue tamizado (luz de malla < 2mm) y pesado en cápsulas de cerámica, para posteriormente introducirlo en una mufla a 800°C durante una hora. El espesor de la muestra de suelo, menor a 1 cm, asegura su quema total. Se dejan enfriar las cápsulas con muestra hasta el día siguiente y se repite la operación hasta que se obtiene un total de aproximados de 415 g de muestra.

El compost utilizado proviene de la empresa Timac Agro, y se trata del producto comercial llamado Ecofem. Consiste en una enmienda orgánica de origen animal, activada con el complejo ATB, que activa los nutrientes del suelo, incrementa las formas asimilables para la planta, potencia el transporte efectivo de los nutrientes y bioestimula el sistema radicular. (TIMAC Agro, 2022).

La palabra tecnosol se utiliza para definir aquellos suelos cuya formación y propiedades están influenciadas por actividades humanas, Incluyen aquellos suelos derivados de residuos antrópicos, o residuos de escombreras, lodos, o cenizas, cuya formación y propiedades dependen de su origen técnico. Estos pueden formarse artificialmente. (Arán et al, 2018). Concretamente el tecnosol utilizado para este trabajo fue proporcionado por la empresa "Residuos de Valorización Ambiental S:L.", y fue utilizado en el marco del proyecto Terramater. (Terramater, 2019).

Los datos con las propiedades químicas de las enmiendas se recogen en la [Tabla 2](#), y fueron cedidos por las empresas distribuidoras de ambos: TIMAC Agro en el caso del compost y Residuos de Valorización Ambiental S.L. para el Tecnosol.

Tabla 2: Propiedades químicas del compost Ecofem y tecnosol Terramater

		<b>Tecnosol</b>	<b>Compost</b>
	<b>pH (H<sub>2</sub>O)</b>	8,12	9,76
	<b>pH (KCl)</b>	8,04	9,38
<b>Análisis total</b>	<b>C(%)</b>	7,26	20,10
	<b>N(%)</b>	0,52	1,17
	<b>C/N</b>	13,96	17,18
	<b>Coxidable(%)</b>	6,61	17,77
	<b>P(mg/kg)</b>	5359,98	11243,14
	<b>P Olsen (mg/kg)</b>	520,16	3452,17
	<b>Ca (mg/kg)</b>	47422,64	4789,00
	<b>Mg (mg/kg)</b>	10858,54	2990,80
	<b>Na (mg/kg)</b>	1938,98	11656,00
	<b>K (mg/kg)</b>	7836,66	28460,00
	<b>Al (mg/kg)</b>	26769,47	573,60
	<b>Fe (mg/kg)</b>	45058,70	1079,80
	<b>Cu (mg/kg)</b>	200,80	131,70
	<b>Mn (mg/kg)</b>	980,31	37,50
	<b>Ni (mg/kg)</b>	28,01	8,10
	<b>Zn (mg/kg)</b>	184,60	319,90
	<b>Extracción oxalato</b>	<b>Fe (mg/kg)</b>	5464,80
<b>Al (mg/kg)</b>		4283,50	984,00
<b>Extracción pirofosfato</b>	<b>Fe (mg/kg)</b>	2488,79	2642,00
	<b>Al (mg/kg)</b>	1101,60	297,00
	<b>CEC (cmol+/kg)</b>	49,05	149,78

#### 4.2.2. Preparación de suelos enmendados

Se preparan muestras de suelo a las que se añade una enmienda de 10% o 2% (en peso) de tecnosol, compost o una mezcla de ambos. Para ello, se pesan 45 o 49 g de muestra de suelo, respectivamente, y se añade la enmienda correspondiente hasta tener un total de 50 g. Estas muestras se incuban en tarrinas de plástico y se humedecen y homogeneizan cada 3 días durante un total de 15 días. Posteriormente se dejan secar y se cierran con papel parafilm, para así evitar que se humedezcan con el ambiente y sea posible realizar el resto de experimentos de forma óptima.

#### 4.2.3. Caracterización química de las muestras de trabajo

Durante este trabajo se caracterizaron muestras de suelo original, muestras de suelo quemado y muestras de suelo enmendadas con distintas concentraciones de tecnosol y compost.

##### 4.2.3.1. Determinación de pH en agua y KCl

Para determinar el pH de las muestras se utilizan dos medidas: una en agua, que es el valor utilizado comunmente para análisis de suelo e indica la concentración de protones en el suelo, y otra en una solución de [KCl](#), que permite estimar el grado de saturación del complejo de cambio debido al poder desplazante del potasio sobre los protones en la disolución. Este valor se relaciona también con la carga variable. Estas medidas se realizan con un [electrodo de pH \(Tabla 1\)](#).

En cuanto a la primera medida, se utiliza una proporción sólido:disolución de 1:2,5 (peso:volumen). Para ello, se pesan 5 gramos de muestra de suelo, previamente secado en estufa, en botes de plástico a los que se añaden 12,5 ml de agua MilliQ. Esta disolución se agita manualmente, se esperan 10 minutos y se mide el pH. Una vez medido, se añaden 0,0933 g de KCl a cada muestra, se agitan, se dejan reposar 2 h y se realiza de nuevo la medida para conocer el valor del pH en KCl.

##### 4.2.3.2. Determinación de carbono y nitrógeno total

Para la determinación de estos dos elementos se utiliza un [analizador elemental LECO CN828 \(Tabla 1\)](#). Mediante este equipo se quema la muestra sólida y posteriormente se miden los gases generados con un detector de infrarrojos y conductividad térmica, obteniéndose así la concentración de carbono y nitrógeno en el suelo. Se empieza calibrando el analizador con 0,1 g de un patrón con una cantidad conocida de carbono y nitrógeno. Para realizar las medidas de muestras problema se pesan 0,1 g de muestra seca previamente molida (con un molino de bolas), se envuelven con papel de estaño y se introducen en el cargador del aparato, que lleva las muestras automáticamente al horno. Los gases de combustión se enfrían y se analizan, y se obtiene el porcentaje de carbono y nitrógeno en la muestra.

#### 4.2.3.3.Determinación de azufre total

Para la determinación de azufre en las muestras se utiliza un [analizador LECO SC144 \(Tabla 1\)](#) que quema la muestra sólida y analiza los gases emitidos con un detector de infrarrojos. En primer lugar se calibra el analizador con 0,10, 0,15 y 0,18 g de un patrón con una cantidad conocida de azufre. Para realizar las medidas, se pesan 0,2 g de cada muestra previamente molida y secada en un recipiente de cerámica que se introduce en el aparato, que devuelve la concentración de azufre en la muestra.

#### 4.2.3.4.Determinación de carbono oxidable

Para el análisis del contenido de carbono oxidable se utilizará una oxidación húmeda conocida como el método de Sauerlandt. Se toman 0,2 g de muestra sólida, molida y secada, en un matraz Erlenmeyer de 100 ml junto con 10 ml de [ácido fosfórico](#). La mezcla se agita y se deja reposar media hora. Se añaden entonces 20 ml de [ácido sulfúrico](#) y 10 ml de [dicromato de potasio](#) 1,8 N. Estas disoluciones se introducen 2 h a 110 °C en una estufa y se dejan enfriar. Las disoluciones se llevan a un matraz aforado de 100 ml que se enrasa con agua destilada para su digestión. Posteriormente se toman 5 ml de muestra digerida a la que se añaden unos 45 ml de agua destilada, 6 gotas de ácido fosfórico y 6 gotas de difenilamina al 1% en ácido sulfúrico como indicador. Una vez hecho esto se realiza una valoración y se mide el dicromato no consumido.

#### 4.2.3.5.Determinación de la capacidad de intercambio catiónico efectiva

Para este método se utiliza [NH<sub>4</sub>Cl](#) como disolución desplazante, es decir, movilizará los cationes de cambio hacia la disolución permitiendo su determinación. El intercambio iónico consiste en la adsorción de cationes de la fase acuosa por parte de las partículas de suelo, que a la vez liberan otros iones en una cantidad equivalente, estableciendo un equilibrio. (Dorronsoro, 2022).

Se toman 2,5 g de muestra de suelo previamente molida y secada, a los que se añaden 12,5 ml de disolución desplazante NH<sub>4</sub>Cl y se dejan en contacto durante 24 h. Una vez pasado el tiempo, se filtra por gravedad a un matraz aforado de 100 ml, enrasando con la misma disolución de NH<sub>4</sub>Cl. Con este método se podrá determinar por espectrofotometría de absorción atómica la concentración de Ca, Mg y Al, y por emisión la de Na y K, utilizando un [analizador elemental \(Tabla 1\)](#). Para realizar las mediciones

de forma correcta se preparan 3 diluciones, 1:10, 9:10 y 1:20. En el caso del Ca, Mg y Al, se les añade lantano para evitar interferencias químicas. Esto se debe a que se utilizan rectas de calibrado diferentes para cada elemento, que tendrán rangos lineales específicos, por lo que puede ser necesario diluir las muestras si la concentración es superior. (Peech et al, 1947).

#### 4.2.3.6. Determinación de fósforo total y fósforo asimilable (P-Olsen)

El método Olsen consiste en el uso de una disolución de bicarbonato, que se aplica para disminuir la actividad de los iones calcio, aluminio y hierro, lo que aumenta la solubilidad de fósforo, extrayéndolo en forma de fosfato. El fosfato se encuentra enlazado con calcio, aluminio y hierro, y al añadir bicarbonato, el fosfato tendrá que competir por los lugares reactivos con los ahora presentes iones carbonato. Esto provoca la disminución de iones calcio por su precipitación como  $\text{CaCO}_3$ , y la concentración de hierro y aluminio por la formación de oxohidróxidos. El procedimiento también provoca un aumento de pH en la disolución, favoreciendo la desorción del P del suelo hacia la disolución. (Olsen et al, 1954; Sparks et al, 1996).

La detección de fósforo se hará por medio de un método colorimétrico: el método del ácido ascórbico. Este se basa en la reacción entre molibdato de amonio y tartrato de antimonio y potasio en medio ácido con ortofosfato para formar ácido fosfomolibdico, que al ser reducido por el ácido ascórbico forma un complejo azul de molibdeno. (Eaton et al, 2005). Se pesan 1,25 g de muestra previamente molida y secada a los que se añaden entre 0,2 y 0,5 g de carbón activo para evitar interferencias de materia orgánica, y 25 ml de [bicarbonato](#) 0,5 M pH 8,2 y se agita durante 30 minutos. Posteriormente se centrifuga durante 10 minutos y se filtra por gravedad, descartando las primeras gotas si salen turbias.

Para realizar el calibrado es necesario preparar varios patrones con concentraciones conocidas de fósforo, de los que se toman 5 ml y se les añaden 0,5 ml de ácido sulfúrico 5 N. Una vez añadido se agitan y se dejan reposar aproximadamente 12 h destapados para que se libere el  $\text{CO}_2$ . Para preparar las muestras se toman 5 ml de las mismas y se les añaden 0,5 ml de ácido sulfúrico de la misma forma que a las disoluciones patrón.

Para las medidas es necesario tener preparada una disolución reactiva, que consiste en una disolución de 20 ml molibdato amónico, tartrato de antimonio y potasio y ácido sulfúrico (solución A), a la que en el momento de realizar la colorimetría se le añadirán 1,76 g de ácido ascórbico y se enrasará a 200 ml con agua (solución B). Para realizar la colorimetría se añaden 5 ml de esta solución en cada tubo, que contendrá 5 ml de la disolución de muestra, y se deja 1 hora para que se desarrolle el color, para después medir en un [espectrofotómetro](#) UV-visible a 880 nm ([Tabla 1](#)). (Sparks et al, 1996).

Para la determinación del fósforo total se procede de la misma forma, pero dado que es ácido, es necesaria una neutralización previa con NaOH, quedando una dilución 1:5 en volumen.

#### 4.2.3.7.Extracción de aluminio y hierro con oxalato amónico

Con este método es posible determinar el contenido de aluminio y hierro no cristalinos y pobremente cristalinos presentes en el suelo. Se emplea para la extracción [oxalato amónico](#) 0,2 M tamponado con [ácido oxálico](#) a pH 3. El extractante elimina las formas inorgánicas no cristalinas de aluminio y hierro y sus complejos orgánicos. (Ross et al, 1993).

Se pesan 0,5 g de muestra tamizada (luz de malla < 2 mm) a los que se añaden 50 ml de la disolución de oxalato amónico 0,2M, se deja agitando durante 4 h en oscuridad y posteriormente se centrifuga a 2000 rpm durante al menos 10 minutos. Al terminar se filtra por gravedad y se determina la concentración de aluminio y hierro por absorción atómica, utilizando un [equipo de absorción atómica](#) ([Tabla 1](#)).

#### 4.2.3.8.Determinación de concentración total de metales

La mayoría de métodos de digestión están muy limitados por factores como presentar largos tiempos de disolución, la pérdida de elementos volátiles, contaminación de la muestra por exceso de reactivos, etc. Sin embargo, este método ofrece una medida rápida, segura y eficiente, sin riesgo de perder metales volátiles, por lo que es una técnica muy recomendada. (Shirdam et al, 2008).

Se pesan 0,5 g de muestra sólida, previamente molida y secada, a los que se añaden 9 ml de [HNO<sub>3</sub>](#) concentrado y 3 ml de [HCl](#) concentrado y se dejan actuando aproximadamente 12 h. Pasado este tiempo, se introducen las muestras en disolución

ácida en un [horno microondas](#) ([Tabla 1](#)) para realizar una digestión. El programa del microondas comienza incrementando la temperatura a 180°C y la presión a 90 bar, aproximadamente durante unos 20 min. Se mantienen estas condiciones constantes durante otros 20 min, y finalmente se deja enfriar a 25°C. En este momento se abren los vasos de digestión y se enrasa el extracto a 50 ml con agua destilada. En este extracto se pueden medir los metales traza directamente.

En el caso del aluminio y hierro no se puede hacer una medición directa, sino que es necesario primero añadir un 10% en volumen de  $\text{LaCl}_3$  para evitar interferencias químicas, y hacer 3 diluciones (1:9, 1:20 y 1:200 en volumen), dado que todavía no se sabe cuál es la concentración de estos metales, y se debe asegurar que entren en la recta de calibrado para su análisis.

#### 4.2.3.9. Extracción de hierro y aluminio en pirofosfato

Este método es útil para dar una medida del hierro y aluminio en complejos orgánicos. Se puede utilizar para clasificar los suelos. (Smith, 1994).

Se pesan en un tubo Falcon<sup>TM</sup> 0,5 g de suelo seco y tamizado (< 2 mm), se le añaden 50 ml de [pirofosfato de sodio](#) 0,1 M y se deja agitando durante 16 h. Una vez terminada la agitación se centrifugan a 20.000 rpm durante 10 minutos. Para la determinación de la concentración de hierro y aluminio se diluye 1 ml de muestra en 4 ml de pirofosfato, y se realiza una medición por [absorción atómica](#) ([Tabla 1](#)).

#### 4.2.4. Ensayo de germinación

Se preparan disoluciones de equilibrio, tanto para los suelos enmendados como para el suelo original: con agua destilada y con KCl 0,1M. Para la primera disolución se utiliza una relación sólido:disolución 1:20, por lo que se pesan 4 gramos de muestra en botes de plástico y se les añaden 80 ml de agua destilada. Esto se deja en reposo en oscuridad durante 5-7 días.

Para la segunda disolución se utiliza una relación sólido:disolución 1:5, de tal forma que se pesan 10 g de muestra a los que se añaden 50 ml de una disolución de KCl 0,1 M, se dejan agitando 24 h y después se centrifugan durante 15 min. Esta disolución tendrá una mayor concentración de los elementos presentes en suelo y de materia

orgánica, además, por la capacidad del KCl de desplazar los protones será más ácida que la extracción con agua destilada.

Los ensayos de germinación de semillas y el posterior análisis de elongación radicular son métodos o ensayos simples de biomonitorio. Este método es utilizado para comprobar la toxicidad de muestras líquidas y cómo estas afectan a la germinación y elongación radicular de semillas. (Araújo et al, 2001; Wang et al, 1990). Para los ensayos de germinación se preparan placas Petri con 3 papeles de filtro cortados a medida sobre los que se colocan 20 semillas de raigrás (*Lolium perenne*) previamente lavadas con una disolución de hipoclorito sódico al 10% para esterilizarlas y evitar que haya algún moho que pueda interferir en el ensayo. Las semillas elegidas se usan de forma habitual para ensayos de fitotoxicidad (Lin et al, 2007). Estas se humedecen con 8 ml de disolución y se cierran las placas con parafilm para evitar la evaporación del líquido. Las placas se colocan en una cámara de crecimiento durante 7 días a 22°C en oscuridad. Pasados los 7 días se recogen las placas y se cuenta cuántas semillas germinaron y se les mide la longitud de la raíz y del tallo utilizando una regla. Se considera una semilla germinada cuando el tamaño de la raíz es superior a 1 cm. (Di Salvatore et al, 2008).

Con los datos obtenidos será posible calcular 4 índices de germinación: %RSG (*Relative Seed Germination*), o germinación relativa de las semillas; %RRG (*Relative Radical Growth*), o crecimiento relativo de la raíz; GI (*Germination Index*), o índice de germinación y NRE (*Normalized Residual Elongation*), o elongación residual normal:

$$\%RSG = \frac{\text{Número de semillas germinadas en la enmienda}}{\text{Número de semillas germinadas en el control}} \times 100$$

$$\%RRG = \frac{\text{Valor medio de la raíz en la enmienda}}{\text{Valor medio de la raíz en el control}} \times 100$$

$$GI(\%) = \frac{RRG \times RSG}{100}$$

$$NRE = \frac{\text{Valor medio de la raíz (muestra)} - \text{Valor medio de la raíz (control)}}{\text{Valor medio de la raíz (control)}}$$

## 5. Discusión de resultados

### 5.1. Medida de pH en agua y KCl

El pH da una medida de la concentración de protones en el suelo. El valor de pH para la mayoría de los suelos se encuentra entre 5 y 9, aunque en Galicia son comunes valores inferiores que pueden llegar a 4-4,5, al ser suelos originados en granitos y presentar una elevada concentración de aluminio. En este trabajo se miden dos valores de pH: el de la solución acuosa, que indica la acidez actual y puede aumentar debido a los protones del complejo de cambio, y el de la solución salina, que caracteriza la acidez potencial. El valor de pH obtenido en la solución salina será más bajo, dado que el  $K^+$  desplazará otros iones presentes en el suelo. (Andrades et al, 2015).

Es importante conocer el valor del pH, dado que este afecta a la movilidad de los nutrientes en el suelo. La acidez altera la solubilidad de estos nutrientes, ya que en algunos casos, si el suelo es demasiado ácido disminuirá la solubilidad y las plantas no podrán absorberlos, si por el contrario aumenta la solubilidad podrían acumularse los nutrientes y llegar a ser tóxicos. (Andrades et al, 2015). Por ejemplo, el nitrógeno, potasio, azufre, molibdeno, calcio y magnesio tienen sensibilidad a la acidez; hierro, manganeso y aluminio son solo solubles en suelos muy ácidos, y el zinc y el cobre son insolubles en suelos alcalinos. (García et al, 2022).

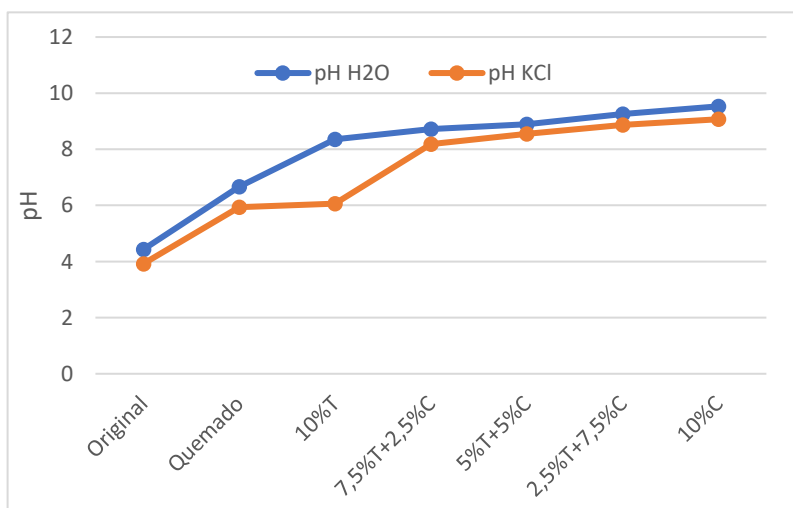


Figura 3: Valores de pH en agua y solución salina con distintas enmiendas aplicadas (T: Tecnosol, C: Compost)

En la [Figura 3](#) se pueden ver los valores de pH obtenidos para el suelo original (sin quemar), suelo control (quemado) y con distintas enmiendas. Los valores de pH para los suelos enmendados se corresponden con suelos alcalinos. El suelo

original presenta el valor de pH más ácido, lo cual es esperable ya que procede de la zona de Valença, que se encuentra en el norte de Portugal, que tendrá unas características similares a las mencionadas para Galicia, ya que ambos suelos son originados sobre

granitos. Se observa un incremento del pH al quemar el suelo, lo que ocurre siempre que un incendio llegue a unos 450-500°C. Esta alcalinización ocurre por varios motivos, uno de ellos es que con la quema se pierde la materia orgánica (de carácter ácido), con la consecuente formación de dióxido de carbono, que se emite a la atmósfera. El aumento del pH también se debe a que con la quema se liberan grandes cantidades de cationes básicos, y a que la ceniza formada tiene un pH elevado, al contener una gran cantidad de carbonatos. (Heydari et al, 2017). Se puede asociar también a la pérdida de aluminio o de grupos hidroxilo de las arcillas, que acaban formando óxidos minerales que contribuyen a la alcalinización. (Giovannini et al, 1988; Kutiel et al, 1992; Ulery et al, 1995).

El pH aumenta considerablemente con cualquiera de las enmiendas aplicadas, pero existe un mayor aumento con relación a la cantidad de compost utilizado. Esta diferencia ya se ve reflejada en los valores de pH de ambas enmiendas, más elevados para el compost que para el tecnosol ([Tabla 2](#)). Esto se puede explicar con la gran concentración de cationes de cambio que tiene el compost, mucho más elevada que en el tecnosol ([Tabla 2](#)), lo que le da un carácter alcalino.

El aumento de la alcalinidad del suelo puede ser beneficioso dado que en suelos ácidos existe el riesgo de una concentración tóxica de elementos como el hierro o el manganeso. Además, en suelos ácidos se inhibe la nitrificación y fijación de nitrógeno, y hace el suelo más vulnerable a la contaminación (García et al, 2022). Por otro lado, el rango de pH en el que se encuentran los suelos enmendados asegura actividad microbiana, necesaria para la mineralización. (USDA, 2015). En la [Figura 3](#) también se aprecia que existe un aumento del pH tanto en agua como en solución salina, aunque siempre se mantiene más elevado el valor para el agua, lo que es habitual.

Por otra parte, la diferencia entre el pH real y el pH potencial se representa en la [Figura 4](#). Se puede apreciar que este valor se mantiene aproximadamente constante, excepto en el suelo con una enmienda del 10% de tecnosol. Esto indica que a mayor

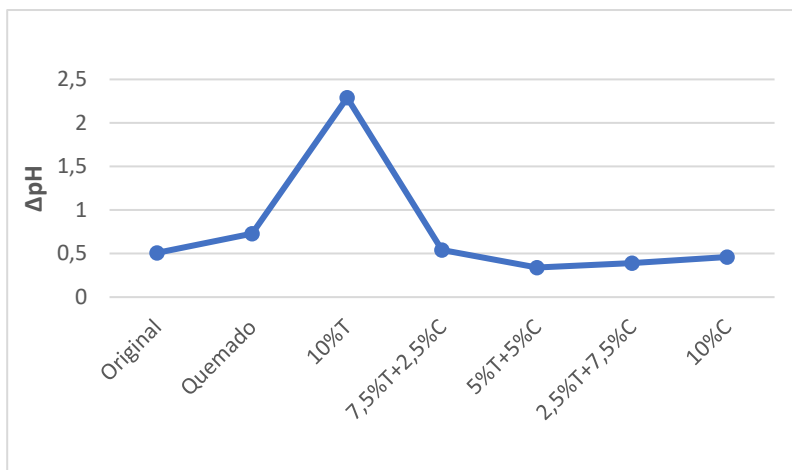


Figura 4: Diferencia entre pH actual y pH potencial con distintas enmiendas aplicadas

cantidad de tecnosol más protones proceden de sitios activos de intercambio y puede haber una mayor concentración de aluminio generado por hidrólisis, lo cual puede ser perjudicial ya que el aluminio es un metal tóxico para los cultivos y plantas.

## 5.2. Contenido en carbono total, carbono oxidable y nitrógeno

El carbono y el nitrógeno son dos elementos imprescindibles para el correcto desarrollo de las plantas, por lo que conocer la concentración de estos en el suelo puede dar una idea de la posibilidad de cultivar en dicho suelo. En concreto el carbono oxidable indica el grado de descomposición de la materia orgánica, siendo esta mayor cuanto mayor es la concentración de carbono oxidable. Esto favorece la liberación de nutrientes minerales, también importantes para el desarrollo de las plantas (Van der Wal et al, 2017). El carbono oxidable también se relaciona positivamente con la actividad microbiana, por lo que es señal de que la materia orgánica se está descomponiendo correctamente, facilitando su absorción por parte del cultivo (Moebius-Clune et al, 2016).

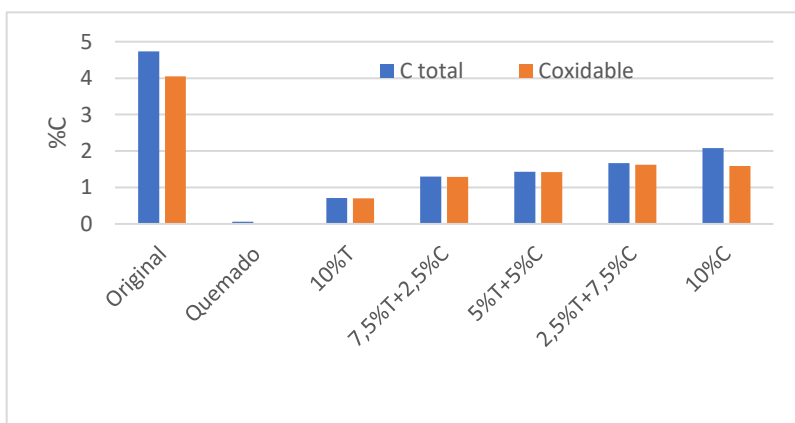


Figura 5: Contenido de carbono total y carbono oxidable utilizando distintas enmiendas

En la [Figura 5](#) se puede ver que la muestra de suelo original (sin quemar) tiene un contenido elevado de carbono, y que la mayoría de este se trata de carbono orgánico. En la muestra de suelo control quemado, se

observa un contenido mínimo de carbono y no se detectó la presencia de carbono oxidable. Esto es lógico, ya se trata de suelo quemado y la materia orgánica se puede perder por combustión, formando dióxido de carbono. Dado que la quema fue realizada en una mufla a 800°C, está asegurada la pérdida total del carbono orgánico. Por otra parte, el contenido de carbono aumenta con el porcentaje de compost añadido, lo cual es lógico si se analiza la cantidad de carbono total y oxidable de ambas enmiendas ([Tabla 2](#)), ya que es mucho más elevado en el compost que en el tecnosol. Se aprecia también que el carbono oxidable constituye casi la totalidad del carbono total de las muestras.

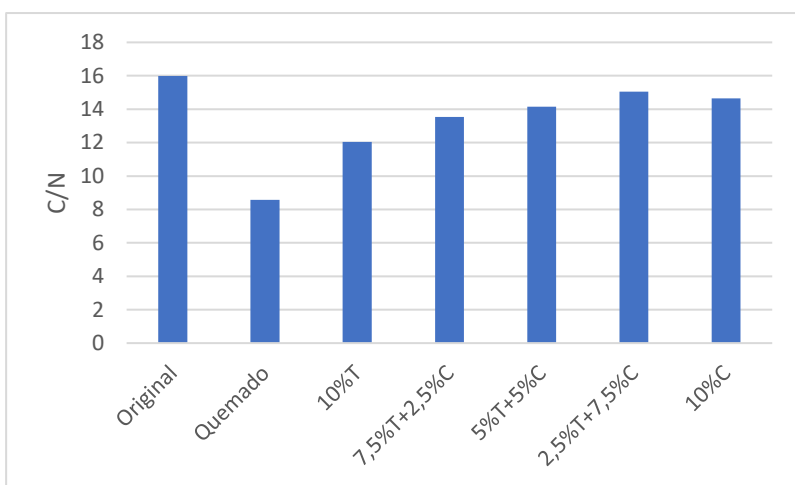


Figura 6: Relación C/N utilizando distintas enmiendas

En el caso del nitrógeno, es interesante estudiarlo como la relación C/N, ya que esto da una idea de la madurez de la enmienda. En el suelo, esta relación da una idea de la actividad microbiana y del grado de humificación de la

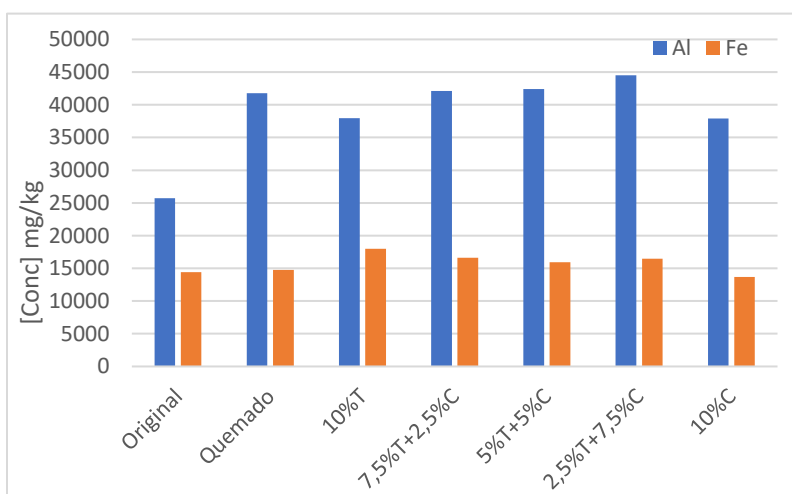
materia orgánica (López et al, 2021). Estos datos se representan en la [Figura 6](#), donde es notable la gran disminución del C/N después de la quema, lo cual es lógico por la pérdida de materia orgánica. Con la adición de las enmiendas se puede ver que esta ratio aumenta, ya que ambas tienen una alta concentración de ambos elementos, por lo que tanto la adición de compost como de tecnosol es positiva. Aún así, existe una correlación entre el aumento y el porcentaje de compost añadido a la muestra, lo que se puede justificar de nuevo mediante el análisis químico de ambas enmiendas ([Tabla 2](#)), ya que el compost presenta contenidos superiores no solo en el porcentaje de carbono, sino también en el de nitrógeno, con respecto al tecnosol.

Además, todos los valores de C/N para los suelos enmendados son menores a 20, lo que puede ser indicativo de la presencia de materia orgánica estabilizada o humificada. Ambas enmiendas muestran también una relación C/N menor a 20 ([Tabla 2](#)), lo que indica una aceptable estabilización de la materia orgánica (López et al, 2021), pero solo el

tecnosol presenta una relación C/N menor que 15, lo que indicaría que es adecuado para un uso agrícola (Soobhany et al, 2017).

### 5.3. Concentración total de aluminio y hierro

Los datos obtenidos para la concentración total de aluminio y hierro se presentan en la [Figura 7](#). Aquí se observa que la concentración de aluminio aumenta considerablemente tras la quema del suelo. Esto es debido a que con la elevada temperatura las arcillas minerales pueden colapsar y se libera el aluminio contenido en estas. Con la adición de las enmiendas no se aprecia ningún cambio notable en el suelo, ya que aunque el tecnosol presenta un contenido elevado de aluminio, este no supera la



concentración alcanzada con la quema. En el caso del hierro existe un pequeño aumento con el uso de tecnosol, que sí tiene una concentración elevada de este elemento, como se muestra en la [Tabla 2](#).

Figura 7: Contenido total de aluminio y hierro utilizando distintas enmiendas

### 5.4. Concentración de aluminio y hierro extraídos con oxalato

Esta extracción permite determinar el contenido de hierro y aluminio ligados a óxidos amorfos, óxidos hidratados, aluminosilicatos no cristalinos y materia orgánica (Vásquez Polo et al, 2014). En el estudio de Velasco et al- (2014) se observó que es común la pérdida de este tipo de compuestos de hierro y aluminio en el suelo tras un incendio, lo que concuerda con los resultados obtenidos en este trabajo ([Figura 8](#)). La presencia de estos elementos es importante porque son elementos agregantes, que dan estabilidad al suelo y también a la materia orgánica (Velasco et al, 2014). El hierro, por otro lado, tiene un importante papel en el control de metales pesados y otros elementos tóxicos gracias a su gran capacidad de adsorción (Galán et al, 1999).

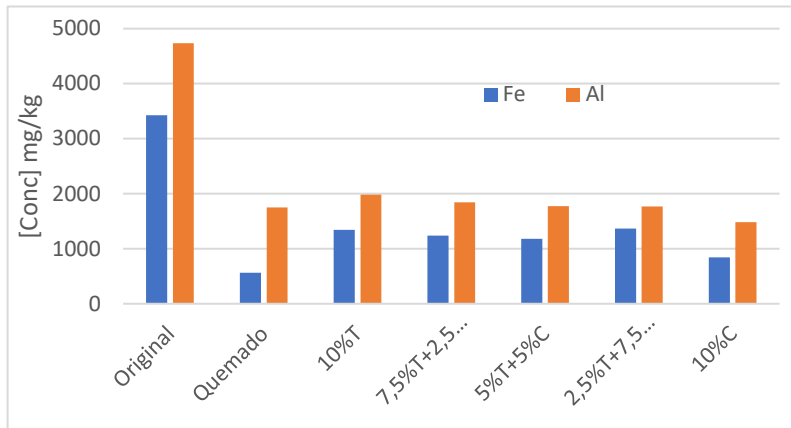


Figura 8: Concentración de hierro y aluminio extraídos con oxalato utilizando distintas enmiendas

En la [Figura 8](#) también se puede ver que con la adición de las enmiendas existe un ligero aumento en el contenido de ambos elementos, más notable en el caso del hierro. Este aumento se relaciona directamente con el porcentaje de

tecnosol ([Tabla 2](#)) en el suelo, ya que este tiene una concentración más elevada de ambos elementos que el compost, por ser este último de origen animal.

#### 5.5. Concentración de aluminio y hierro extraídos con pirofosfato

Esta extracción permite conocer la concentración de aluminio y hierro ligados a materia orgánica (Vásquez Polo et al, 2014).

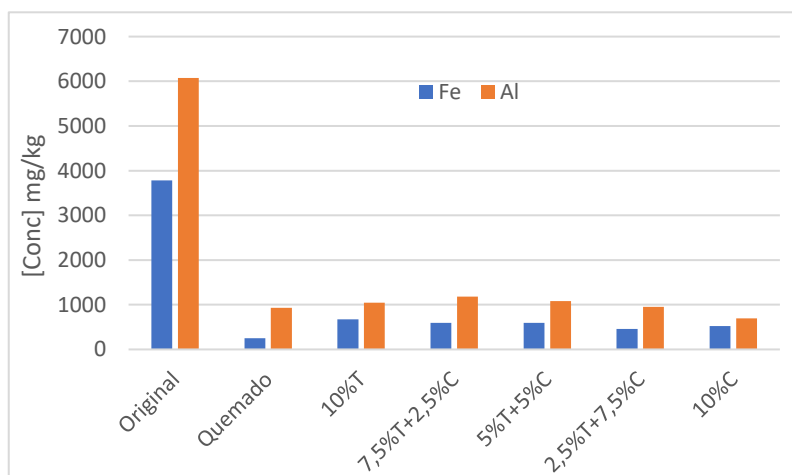


Figura 9: Concentración de aluminio y hierro extraídos con pirofosfato utilizando distintas enmiendas

En este caso se puede observar en la [Figura 9](#) que existe un cambio muy notable del suelo original al suelo quemado, lo que respalda la gran pérdida de materia orgánica producida en la quema, y la consiguiente pérdida de aluminio y hierro

ligados a esta. De nuevo, no se observa un gran incremento de estos elementos con la adición de las enmiendas, aunque es algo más notable con la adición de tecnosol, especialmente con respecto al hierro. Esto se explica con los datos presentes en la [Tabla 2](#), que muestran una concentración superior de este elemento en el tecnosol.

## 5.6. Contenido total de elementos minoritarios y traza

El contenido de elementos minoritarios se representa en la [Figura 10](#). Aquí se aprecia un aumento general de elementos alcalinos tras la quema. Esto puede ser debido a que son elementos que se encuentran habitualmente ligados a arcillas y otros componentes que se degradan con la quema. Con la adición de las enmiendas aumenta la concentración de los elementos presentes, ya que ambos materiales, tecnosol y compost, presentan en general un elevado contenido de ellos ([Tabla 2](#)). En concreto se aprecia una correlación clara entre el aumento de sodio y potasio y el porcentaje de compost en la enmienda. Este elevado contenido de sodio en el compost podría no ser adecuado, ya que es un elemento que las plantas absorben muy fácilmente, y si se encuentra demasiado

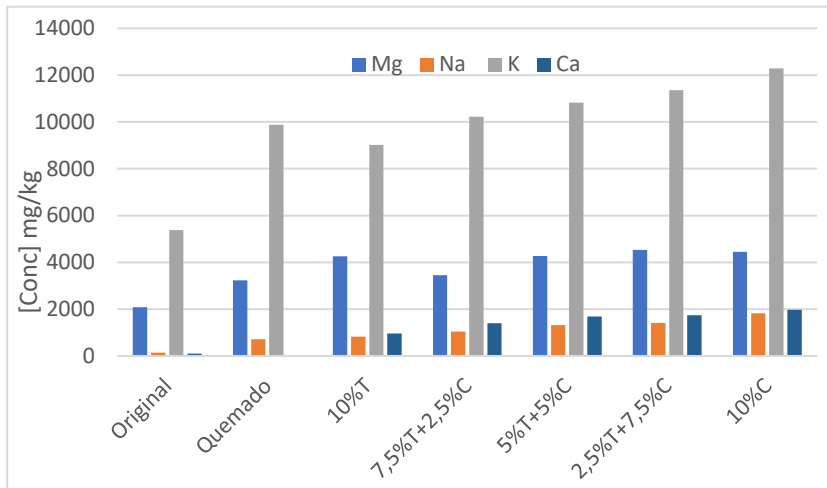


Figura 10: Contenido de elementos minoritarios utilizando distintas enmiendas

concentrado podría evitar o limitar la toma de otros nutrientes como calcio, magnesio o potasio. Un elevado contenido en sodio solo es recomendado para determinados cultivos. (Kuchel et al, 2019).

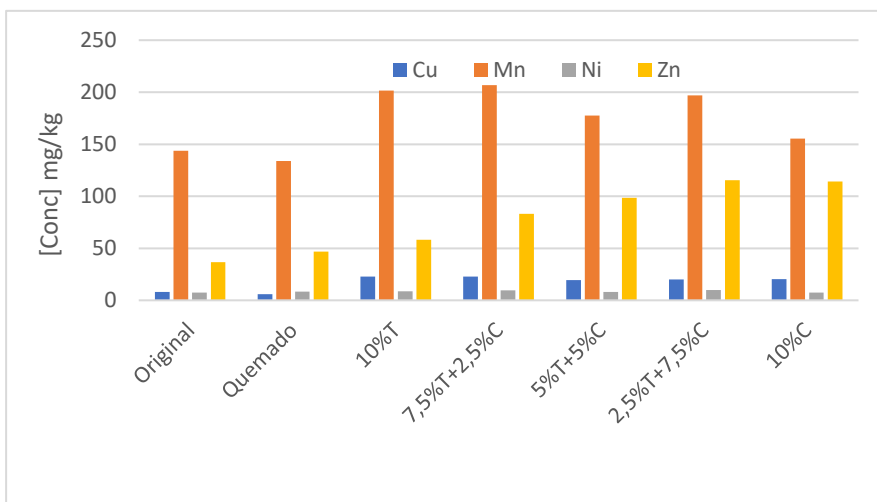


Figura 11: Concentración de elementos potencialmente tóxicos utilizando distintas enmiendas

En cuanto a elementos potencialmente tóxicos presentes ([Figura 11](#)), no se aprecia un cambio notable entre el suelo original y el suelo quemado. En realidad, no es tan importante la concentración de estos elementos como su disponibilidad.

Normalmente no están disponibles para la planta, ya que el contenido en materia orgánica y arcillas minerales suele ser elevado. Sin embargo, al producirse un incendio de intensidad relativamente alta se pueden perder estos componentes, por lo que los metales pesados se vuelven accesibles para la planta y pueden suponer un problema medioambiental (Norouzi et al, 2013; Yoon et al, 2006).

La concentración de elementos potencialmente tóxicos en las enmiendas (Tabla 2) es elevada en general pero como se dijo anteriormente lo importante es la disponibilidad de estos. Para determinar esta movilidad de los elementos tóxicos sería necesario hacer un ensayo de lixiviados o disolución de equilibrio para luego determinar la concentración de elementos disponibles. Este estudio sería necesario realizarlo antes de la aplicación de las enmiendas *in-situ*. Dado que ambas enmiendas aportan una elevada concentración de materia orgánica y otros nutrientes, la concentración de metales pesados no debería suponer un problema en los suelos tratados con las enmiendas.

### 5.7. Concentración de fósforo total y fósforo asimilable

Existe un aumento de fósforo total tras la quema del suelo (Figura 12), debido a que con las altas temperaturas el fósforo orgánico se transforma en ortofosfato inorgánico (Heydari et al, 2017). Con la adición de las enmiendas existe un aumento tanto del fósforo total como del fósforo asimilable, especialmente al aumentar el contenido de compost en la enmienda. El suelo quemado presenta un valor adecuado de fósforo Olsen (10,9 mg/kg a 21,4 mg/kg), por lo que podría considerarse un suelo fértil y no necesitaría un aporte de fósforo. Esto es habitual, ya que la disponibilidad del fósforo alcanza su máximo a un pH

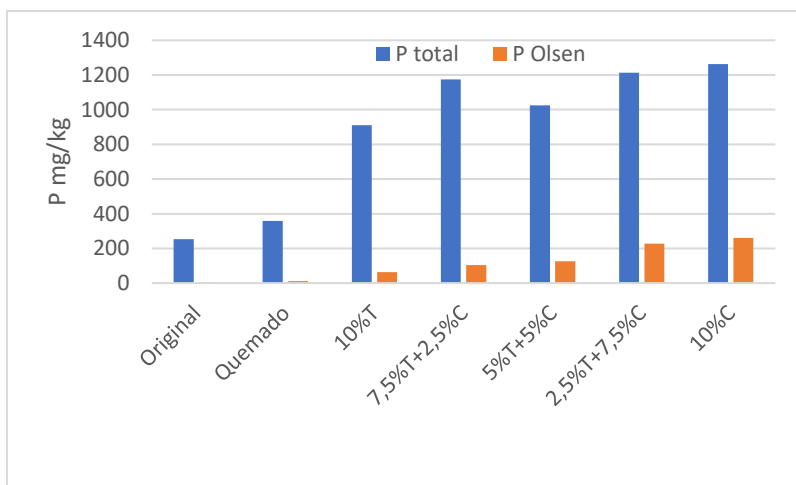


Figura 12: Concentración de fósforo total y fósforo asimilable (Olsen) utilizando distintas enmiendas

de aproximadamente 6,5 y el aporte de cenizas (entre otras cosas) alcaliniza el suelo tras un incendio. (Certini et al, 2005) Con las enmiendas se llega a unos niveles demasiado elevados de este nutriente, lo que podría dar lugar a problemas

de eutrofización de la aguas cercanas si se produciese su pérdida por erosión, pérdida por escorrentía o lixiviación, por ello el tecnosol sería en principio más adecuado, al tener una menor concentración de este elemento (Tabla 2) (Bai et al, 2013).

### 5.8.Capacidad de intercambio catiónico efectivo

Tal y como se ve en la Figura 13, la concentración de cationes de intercambio apenas cambia tras el incendio, ya que aunque existe una variación muy ligera tanto el suelo original como el suelo quemado presentan una CEC muy baja y un contenido de cationes de cambio también muy bajo.

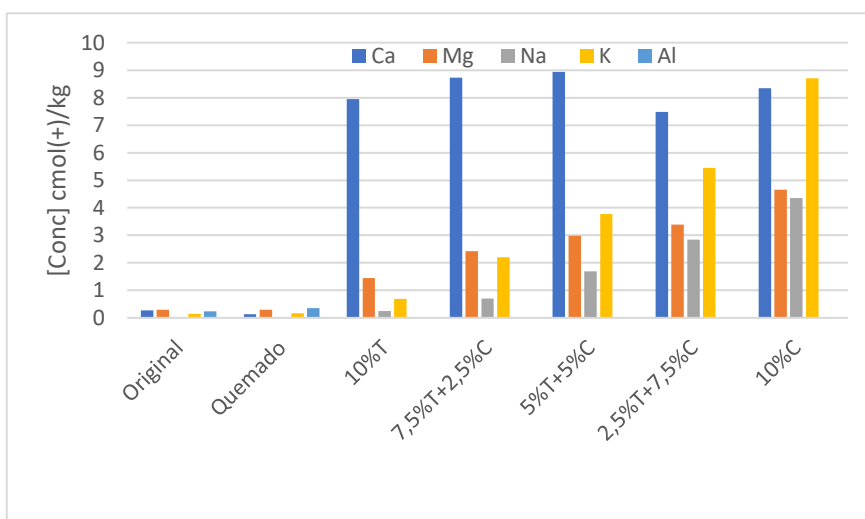


Figura 13: Concentración de cationes de intercambio utilizando distintas enmiendas

Con la adición de las enmiendas todos los suelos experimentan un incremento significativo en la concentración de cationes de cambio, excepto en el aluminio ya que ninguna de las enmiendas

presenta un elevado contenido de este elemento (Tabla 2). En general, todos los cationes de intercambio aumentan con relación a la concentración de compost en la enmienda. Este aumento implica un incremento de la capacidad de intercambio catiónico efectivo, lo que es beneficioso para el suelo ya que mejora su retención de elementos contaminantes y controla la disponibilidad de nutrientes necesarios para las plantas. En cuanto al grado de saturación, dado que la concentración de aluminio es despreciable, la mayor parte de posiciones de cambio estarán ocupadas por iones alcalinos, por lo que se trata de suelos saturados en bases. (García et al, 2022).

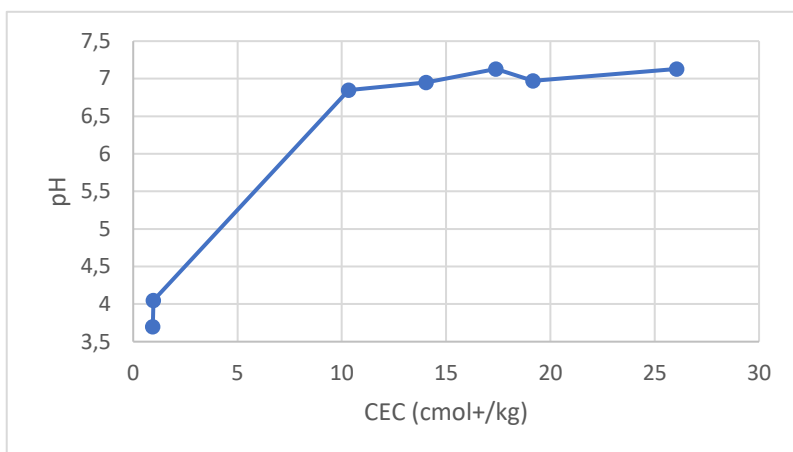


Figura 14: Variación de la CEC con respecto al pH de la muestra

Con la suma de la concentración de los distintos cationes de cambio se obtuvo la CEC. En la [Figura 14](#) se muestra la variación de esta con respecto al pH. A pH ácido los protones están retenidos en la superficie de las partículas, y a pH

básico estos protones se disocian y pueden ser intercambiados por cationes, por lo que la capacidad de cambio aumenta con el pH. (García et al, 2022). El aumento del pH, y consecuentemente de la CEC, en relación al contenido de compost en la enmienda se debe a la concentración elevada de cationes intercambiables en las partículas de compost ([Tabla 2](#)).

Para analizar el nivel de cationes intercambiables se utiliza la [Tabla 3](#) (Hazelton y Murphy, 2007). Con esta tabla se puede ver que tanto el suelo original como el suelo quemado presentan una CEC muy baja, y que todos los suelos enmendados se encontrarían dentro del rango de una CEC moderada, excepto aquel que cuenta con un 10% de tecnosol que se situaría en un nivel bajo y aquel con un 10% de compost, que tendría un valor alto ([Tabla 4](#)). Puesto que las enmiendas tienen valores altos o muy altos para todos los iones de intercambio (y por lo tanto para la CEC), la adición de estas provoca un aumento de categoría en los suelos.

Tabla 3: Rangos de concentración de cationes de intercambio y CEC

		Muy bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto
<b>Ca</b>	cmol(+)/kg	0-2,0	2,0-5,0	5,0-10,0	10,0-20,0	>20,0
<b>Mg</b>	cmol(+)/kg	0-0,3	0,3-1,0	1,0-3,0	3,0-8,0	>8,0
<b>Na</b>	cmol(+)/kg	0-0,1	0,1-0,3	0,3-0,7	0,7-2,0	>2,0
<b>K</b>	cmol(+)/kg	0-0,2	0,2-0,3	0,3-0,7	0,7-2,0	>2,0
<b>Total</b>	cmol(+)/kg	<6	6,0-12,0	12,0-25,0	25,0-40,0	>40,0

Tabla 4: Clasificación de las muestras según su concentración de cationes de intercambio y CEC

	Ca	Mg	Na	K	Total
	cmol(+)/kg	cmol(+)/kg	cmol(+)/kg	cmol(+)/kg	cmol(+)/kg
CONTROL (original)	Muy bajo	Muy bajo	Muy bajo	Muy bajo	Muy bajo
CONTROL (quemado)	Muy bajo	Muy bajo	Muy bajo	Muy bajo	Muy bajo
10 %T	Moderado	Moderado	Muy bajo	Moderado	Bajo
7.5% T + 2.5% C	Moderado	Moderado	Alto	Muy alto	Moderado
5% T + 5% C	Moderado	Moderado	Alto	Muy alto	Moderado
2.5% T + 7.5% C	Moderado	Alto	Muy alto	Muy alto	Moderado
10% C	Moderado	Alto	Muy alto	Muy alto	Alto
Compost	Alto	Alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto
Tecnosol	Muy alto	Alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto

## 5.9. Ensayo de germinación

### 5.9.1. Crecimiento de raíz y tallo

Se hicieron varios ensayos de germinación a lo largo del estudio utilizando semillas de *Lolium perenne*. Este tipo de bioensayos permite comprobar la toxicidad de las muestras líquidas y cómo estas afectan a la germinación y elongación radicular de las semillas (Wang, 1990). Para ello, y tal como se describió anteriormente, se prepararon disoluciones de equilibrio para obtener extractos de las enmiendas, utilizando solo tecnosol, solo compost, o una mezcla a partes iguales de ambos. Estas disoluciones se hicieron siguiendo dos métodos distintos (M1 – extracto en agua, y M2 – extracto en KCl), y los resultados se presentan en la [Figura 15](#).

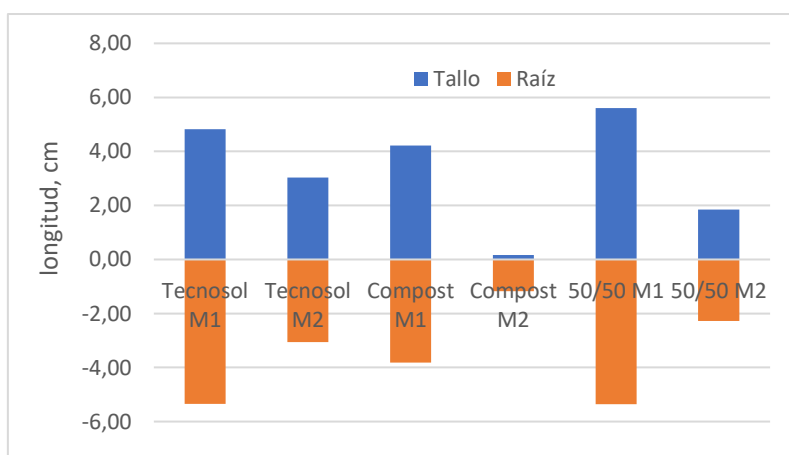


Figura 15: Crecimiento comparado de raíz y tallo de *Lolium perenne* utilizando distintos extractos

El crecimiento tanto de la raíz como del tallo fue mayor con el método 1 que con el método 2. Esto se debe a que el primer extracto presenta una menor concentración de materia orgánica y de elementos extraíbles. Con una

mayor concentración se llega a un contenido tóxico de nutrientes, así como una elevada

concentración de elementos potencialmente tóxicos como cobre, zinc o manganeso, entre otros, que acaba siendo desfavorable para la planta. Dado que el compost tiene una mayor concentración de nutrientes que el tecnosol (Tabla 2), a una mayor concentración es más potente la toxicidad del compost que del tecnosol. Los mejores resultados se obtuvieron utilizando una mezcla a partes iguales de ambas enmiendas.

Posteriormente se prepararon disoluciones de equilibrio con los suelos enmendados de la misma forma que se hizo con las enmiendas, y se hicieron ensayos de germinación comparando los suelos enmendados con el suelo original y el suelo quemado. Se muestran los resultados obtenidos en la Figura 16:

El crecimiento es mayor con el método 1, concordando con los resultados obtenidos de los extractos, si bien los datos que se pudieron extraer del método 2 no fueron concluyentes en la mayor parte de los casos. Por esta razón, se decide describir aquí únicamente los resultados obtenidos con el extracto de la disolución acuosa de equilibrio. Existe un menor crecimiento del tallo tras la quema-, así como de la raíz. Esto se explica con la pérdida de nutrientes necesarios para la planta, lo que impide su correcto desarrollo, haciendo que el tallo pase de 5,71 cm a 5,20 cm y la raíz pase de 4,46 cm a 3,89 cm. Con la adición de las enmiendas se aprecia un aumento del tamaño de la raíz en todos los casos, siendo esta mayor con la adición de compost que con la de tecnosol, aun siendo este también favorable para el crecimiento de la planta. Al llegar a 10% de

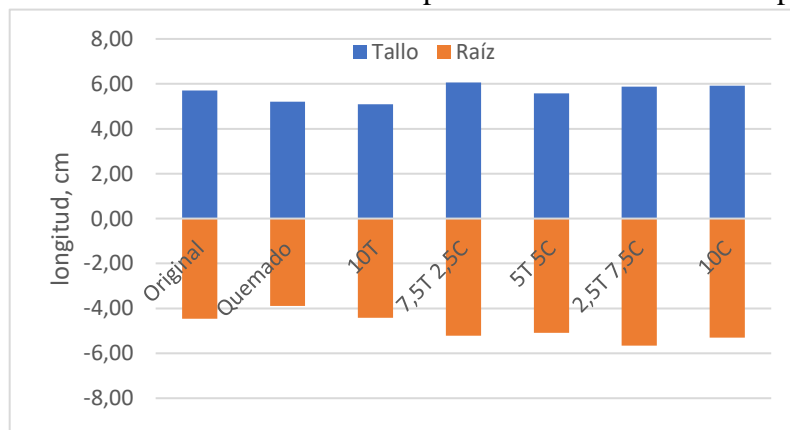


Figura 16: Crecimiento comparado de raíz y tallo de *Lolium perenne* utilizando distintas enmiendas

compost, la longitud de la raíz experimenta una ligera disminución. Esto puede deberse a un exceso en la concentración de nutrientes y otros elementos, llegando a ser ligeramente tóxica para la planta.

En el caso del tallo no existe una buena correlación con las enmiendas utilizadas, y su longitud permanece prácticamente constante con todos los tratamientos. En cualquier

caso, el crecimiento de la raíz es la prioridad, ya que esta es la encargada de absorber agua y nutrientes para la planta, por lo que su longitud favorecerá un correcto desarrollo.

### 5.9.2. Análisis de índices

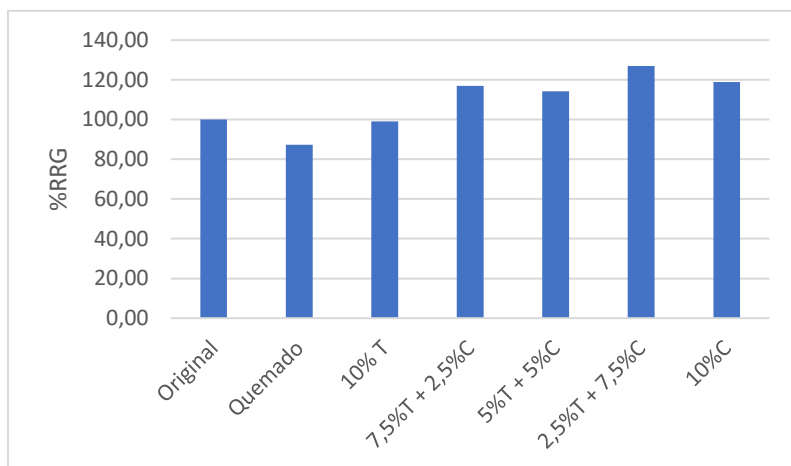


Figura 17: Crecimiento relativo de la raíz (%RRG) de *Lolium perenne* utilizando distintas enmiendas

Al analizar el %RRG (crecimiento relativo de la raíz) (Figura 17) se aprecia una disminución de este índice tras la quema a 800 °C. Con la aplicación de las enmiendas se puede observar una tendencia creciente relacionada

con el contenido de compost, lo que está en concordancia con los resultados explicados anteriormente. El suelo enmendado con un 10% de compost experimenta un ligero empeoramiento, debido posiblemente a una concentración excesiva de nutrientes y otros elementos, si bien el índice obtenido sigue siendo superior al suelo control. Dado que este índice se relaciona con la raíz, se puede concluir que el uso tanto de tecnosol como de compost es en principio beneficioso para la planta, puesto que una mayor raíz implica una mejor toma de agua y nutrientes, aunque es necesario añadir la cantidad de enmienda adecuada.

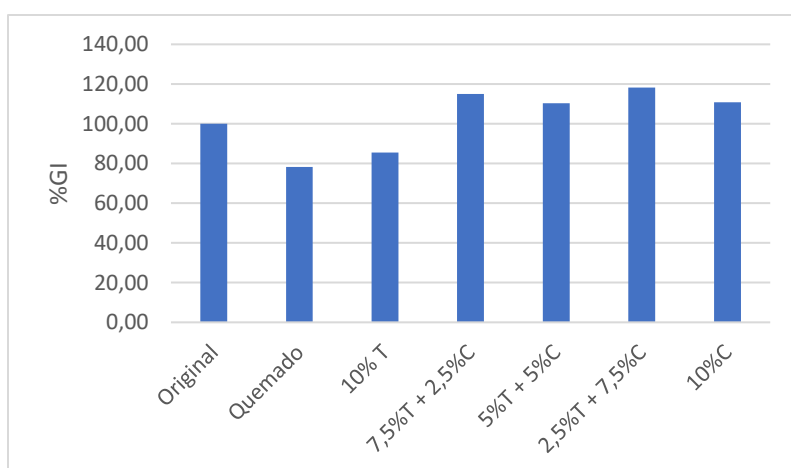


Figura 18: Índice de germinación (%GI) de *Lolium perenne* utilizando distintas enmiendas

El GI (índice de germinación), que se representa en la Figura 18, engloba los factores que afectan al crecimiento de la raíz y a la germinación de las semillas. De nuevo se observa una disminución tras la quema, lo que tiene sentido ya que se

perdió materia orgánica y nutrientes como el N. Con la adición de las enmiendas se observa una tendencia similar al encontrado con el índice %RRG, es decir, el %GI aumenta con el contenido de compost en la enmienda, que de nuevo se detiene al llegar a un 10%. Esto nos confirma que la aplicación de compost es beneficiosa para el crecimiento de la raíz, y también para la germinación de las semillas. Por otra parte, nos indica que la aplicación de tecnosol, aunque mejora la situación del suelo quemado, no favorece la germinación y crecimiento del *Lolium perenne* como el compost.

El índice NRE (elongación residual normal) (Figura 19) es similar al %RRG, pero relativiza los resultados con respecto al control (suelo sin quemar). Así, se puede ver que

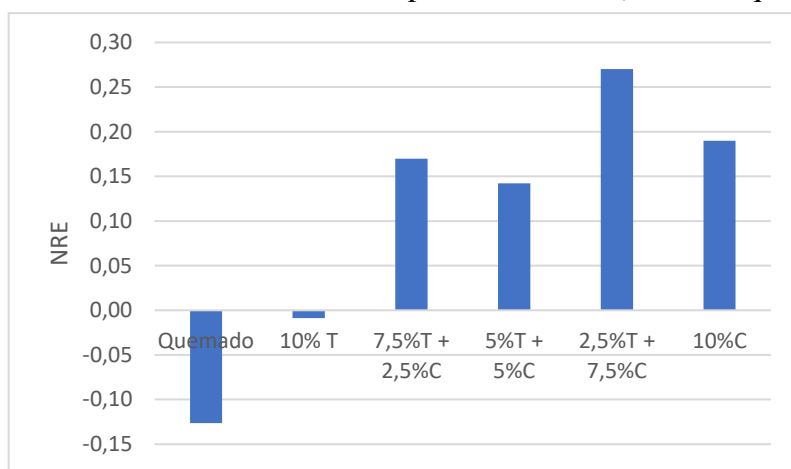


Figura 19: Elongación residual normal (NRE) de *Lolium perenne* utilizando distintas enmiendas

el suelo quemado tiene un valor negativo. En cuanto a la aplicación de las enmiendas, se observa una tendencia similar a los índices anteriores. Con la adición de tecnosol existe una mejora con respecto al suelo quemado, pero el índice

sigue teniendo un valor negativo. Esto indica que su aplicación es menos favorable que la del compost. Así, se observa de nuevo un aumento del índice con la concentración de compost utilizada, que parece terminar al llegar a un 10% de compost añadido.

### 5.9.3. Correlación entre los índices y otros parámetros

En la Tabla 5 se presentan los coeficientes  $r^2$  para los índices calculados y parámetros físico-químicos analizados para los suelos enmendados, tales como contenido de diversos nutrientes, capacidad de intercambio catiónico y pH:

Tabla 5: Coeficientes de correlación entre los índices de germinación y parámetros físico-químicos

	<b>%RRG</b>	<b>GI</b>	<b>NRE</b>
<b>N</b>	0,8389	0,7741	0,8389
<b>C</b>	0,8561	0,787	0,8561
<b>Cox</b>	0,9503	0,9004	0,9503
<b>P</b>	0,867	0,7842	0,867
<b>Polsen</b>	0,7497	0,9697	0,7497
<b>CIC</b>	0,8675	0,6825	0,8675
<b>pH</b>	0,6459	0,4326	0,6459

Existe una muy buena correlación en general con todos los índices y los parámetros medidos, especialmente en el caso de la concentración de nutrientes. Esto es lógico, dado que estos nutrientes son esenciales para el desarrollo de la planta, por lo que es esperable que a una mayor concentración de estos exista un mayor crecimiento y una mayor germinación. Concretamente los nutrientes como nitrógeno, carbono y fósforo total se relacionan más con el %RRG y el NRE que con el GI, lo que indica que son en principio nutrientes que estimulan el crecimiento de la raíz pero no afectan tanto a la germinación. Por otro lado, el fósforo Olsen tiene un coeficiente de correlación muy elevado con el GI, más alto que para el %RRG y el NRE, por lo que se puede concluir que se trata de un nutriente que favorece la germinación de estas semillas. El carbono oxidable presenta buena correlación con los tres índices, por lo que favorecería tanto la germinación de la semilla como su posterior crecimiento.

## 6. Conclusiones

Español:

Con los resultados obtenidos y discutidos en la presente memoria se llega a las siguientes conclusiones:

- Tras una quema controlada a 800\_°C aumenta el pH del suelo, disminuye el contenido de carbono total y oxidable, y la relación C/N. Por otra parte, aumenta el contenido total de aluminio y hierro total y extraíble con oxalato, pero disminuye el extraíble con pirofosfato. Aumenta también la concentración de elementos minoritarios y el contenido de fósforo, mientras que la capacidad de intercambio catiónico presenta pocos cambios. En cuanto a los bioensayos, empeora el crecimiento y germinación de las semillas de *Lolium perenne*.
- Con la adición de las enmiendas siempre se obtiene un efecto positivo sobre las propiedades del suelo. Las enmiendas contribuyen a aumentar el pH, el contenido de carbono total y oxidable, la relación C/N, los elementos minoritarios, el fósforo total y asimilable y la capacidad de intercambio catiónico. Por otro lado, disminuyen la concentración de hierro y aluminio extraídos con oxalato. En el caso de los bioensayos, las enmiendas mejoran los índices de crecimiento y germinación de las semillas de *Lolium perenne*.
- En cuanto a la comparación de las enmiendas, el compost da un mayor aumento de pH y capacidad de intercambio catiónico con respecto al tecnosol, dando al suelo una mayor capacidad de retención de contaminantes y disponibilidad de nutrientes. La aplicación de compost también aporta más carbono total y oxidable, elementos minoritarios y fósforo total, lo que implica un mayor aporte de nutrientes para la planta. Sin embargo, se obtiene una elevada concentración de fósforo asimilable, lo que puede llegar a ser peligroso ya que se puede perder por escorrentía, llegando a causar eutrofización de masas de agua cercanas. Por último, el tecnosol aporta más aluminio y hierro. Para los bioensayos se obtiene en general una mejora en el comportamiento de las semillas relacionada con el aumento en compost, pero

hay un empeoramiento al llegar al 10% en peso de compost, debido a que con esta proporción alcanza una concentración tóxica de nutrientes y otros elementos poco favorables para la planta. Así, la composición de enmienda más adecuada sería aquella con un 7,5% de compost y un 2,5% de tecnosol.

Galego:

Cos resultados obtidos e discutidos na presente memoria chégase ás seguintes conclusións:

- Tras unha queima controlada a 800°C aumenta o pH do solo, diminúe o contido de carbono total e oxidable, e a relación C/N. Por outra banda, aumenta o contido total de aluminio e ferro total e extraíble con oxalato, pero diminúe o extraíble con pirofosfato. Aumenta tamén a concentración de elementos minoritarios e o contido en fósforo, mentres que a capacidade de intercambio catiónico presenta poucos cambios. En canto aos bioensaos, empeora o crecemento e xerminación das sementes de *Lolium perenne*.
- Coa adición das emendas sempre se obtén un efecto positivo sobre as propiedades do solo. As emendas contribúen a aumentar o pH, o contido de carbono total e oxidable, a relación C/N, os elementos minoritarios, o fósforo total e asimilable e a capacidade de intercambio catiónico. Por outra banda, diminúen a concentración de ferro e aluminio extraídos con oxalato. No caso dos bioensaos, as emendas melloran os índices de crecemento e xerminación das sementes de *Lolium perenne*.
- En canto á comparación das emendas, o compost da un maior aumento de pH e capacidade de intercambio catiónico con respecto ao tecnosol, dando ao solo unha maior capacidade de retención de contaminantes e dispoñibilidade de nutrientes. A aplicación de compost tamén aporta máis carbono total e oxidable, elementos minoritarios e fósforo total, o que implica un maior aporte de nutrientes para a planta. Nembargantes, obtense unha elevada concentración de fósforo asimilable, o que pode chegar a ser perigoso, xa que se pode perder por escorrentía, chegando a causar eutrofización de masas de auga próximas. Por último, o tecnosol aporta máis aluminio e ferro. Para os

bioensaños obtense en xeral unha mellora no comportamento das sementes relacionada co aumento en compost, pero hai un empeoramento ao chegar ao 10% de peso en compost, debido a que con esta proporción alcanza unha concentración tóxica de nutrientes e outros elementos pouco favorables para a planta. Así, a composición de emenda máis axeitada sería aquela cun 7,5% de compost e un 2,5% de tecnosol.

English:

With the obtained results and their discussion in the present essay, the following conclusions are reached:

- After a controlled 800°C burning the soil's pH rises, while both the total and oxidisable carbon, as well as the C/N ratio, decrease. On the other hand, the aluminium and iron content, both total and extracted with oxalate, increase, however, those extracted with pyrophosphate decrease. Concentration of minority elements and phosphorus increase, while the cationic exchange capacity doesn't show many changes. In the bioassays, both the growth and germination of *Lolium perenne* seeds worsen.
- The addition of the amendments always has a positive effect on the soil's properties. The amendments contribute to increasing the pH, both the total and oxidisable carbon content, the C/N ratio, the minority elements, both the total and assimilable phosphorus and cationic exchange capacity. On the other hand, aluminium and iron contents extracted with oxalate decrease. In the bioassays, amendments improve both the growth and germination of *Lolium perenne* seeds.
- As for the amendments comparison, compost shows a larger increase of both pH and the cationic exchange capacity when compared to technosol, giving the soil a better polluting agent retention capacity, as well as a better nutrient availability. The addition of compost also gives the soil more total and oxidisable carbon, more minority elements and more total phosphorus, all of which imply a higher nutrient availability for the plants. However, a high

assimilable phosphorus concentration is achieved in the soil, which can be dangerous since it can be lost through run-off, possibly causing eutrophication in nearby water bodies. Lastly, technosol deposits more aluminium and iron. In general there is an improvement in the seed's behaviour proportional to the concentration of compost, but this behaviour deteriorates once the concentration of compost reaches 10% of the mass, since by this proportion it has reached a toxic concentration of both nutrients and other unfavourable elements for the plants. Therefore, the optimal amendment composition is 7,5% of compost and 2,5% of technosol.

## 7. Bibliografía

Abbas, A., Naveed, M., Azeem, M., Yaseen, M., Ullah R., Alamri, S., Farooq, Q., Siddiqui, M.H. (2020). Efficiency of wheat straw biochar in combination with compost and biogas slurry for enhancing nutritional status and productivity of soil and plant. *Plants*. 9(11), 1516.

Andrades R.M., Moliner A.A., Masaguer R.A. (2005) *Prácticas de Edafología, Métodos Didácticos para Análisis de Suelos*. Universidad de la Rioja

Arán, D., Antelo, J., Fiol, S., Macías, F. (2018) Immobilization of phosphate by a Technosol spolic silandic: kinetics, equilibrium and dependency on environmental variables. *Journal of Soils and Sediments*. 18(9), 2914–2923.

Badía, D., Martí, C. (2003). Plant ash and heat intensity effects on chemical and physical properties of two contrasting soils. *Arid Land Research and Management*. 17(1), 23-41

Bai Z., Li H., Yang X., Zhou B., Shi X., Wang B., Li D., Shen J., Chen Q., Qin W., Oenema O., Zhang F., (2013) The critical soil P levels for crop yield, soil fertility and environmental safety in different soil types. *Plant Soil* 372, 27–37

Barreal, J., Loureiro, M. (2003). Modelling spatial patterns and temporal trends of wildfires in Galicia (NW Spain). *Forest Systems*. 24(2), e022

Bot, A., & Benites, J. (2005). The importance of soil organic matter. Key to drought-resistant soil and sustained food production. Roma: Food and Agriculture Organization of United Nations.

Braña Rey, F. (2015). Imaginarios de monte y fuego. Los incendios forestales en Galicia imagonautas. *Revista Interdisciplinaria sobre Imaginarios Sociales*. 6, 15-26

Certini, G. (2005). Effects on fire on properties of forest soils: review. *Oecologia*. 143, 1-10

Coelho de Araújo, E., Filho, S. M., Vieira, F. U., Bezerra, A. M. E. (2001). Qualidade fisiológica de sementes de feijao caupi tratadas com pó de nim. *Ciência Agrônoma* (Brasil). 32(1-2), 60-68.

DeBano, L.F., Krammes, J.S. (1966). Water repellent soils and their relation to wildfire temperatures. *International Association of Scientific Hydrology*. 11(2), 14-19

DeBano, L.F. (1974). Chaparral soils. En: Rosenthal M. (Ed.), *Living with the chaparral: Symposium Proceedings*. San Francisco, CA: Sierra club Special Publication.

DeBano, L.F., Neary, D.G., Ffolliott, P.F. (1998). Fire's effects on ecosystems. New York, EE.UU.: *John Willey and Sons*. ISBN: 978-0-471-16356-5.

Di Salvatore M., Carafa A.M., Carratù G. (2008). Assessment of heavy metals phytotoxicity using seed germination and root elongation tests: A comparison of two growth substrates. *Chemosphere*. 73, 1461-1464.

Doerr, S. H.; Shakesby; R.A.; Walsh, R.P.D. (2000). Soil water repellency: its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance. *Earth-Science Reviews*. 51(1-4), 33-65.

Dorronsoro, C. (2022). Departamento de Edafología y Química Agrícola de la Universidad de Granada. Obtenido de <http://edafologia.ugr.es/index.htm>

Eaton A.D., Clesceri L.S., Rice E.W., Greenberg A.E. (2005). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (21st ed.) *American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA), Water Environment Federation (WEF)*.

Francos, M. (2019). Wildfire and forest management effects on soil properties. *Universitat de Barcelona*. Tesis Doctoral

Galán, E., Gómez Ariza, J.L., González, I., Fernández-Caliani, J.C., Morales, E., Giráldez, I.(1999). Utilidad de las técnicas de extracción secuencial en la mejora y caracterización mineralógica por DRX de suelos y sedimentos con altos contenidos de óxidos de hierro. En: Pascual, J., Zapatero, J., Ramírez del Valle, A. J., Moya García, M. V. (Eds.). *Integración de Ciencia y Tecnología de Arcillas en el Contexto Tecnológico-Social del Nuevo Milenio*. Sociedad Española de Arcillas y Diputación Provincial de Málaga. pp. 337-347. ISBN: 84-699-4082-1

García, I., Dorronsoro, C., (2022). Departamento de Edafología y Química Agrícola de la Universidad de Granada. Obtenido de: <http://edafologia.ugr.es/index.htm>

Gil, J., Zavala, L., Bellinfante, N., & Jordán, A. (2010). Acidez y capacidad de intercambio catiónico en los suelos afectados por incendios. Métodos de determinación e interpretación de resultados. En *Actualización en métodos y técnicas para el estudio de los suelos afectados por incendios forestales*. (pp. 315-331). Valencia.

Greenpeace; Medi XXI GSA. (2018) Protege el bosque, protege tu casa. Obtenido de Greenpeace: Obtenido de: [https://es.greenpeace.org/es/wp-content/uploads/sites/3/2018/06/Protege\\_el\\_bosque\\_LR.pdf](https://es.greenpeace.org/es/wp-content/uploads/sites/3/2018/06/Protege_el_bosque_LR.pdf)

Greenpeace (2022): Grandes incendios forestales. Obtenido de: <https://es.greenpeace.org/es/noticias/grandes-incendios-forestales/>

Hernández, L. (2018) Propuesta ibérica de WWF España y ANP/ WWF Portugal para la prevención de incendios. *Madrid: WWF/Adena*.

Hernández, L. (2021). Paisajes cortafuegos. Propuesta de WWF España y ANP (WWF Portugal) para adaptar el territorio ibérico a los incendios. *WWF España*.

Heydari, M., Rostamy, A., Najafi, F., & Dey, D. (2017). Effect of fire severity on physical and biochemical soil properties in Zagros oak (*Quercus brantii* Lindl.) forests in Iran. *Journal of Forestry Research*, 28(1), 95-104

Ibáñez, J.J. Lobo, M., Almendros, G., Polo, A. (1983). Impacto del fuego sobre algunos ecosistemas edáficos de clima mediterráneo continental en la zona centro de España. *Boletín de la Estación Central de Ecología*. 24(12), 755-777.

Imeson, A.C, Verstraten, J.M., Mulligen, E.J., Sevink, J. (1992). The effects of fire and water repellency on infiltration and runoff under Mediterranean type forest. *Catena*. 19(3-4), 345-361

Islas-Valdez, S., Lucho-Constantino, C.A., Beltrán-Hernández, R.I., Gómez-Mercado, R., Vázquez-Rodríguez, G.A., Herrera, J.M., Jiménez-González, A. (2015). Effectiveness of rabbit manure biofertilizer in barley crop yield. *Environmental Science Pollution Research International*. 24(33), 25731-25740.

Knicker, H. , Almendros, G., González-Vila, F.J., Martin, F., Lüdemann, H.D. (1966). <sup>13</sup>C- and <sup>15</sup>N-NMR spectroscopic examination of the transformation of organic nitrogen in plant biomass during thermal treatment. *Soil Biology and Biochemistry*. 28(8), 1053-1060.

Kucbel, M., Raclavská, H., Růžicková, J., Svědová, B., Sassmanová, V., Drozdová, J., Raclavský, K., Juchelková, D., (2019). Properties of composts from household food waste produced in automatic composters. *Journal Environment Management* 236, 657–666.

Kutiel, P., Shaviv, A. (1992). Effects of soil type, plant composition and leaching on soil nutrients following a simulated forest fire. *Forest Ecology and Management*. 53(1-4), 329-343

Lide, D.R. (2001). *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. 82<sup>a</sup>. ed. New York, EE.UU.: *CRC Press*., ISBN: 978-0849304828.

Lin D., Xing B. (2007) Phytotoxicity of nanoparticles: Inhibition of seed germination and root growth. *Environmental Pollution* 150, 243-250.

López, N., (2021). Aplicación de enmiendas para la recuperación de suelos quemados. Trabajo de Fin de Grado.

López R, Antelo J, Silva AC, Bento F, Fiol S. (2021). Factors that affect physicochemical and acid-base properties of compost and vermicompost and its potential use as a soil amendment. *J Environ Manage*. 300, 113702.

Macías, F., Bao, M., Macías-García, F., Camps, M. (2007). Valorización biogeoquímica de residuos mediante la elaboración de Tecnosoles con diferentes aplicaciones ambientales. *Agua y Residuos*. 5, 12-25.

Macías García, F., Macías-Vázquez, F., Nieto, O. (2012). Didáctica de la mina de touro: procesos de recuperación de suelos y aguas hiperácidas de minas de sulfuros metálicos mediante la valorización biogeoquímica de residuos. *Boletín das Ciencias*. 25(76), 65-66.

Mataix-Solera, J. (2000). Alteraciones físicas, químicas y biológicas en suelos afectados por incendios forestales: contribución a su conservación y regeneración. Alicante. Universidad de Alicante.

Moebius-Clune B.N., Moebius-Clune D.J., Gugino B.K., Idowu O.J., Schindelbeck R.R., Ristow A.J., Van Es H.M., Thies J.E., Shayler H.A., McBride M.B., Kurtz K.S.M., Wolfe D.W., Abawi G.S. (2017) Comprehensive Assessment of Soil Health. *Cornell University*.

Neary, D. G., Klopatek, C. C., DeBano, L. F., & Ffolliott, P. F. (1999). Fire effects on belowground sustainability: a review and synthesis. *Forest Ecology and Management*. 122, 51-71

Norouzi, M., Ramezanpour, H. (2013). Effect of Fire on Chemical Forms of Iron and Manganese in Forest Soils of Iran. *Environmental Forensics*. 14. 169-177.

Olsen S.R., Cole C.V., Watanabe F.S., Dean L.A. (1954) Estimation of Available Phosphorus in Soils by Extraction with Sodium Bicarbonate. Washington, D.C., U.S. Dept. of Agriculture.

Pascual-Granjed, A.J. (2011). Efectos a largo plazo del fuego sobre algunas propiedades del suelo. Incendios naturales e incendios experimentales bajo condiciones de campo y laboratorio. Tesis Doctoral, Universidad de Sevilla, Sevilla.

Paulin, B, and O'Malley, P. (2008). Compost production and use in horticulture. *Department of Primary Industries and Regional Development, Western Australia, Perth*. Bulletin 4746.

Pérez-Esteban, J., Escolástico, C., Moliner, A., Masaguer, A., Ruiz-Fernández, J. (2014). Phytostabilization of metals in mine soils using *Brassica juncea* in combination with organic amendments. *Plant Soil*. 377(1-2), 97–109.

Peech M., Alexander L.T., Dean L.A., Reed J.F. (1947) Methods of Soil Analysis for Soilfertility Investigations. Washington, D.C., U.S. Dept. of Agriculture.

Robichaud, P.R., Hungerford, R.D. (2000). Water repellency by laboratory burning of four northern Rocky Mountain forest soils. *Journal of Hydrology*. 231-232, 207-219.

Ross, G.J., Wang C. (1993). Extractable Al, Fe, Mn, and Si. En: Carter, M. R. (ed). *Soil Sampling and Methods of Analysis. Canadian Society of Soil Sciences. Ann Arbor (Michigan): Lewis Publishers.* .pp. 239-246. ISBN: 0873718615

San-Miguel-Ayanz, J., Durrant, T., Boca, R., Liberta`, G., Branco, A., De Rigo, D., Ferrari, D., Maianti, P., Artes Vivancos, T., Pfeiffer, H., Loffler, P., Nuijten, D., Leray, T. and Jacome Felix Oom, D. (2018). Forest Fires in Europe, Middle East and North Africa 2017 (EUR 29318 EN).

Savage, S.M. (1974). Mechanism of fire-induced water repellency in soil. *Soil Science Society of America Proceedings.* 38(4), 652-657.

Schmidt, M.W.I., Skjemstad, J.O., Gehrt, E., Kögel-Knabner, I. (2001). Charred organic carbon in German chernozemic soils. *European Journal of Soil Science.* 50(2), pp. 351-365.

Shirdam R., Modarres-Tehrani Z., Dastgoshadeh F. (2008) Microwave assisted digestion of soil, sludge and sediment for determination of heavy metals with ICP-OES and FAAS; *Rasayan. J. Chemistry.* 1, 757-765.

Smith, B.F. (1994). Characterization of poorly ordered minerals by selective chemical methods. *Clay mineralogy: Spectroscopic and Chemical Determinative Methods.*

Soobhany, N., Gunasee, S., Rago, Y.P., Joyram, H., Raghoo, P., Mohee, R., Garg, V.K., (2017). Spectroscopic, thermogravimetric and structural characterization analyses for comparing Municipal Solid Waste composts and vermicomposts stability and maturity. *Bioresource Technology* 236, 11–19.

Sparks D.L., Page A.L., Helmke P.A., Loeppert R.H., Soltanpour P.N., Tabatabai M.A., Johnston C.T., Summer M.E. (1996) *Methods of Soil Analysis Part3-Chemical Methods.* Madison, Wisconsin, USA, *Soil Science Society of America, Inc. American Society of Agronomy, Inc.*

TIMAC AGRO. (2022). Enmienda orgánica activa. Disponible en: <https://es.timacagro.com/soluciones/?prod=9023&aff=4&n=ECOFEM>

Ulery, A.L., Graham, R.C., Chadwick, O.A., Wood, H.B. (1995). Decadescale changes of soil carbon, nitrogen and exchangeable cations under chaparral and pine. *Geoderma*. 65(1-2), 121- 134.

USDA. (2015). Soil Quality Indicator Sheets. Natural Resources Conservation Service. Disponible en: <https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detailfull/soils/health/assessment/?cid=stelprdb1237387>

Van der Wal, A., De Boer, W. (2017). Dinner in the dark: Illuminating drivers of soil organic matter decomposition. *Soil Biology and Biochemistry*. 105, 45-48.

Vásquez Polo, J. R., Macías Vázquez, F., Menjivar Flores, J. C. (2014). Formas de hierro y aluminio en suelos con diferentes usos en la zona norte del departamento del Magdalena, Colombia. *Acta Agronómica*, 63(4), 352-360.

Velasco, A., Úbeda, X. (2014). Estabilidad de los agregados de un suelo quemado a diferentes intensidades de fuego dieciocho años después de un incendio forestal. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 40(2), 333-352.

Wang, W., Keturi, P. H. (1990). Comparative seed germination tests using ten plant species for toxicity assessment of a metal engraving effluent sample. *Water, Air, and Soil Pollution*. 52(3-4), 369-376

Wang, W., Williams, J. M. (1990). The use of phytotoxicity tests (common duckweed, cabbage, and millet) for determining effluent toxicity. *Environmental Monitoring and Assessment*. 14(1), 45-58.

Yoon, J., Cao, X., Zhou, Q., & Ma, L. (2006). Accumulation of Pb, Cu, and Zn in native plants growing on a contaminated Florida site. *Science of The Total Environment*, 368, 456-464.

# ANEXO I

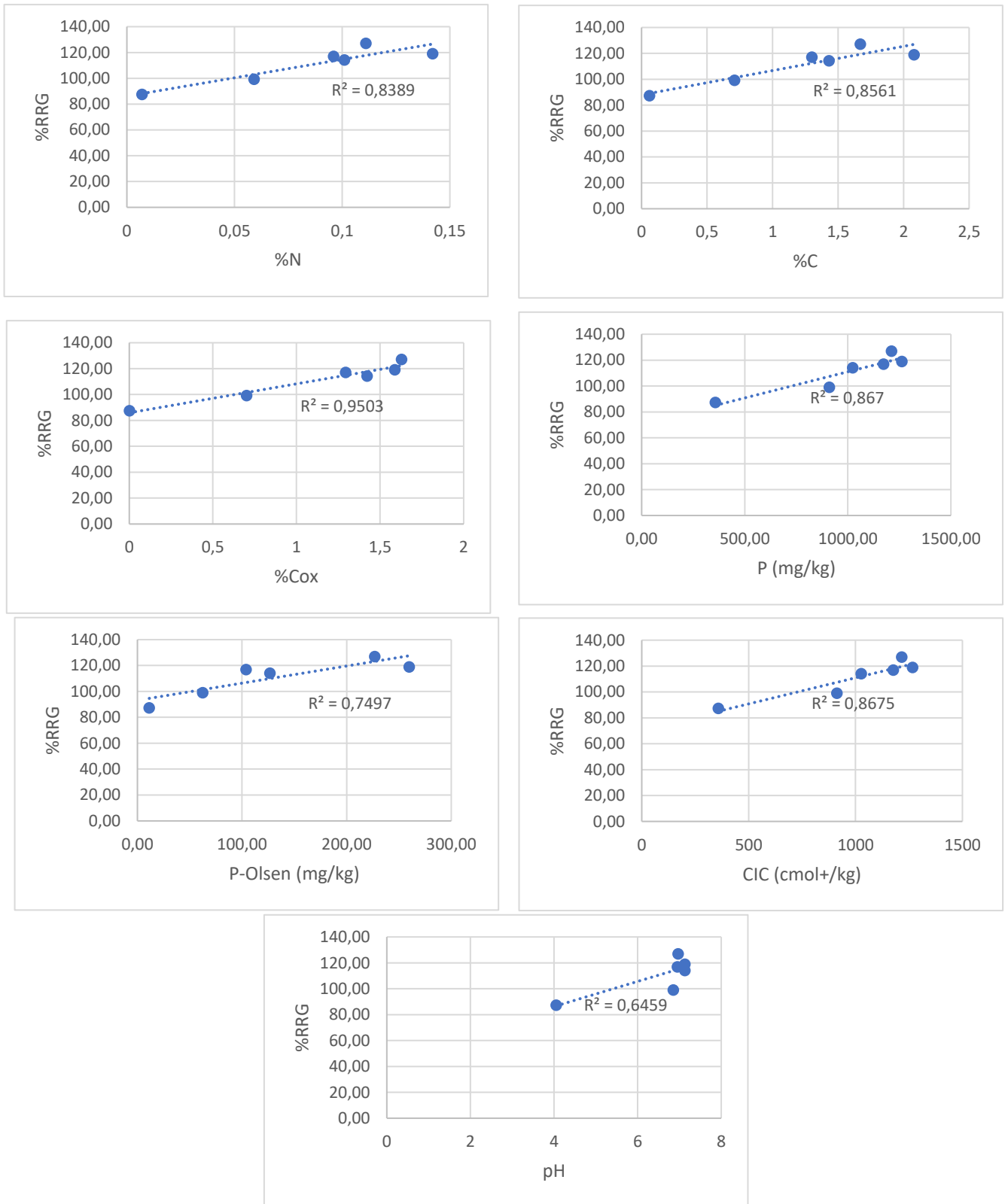


Figura 1: Índices de correlación de %Nitrógeno, %Carbono, %Carbono oxidable, Fósforo total, Fósforo Olsen, CIC y pH con %RRG

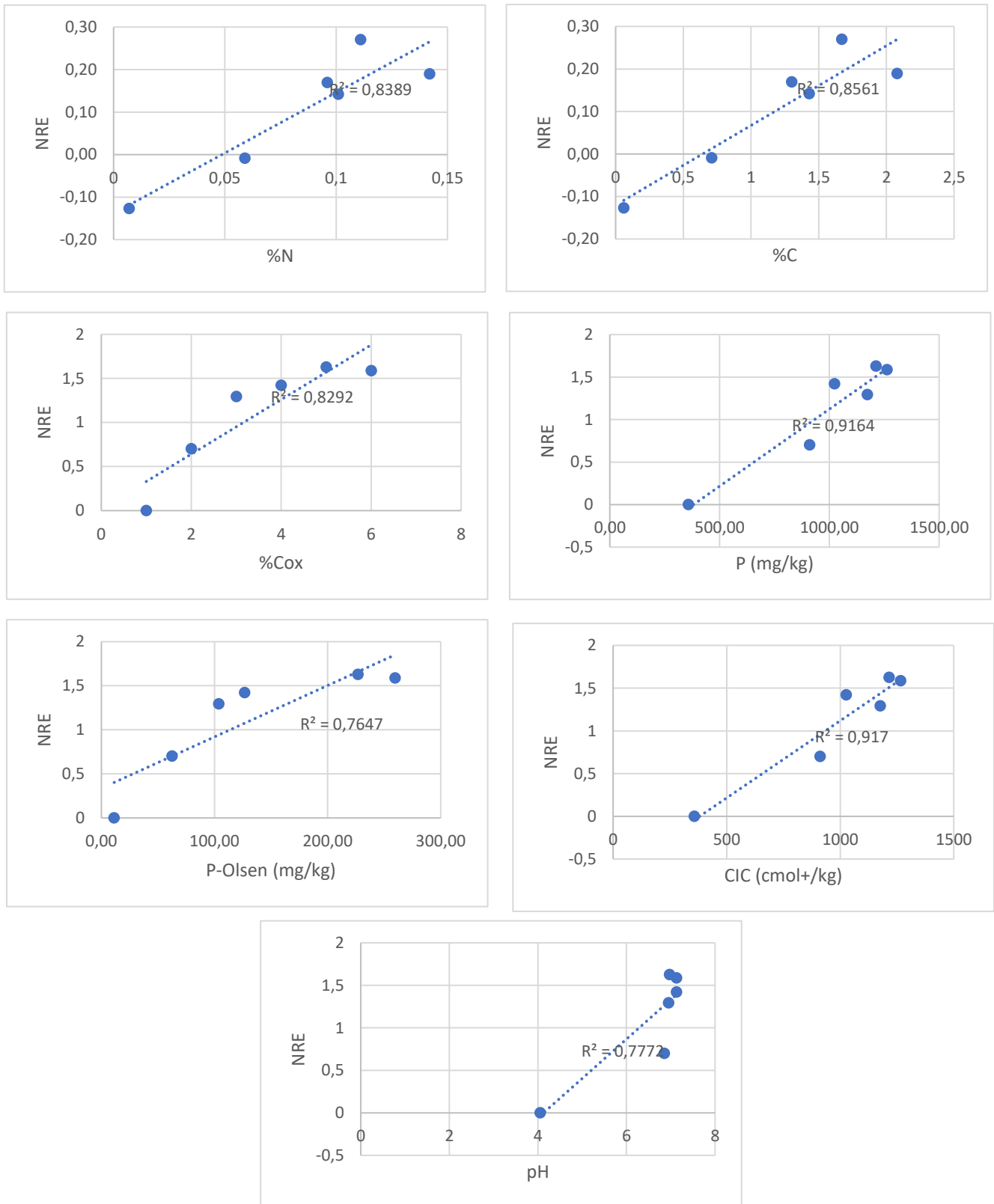


Figura 2: Índices de correlación de %Nitrógeno, %Carbono, %Carbono oxidable, Fósforo total, Fósforo Olsen, CIC y pH con GI

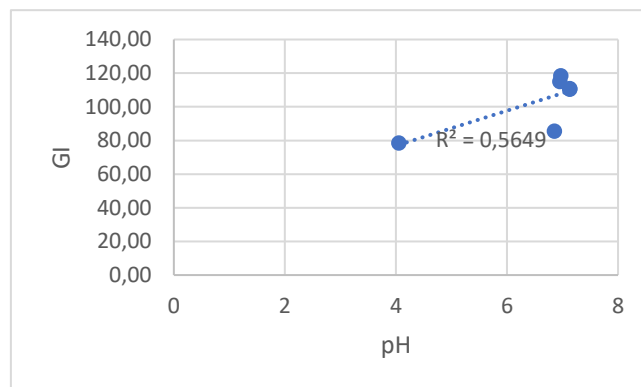
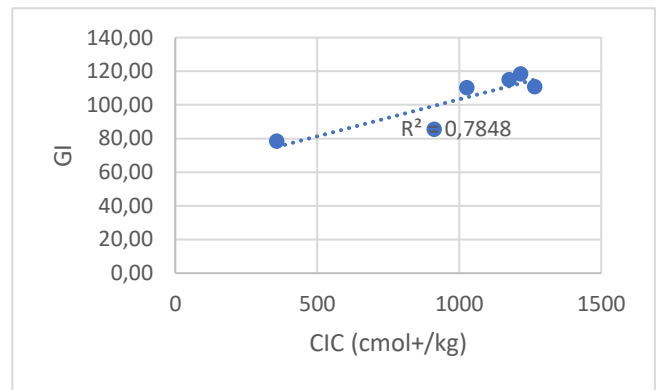
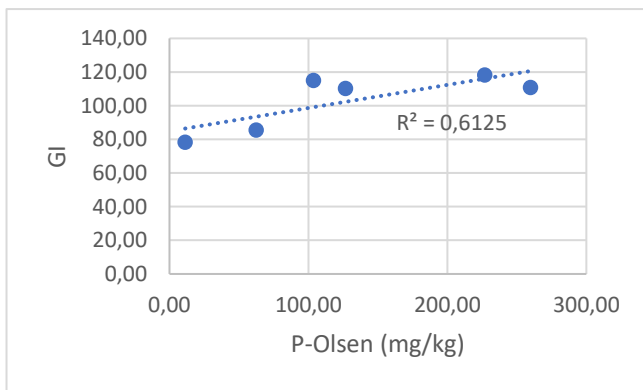
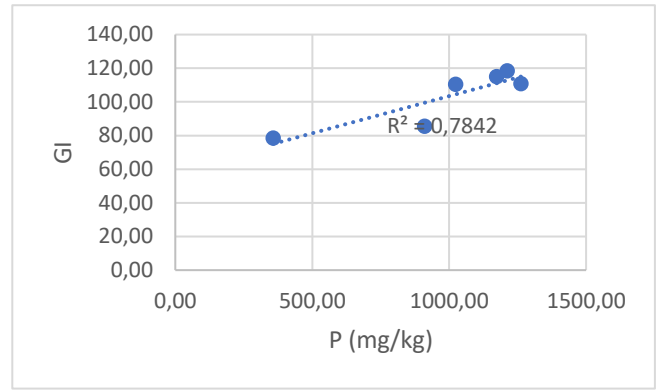
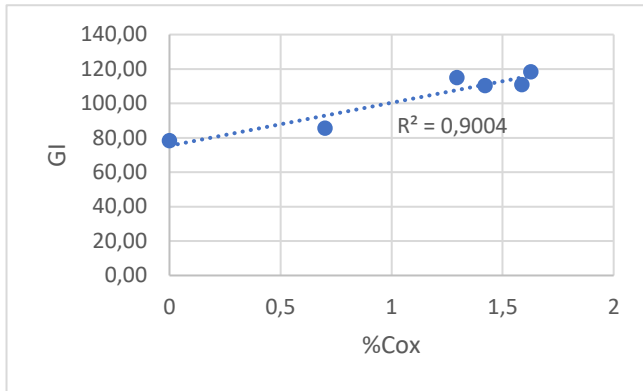
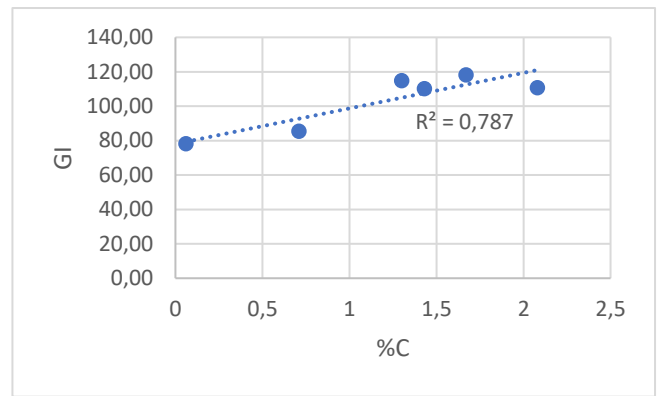
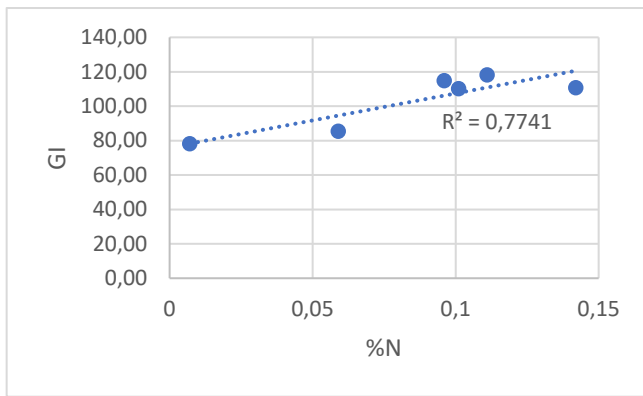


Figura 3: Índices de correlación de %Nitrógeno, %Carbono, %Carbono oxidable, Fósforo total, Fósforo Olsen, CIC y pH con GI