



universidad
de león



FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y AMBIENTALES

ESTUDIO SOBRE LA MEJORA DE LAS

CONDICIONES EDÁFICAS MEDIANTE

LA ADICIÓN DE BIOCHAR, EN SUELOS

AFECTADOS POR DIFERENTES

NIVELES DE SEVERIDAD DE FUEGO

STUDY ON THE IMPROVEMENT OF

EDAPHIC CONDITIONS BY THE

ADDITION OF BIOCHAR IN SOILS

AFFECTED BY DIFFERENT LEVELS OF

FIRE SEVERITY.

Autor: Rosaura del Valle Campo García

Tutores: Elena María Marcos Porras,

Roberto López González

Grado en Ciencias Ambientales

Septiembre, 2023

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Evolución de los incendios forestales.....	1
1.2. Efectos de los incendios forestales.....	2
1.3. Técnicas de recuperación de suelos afectados por incendios forestales.....	2
1.4. Biochar	3
2. MATERIAL Y MÉTODOS	5
2.1. Diseño experimental.....	5
2.1.1. Preparación de las muestras de suelo	5
2.1.2. Siembra de semillas de <i>Pinus pinaster</i>	8
2.2. Seguimiento de la germinación y desarrollo de las plántulas de <i>Pinus pinaster</i>	9
2.3. Análisis de las muestras de suelo	9
2.4. Análisis estadísticos de datos.	10
3. RESULTADOS	10
3.1. Efecto del uso del biochar en suelos calentados a diferentes temperaturas en la germinación de plántulas de <i>Pinus pinaster</i>	10
3.1.1. Germinación	10
3.1.2. Longitud de las plántulas.....	12
3.1.3. Biomasa de las plántulas	14
3.2. Efecto del uso del biochar en la recuperación de las propiedades de un suelo afectado por diferentes niveles de severidad del fuego.....	16
3.2.1. pH.....	16
3.2.2. Carbono de la biomasa microbiana	17
3.2.3. Carbono orgánico	18
4. DISCUSIÓN	19
5. CONCLUSIONES.....	21
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	22

RESUMEN

Los incendios forestales suponen una grave amenaza para el medio ambiente, ya que están cambiando su régimen hacia incendios más extensos y severos, por lo que es fundamental realizar medidas correctoras para minimizar el daño de los mismos. En el presente estudio se ha comparado cómo afecta la adición dos tipos diferentes de biochar (procedente de poda de vid y de poda de olivo) en las propiedades de un suelo afectado por diferentes niveles de severidad de incendio, y en la germinación y crecimiento de plántulas de *Pinus pinaster*. Para alcanzar este objetivo se calentaron suelos simulando 3 niveles de severidad (bajo, medio y alto) y se les adicionó dos tipos de biochar procedente de restos de poda de vid y de olivo.

Se analizaron las siguientes variables: germinación de las plántulas de pino; longitud aérea (LA), radicular (LR) y total, biomasa aérea (BA), radicular (BR) y total; relaciones LA/LR y BA/BR; pH; carbono de la biomasa microbiana y carbono orgánico del suelo. Los resultados exponen que el biochar (mayormente el de vid en este caso) mejora tanto las condiciones de suelos previamente alterados (sobre todo el pH, carbono orgánico y carbono microbiano) como la germinación y crecimiento de las plántulas de *Pinus pinaster*.

Palabras clave: Biochar; Enmienda; Incendios Forestales; *Pinus pinaster*; Suelo.

SUMMARY

Forest fires pose a serious threat to the environment, since they are changing their regime towards more extensive and severe fires, so it is essential to take corrective measures to minimize their damage. In the present study, we have compared how the addition of two different types of biochar (from vine pruning and olive tree pruning) affects the properties of a soil affected by different levels of fire severity, and the germination and growth of *Pinus pinaster* seedlings. To achieve this objective, soils were heated simulating 3 severity levels (low, medium and high) and two types of biochar from vine and olive pruning remains were added.

The following variables were analyzed: germination of pine seedlings; aerial (LA), root (LR) and total length, aerial (BA), root (BR) and total biomass; LA/LR and BA/BR relationships; pH; microbial biomass carbon and soil organic carbon. The results show that biochar (mostly vine char in this case) improves both the conditions of previously altered soils (especially pH, organic carbon and microbial carbon) and the germination and growth of *Pinus pinaster* seedlings.

Keywords: Biochar; Amendment; Forest Fires; *Pinus pinaster*; Floor.

1. INTRODUCCIÓN

Por su frecuencia e intensidad en las últimas décadas, los incendios forestales se han transformado en uno de los mayores problemas medioambientales que afectan a nuestras áreas forestales. En España, entre el decenio de 2006 y 2015 se han producido un total de 131.113 incendios, con una media de 13.111 incendios por año. Estos incendios afectaron a un total de 2.703.609,62 hectáreas (320.277,13 hectáreas de superficie arbolada) (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 2019).

1.1. Evolución de los incendios forestales

La tendencia de los incendios forestales tanto en Europa como en España (Figura 1) es decreciente en lo relativo al número de incendios. Sin embargo, la superficie afectada es creciente debido a que existen un mayor número de Grandes Incendios Forestales (GIFs). Esto puede ser debido, entre otros factores, al cambio climático, puesto que este hace que los periodos de sequía sean cada vez más largos, produciendo que los niveles de humedad de las capas profundas de madera, hojas, suelo y de la materia orgánica en el suelo disminuyan, y por ello aumente el período de sequía haciendo más vulnerables a las masas forestales (Rigo *et al.*, 2017).

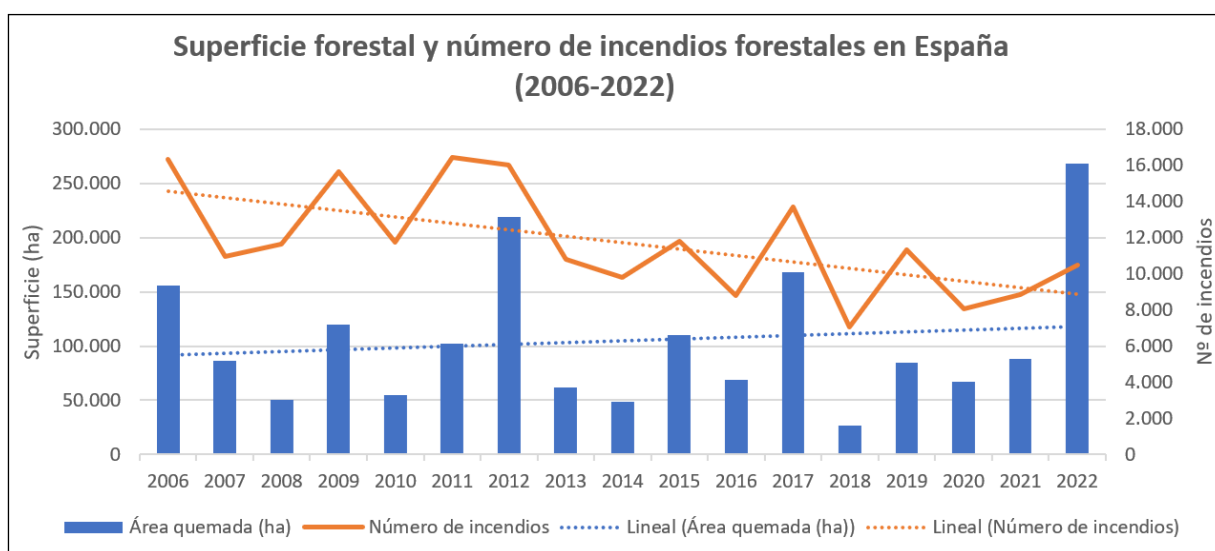


Figura 1. Superficie forestal afectada y nº de incendios forestales ocurridos en España en el periodo 2006-2022.

Fuente: MITECO (MITECO, 2023). Elaboración propia.

1.2. Efectos de los incendios forestales.

Los incendios forestales afectan a la vegetación, suelo, fauna, procesos hidrológicos, procesos geomorfológicos, calidad del agua y composición de la atmósfera (González Ulibarry, 2017). También alteran los ciclos biogeoquímicos, principalmente al ciclo de carbono emitiendo CO₂ y reduciendo su captación (Gobierno de México, 2018).

Se ha puesto de manifiesto que la regeneración de las comunidades vegetales es fuertemente afectada en función de la severidad de los incendios (Huerta *et al.*, 2021). Generalmente, la vegetación tras un incendio disminuye notablemente, pero ésta se puede regenerar mediante tres estrategias: (i) regeneración obligatoria por semillas (plántulas), (ii) rebrote facultativo (plántulas y rebrotes) y/o (iii) rebrote obligado (únicamente rebrote) (Valbuena *et al.*, 2001). En aquellos casos en que no es posible la regeneración natural deben ejecutarse planes de revegetación de las zonas afectadas

Otro componente del ecosistema fuertemente alterado por los incendios es el suelo, debido fundamentalmente a la temperatura alcanzada sobre la superficie del suelo y su duración, así como a los procesos de erosión que se producen por falta de la cubierta vegetal una vez finalizado el incendio.

Entre los principales efectos que el fuego produce sobre el suelo podemos destacar: (i) alteración del ciclo de nutrientes y pérdida por volatilización; (ii) deterioro de la estructura y de la porosidad; (iii) disminución significativa del contenido en materia orgánica (MO) por combustión, carbonización u oxidación completa; (iv) alteración de la composición química por la mineralización de algunas fracciones orgánicas; (v) incremento de los procesos de erosión; y, (vi) aumento de la hidrofobicidad (Cerdini, 2005; Denegri *et al.*, 2014). Además, tanto la cantidad como la composición específica de las comunidades microbianas y los invertebrados que habitan en los suelos se ven alteradas debido a las elevadas temperaturas que se alcanzan en los primeros centímetros o a la generación de contaminantes orgánicos producidos en la combustión (Cerdini, 2005).

1.3. Técnicas de recuperación de suelos afectados por incendios forestales.

Debido a todas estas alteraciones, en muchas ocasiones se necesitan implementar medidas de gestión de las zonas incendiadas para poder proteger y recuperar las propiedades

del suelo que se han visto afectadas por el fuego y favorecer la recuperación de la vegetación y la fauna.

Una de las técnicas más novedosas en el ámbito forestal para restaurar las condiciones edáficas de un suelo y por ello la vegetación y la fauna, es la aplicación de mulching tras el incendio (Vega et al., 2013).

Este tipo de cubierta superficial puede ser de origen tanto natural (paja, coco, cortezas...) como artificial (espumas sintéticas, alginatos...), siendo los más utilizados las cortezas, astillas de madera, hojas secas y paja. (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2008).

En el ámbito forestal, se utiliza para aumentar el éxito en la siembra de herbáceas (Hueso-González *et al.*, 2018), aumentar el carbono orgánico del suelo, la actividad microbológica, la estabilidad de los agregados, y reducir las tasas de escorrentía, y por ello la erosión (Hueso-González *et al.*, 2015).

1.4. Biochar

En el presente estudio, se propone como nueva alternativa de mulching la aplicación de biochar en la superficie de los suelos degradados, para facilitar la recuperación de las condiciones que presentaban antes de su degradación. Esta técnica surge de la búsqueda por reutilizar la biomasa residual de muchas especies vegetales en actividades y productos que provoquen la recirculación de nutrientes y un menor impacto ambiental (Escalante Rebolledo *et al.*, 2016).

El biochar es un producto en estado sólido que resulta de la pirólisis de un material orgánico, y que se ha propuesto como enmienda del suelo para secuestrar carbono, mejorar el crecimiento de las plantas y mejorar las propiedades del suelo (Lehman et al., 2011).

La pirólisis es un proceso termoquímico a alta temperatura (500-800°C) y ausencia de oxígeno al que se somete la biomasa que hace que sus componentes químicos se modifiquen, descompongan y despolimericen. Del proceso se obtienen dos fracciones: (i) una fracción gaseosa (formada por gases no condensables, como H₂ y CO₂, y otros de mayor peso molecular que al condensarse generan un bioaceite) y (ii) una fracción sólida (biochar), rica en carbono. El proceso de pirólisis y el tipo de alimentación determinan la composición

química del biochar. La proporción de cada componente final de la pirólisis depende de la velocidad del calentamiento y la temperatura final que se alcance en la pirólisis, siendo factible maximizar la obtención de la fase sólida en el proceso (Wang *et al.*, 2020).

El biochar presenta ventajas frente a otras enmiendas como un contenido alto en carbono, una alta capacidad de intercambio catiónico y una estructura estable (Rizwan *et al.*, 2015). Este producto aumenta la capacidad de retención de agua y de intercambio catiónico del suelo, amortigua el pH de los suelos ácidos y adsorbe sustancias fitotóxicas (Mitchell *et al.*, 2016).

Con estas características, el biochar se puede utilizar en el medio forestal para mejorar tanto las propiedades fisicoquímicas del suelo como su fertilidad, optimizar el crecimiento de las plantas, disminuir la contaminación de los suelos y aguas, secuestrar carbono en el suelo, disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero (Wang *et al.*, 2020), disminuir el efecto albedo y aumentar la retención de agua en los suelos (Bruckman *et al.*, 2019).

Por ello, el presente estudio tiene como objetivo analizar si la adición de biochar procedente de restos de poda de dos especies mejora las propiedades del suelo y de la germinación y crecimiento de plántulas de *Pinus pinaster*. En concreto se pretende:

1. Analizar si la adición de biochar favorece la germinación de semillas de pino y su posterior desarrollo.
2. Valorar la eficacia del biochar como enmienda para la recuperación de la biomasa microbiana, del carbono orgánica y mejora de las condiciones de pH del suelo.
3. Estudiar si existen diferencias en la eficacia del biochar en función de su procedencia.

La hipótesis que se pretende afirmar o rechazar es que el biochar sí es capaz de mejorar las condiciones edáficas y de germinación y crecimiento de dichas plántulas (Robertson *et al.*, 2012).

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Diseño experimental

2.1.1. Preparación de las muestras de suelo

Los suelos para la realización de este trabajo fueron recogidos en los primeros 5 cm de suelo de un pinar de *Pinus sylvestris* situado en las cercanías de la ermita de Camposagrado (León).

A continuación, este suelo se pasó por un tamiz con una malla de 5 mm de diámetro, para eliminar las posibles partículas que no fuesen el propio suelo, como piedras o pequeñas partes de ramas.

Una vez tamizado, una parte del suelo pasa a ser calentado en una mufla a diferentes temperaturas (100°C, 250°C y 500°C) que simulan tres severidades de incendio (baja, media y alta respectivamente), mientras que otra se dejó sin calentar para usarla como control. El calentamiento se realizó durante una hora usando rampas de temperatura de 100°C. Una vez calentados y enfriados los suelos, se colocaron en macetas de plástico y se procedió a aplicar el biochar sobre los suelos para comenzar el estudio.

Se aplicaron dos tipos de biochar, uno obtenido de restos de poda de vid (BV) y otro de restos de poda de olivo (BO). En la tabla 1, se muestran el análisis inmediato y elemental, así como el pH de los dos tipos de biochar. La tasa de aplicación del biochar fue de 25 t/ha. Esta tasa ha sido seleccionada en base a otros estudios con ecosistemas de características similares, como el de Perry et al. (2015; 2016).

Tabla 1. Análisis inmediato y elemental de los dos tipos de biochar utilizados en el estudio. Fuente: elaboración propia.

PARÁMETROS	BIOCHAR PROCEDENTE DE RESTOS DE PODA DE VID	BIOCHAR PROCEDENTE DE RESTOS DE PODA DE OLIVO
Humedad (%)	1,75	8,26
Materia volátil (%)	13,50	19,65
Carbono fijo (%)	56,80	71,27
Ceniza (%)	29,70	9,08
C (%)	58,59	75,14
H (%)	0,81	3,44
N (%)	0,51	0,51
S (%)	0,06	0,60
O (%)	40,02	20,31
pH	10,33	11,52

De cada tratamiento aplicado (control sin biochar, y con adición de BV y de BO; 100°C sin biochar, y con adición de BV y de BO; 250°C sin biochar, y con adición de BV y de BO; y 500°C sin biochar, y con adición de BV y de BO) se realizaron cuatro réplicas (Figura 2). En total se obtuvieron 48 muestras.

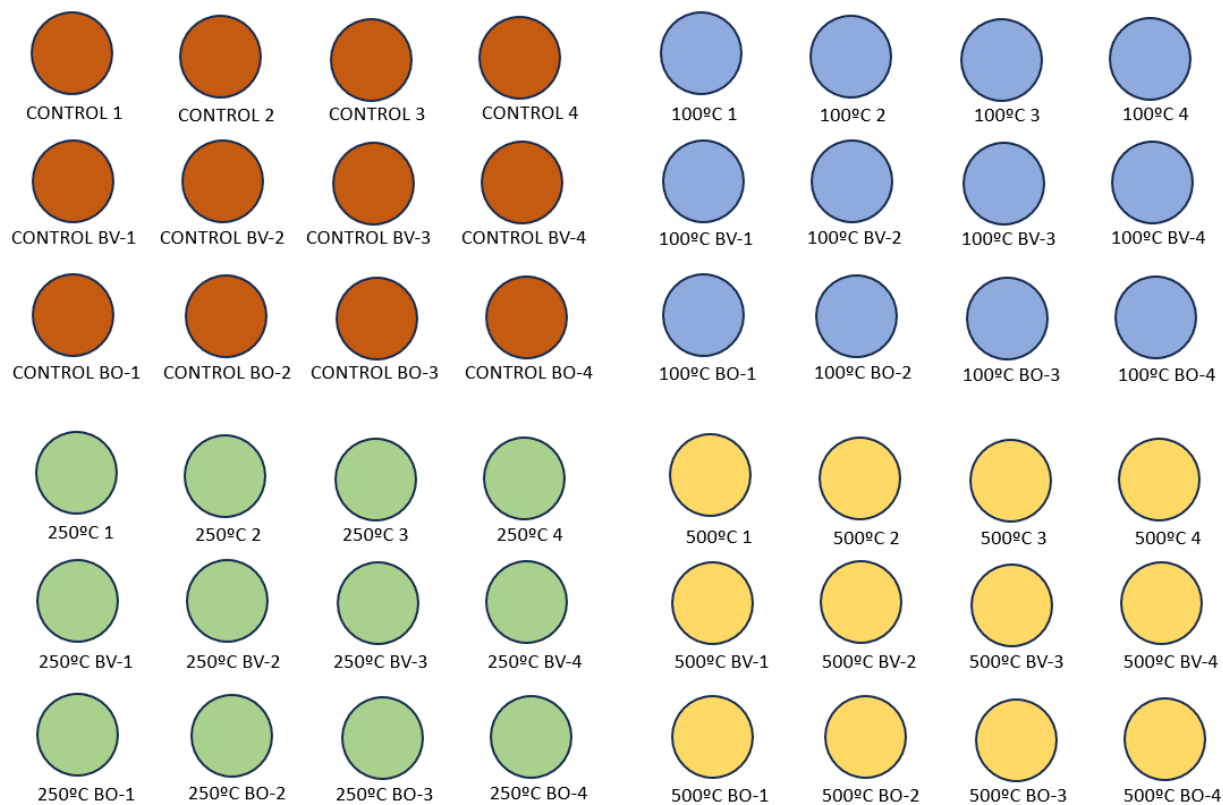


Figura 2. Esquema del diseño experimental realizado en este trabajo. BV: biochar procedente de restos de poda de vid y BO: biochar procedente de restos de poda de olivo.

Las macetas con los diferentes tratamientos se fueron cambiando de lugar cada semana para que existieran menos diferencias entre ellas en cuanto a la disponibilidad de luz. En la figura 3 se muestra una imagen de las distintas macetas ya preparadas para comenzar el proceso.



Figura 3. Macetas preparadas con cada tipo de biochar y severidad del fuego. Fuente: elaboración propia.

2.1.2. Siembra de semillas de *Pinus pinaster*

Una vez preparadas las macetas con el suelo calentado y el biochar, se procedió a realizar la siembra de semillas de *Pinus pinaster*. En cada tiesto, se dispusieron 4 semillas enterradas 1 cm por debajo del biochar, separadas unas de otras de forma aleatoria. La siembra se realizó el 20 de enero de 2021.

Los tiestos se regaron cada 3 días con 100 ml de agua del grifo hasta el día 6 de junio de 2021, cuando acaba la etapa de crecimiento y mediciones de las plántulas y se procede a realizar los análisis necesarios para el estudio.

2.2. Seguimiento de la germinación y desarrollo de las plántulas de *Pinus pinaster*

La primera germinación de estas semillas ocurrió el día 8 de febrero de 2021, 20 días después de la siembra, y una vez a la semana se contaban el número de semillas germinadas. Cuando las plántulas alcanzaron la altura de unos 3 centímetros, se procedió a medir la parte aérea de las mismas con una regla, para observar su progreso de forma semanal.

Una vez acabado el periodo de crecimiento, se sacaron las plántulas de cada maceta con el objeto de medir la longitud radicular y aérea de todas las plantas. Posteriormente se secaron durante 24 horas, para pesar y cuantificar la biomasa seca (aérea, radicular y total) de las plántulas que se habían producido bajo diferentes condiciones de afección al suelo y tipo de biochar,

2.3. Análisis de las muestras de suelo

Una vez retiradas las plántulas se procedió a secar el suelo a temperatura ambiente durante una semana, excepto aquella fracción que fue destinada al análisis del carbono de la biomasa microbiana. Las muestras se tamizaron a 2 mm y en ellas se determinaron las siguientes variables:

- a) pH: La medición del pH de las muestras de suelo se llevó a cabo mediante potenciometría, a través de la mezcla de suelo y agua destilada en proporción 1:2,5 (M.A.P.A., 1986).
- b) Carbono de la biomasa microbiana: Para la medición del carbono microbiano del suelo, en primer lugar, se empleó el método de fumigación-extracción con cloroformo propuesto por Brookes et al. (1985). En segundo lugar, el C de la biomasa microbiana de la muestra fue determinado mediante digestión húmeda según Vance et al. (1987), utilizando un factor KEC de 0,38.
- c) Carbono orgánico oxidable: El carbono orgánico se determinó mediante oxidación húmeda con dicromato potásico (M.A.P.A., 1986). Se trata de un método basado en que la materia orgánica del suelo se oxida en condiciones normalizadas con dicromato potásico en solución de H₂SO₄, y se valora el exceso de dicromato con una solución de hierro amonio II sulfato, utilizando difenilamina como indicador. El carbono orgánico oxidable se obtuvo dividiendo el porcentaje de materia orgánica entre 1,724.

Todos los análisis fueron realizados en el laboratorio del área de Ecología.

2.4. Análisis estadísticos de datos.

Para valorar la eficacia de la adición del biochar en la mejora de la calidad del suelo tras el impacto del fuego y de la germinación y desarrollo de plántulas de pino se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de dos vías, siendo considerados como factores la temperatura (incluido el suelo no quemado) y la procedencia del biochar. Las variables analizadas fueron: germinación de las plántulas de pino; longitud aérea (LA), radicular (LR) y total de las plántulas, biomasa aérea (BA), radicular (BR) y total de las plántulas; relaciones LA/LR y BA/BR; pH; carbono de la biomasa microbiana y carbono orgánico del suelo.

Una vez realizado el análisis en todas las variables, en los casos que se detectaron diferencias significativas ($p < 0,05$), se realizó el test de Tukey para poder ejecutar las comparaciones pertinentes entre los pares de situaciones existentes.

Los análisis estadísticos se llevaron a cabo con el programa IBM SPSS Statistics versión 29 (IBM, 1968).

3. RESULTADOS

3.1. Efecto del uso del biochar en suelos calentados a diferentes temperaturas en la germinación de plántulas de *Pinus pinaster*

3.1.1. Germinación

A partir del ensayo realizado en el laboratorio, se obtuvieron los resultados de la germinación de las plántulas de *Pinus pinaster*, en donde se relaciona el número promedio de plántulas germinadas con respecto al nivel de severidad de fuego, y a la adición de biochar o no, así como el tipo de biochar utilizado, en su caso.

En la figura 4, se observa la evolución semanal de germinación de las plántulas de *Pinus pinaster*. Existe un aumento considerable de germinación entre las semanas 8 y 15, presentando el máximo de germinación en las semanas 9 y 13, exceptuando el suelo no quemado y sin adición de biochar (control). Este aumento se observa sobre todo en el suelo más afectado por la severidad del fuego (500°C), en el que en la semana 8 presentan 12 germinaciones por cada tipo de tratamiento (500°C, biochar de poda de vid y de olivo).

En la figura 5, se presenta la germinación de las plántulas de *Pinus pinaster*, en la que se observa como la adición de biochar afecta significativamente al aumento de la germinación

($F=5,69$; $P=0,007$). Existe un aumento en los suelos no quemados y los quemados a 100°C y 250°C , aunque sólo se encontraron diferencias significativas entre el tratamiento control y el uso de los dos tipos de biochar. Entre las distintas temperaturas no se encontraron diferencias significativas, pero en cambio sí se encontró una interacción significativa ($F= 3,027$; $P=0,017$) entre el biochar y la temperatura debido a que la germinación aumenta con la adición de biochar pero sufre una disminución cuando el suelo es calentado a 500°C .

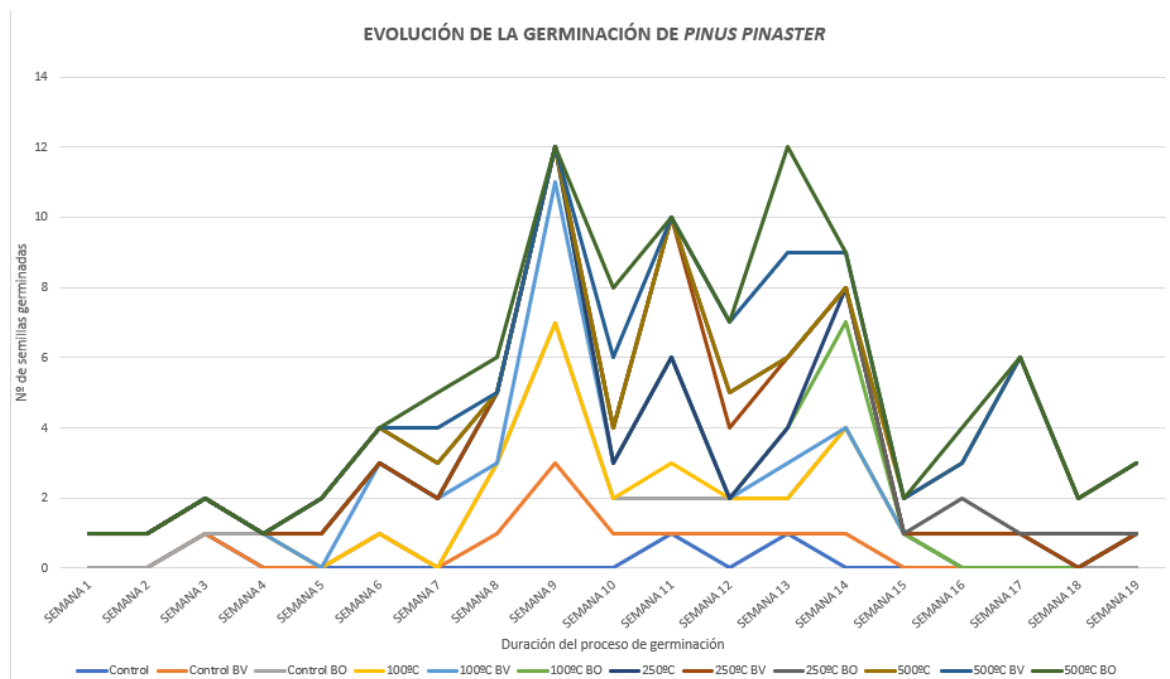


Figura 4. Evolución semanal de la germinación de las plántulas de *Pinus pinaster* sobre los suelos calentados a diferentes temperaturas (Control: sin adición de biochar; BV: biochar procedente de vid ; BO: biochar procedente de olivo)). Fuente: elaboración propia.

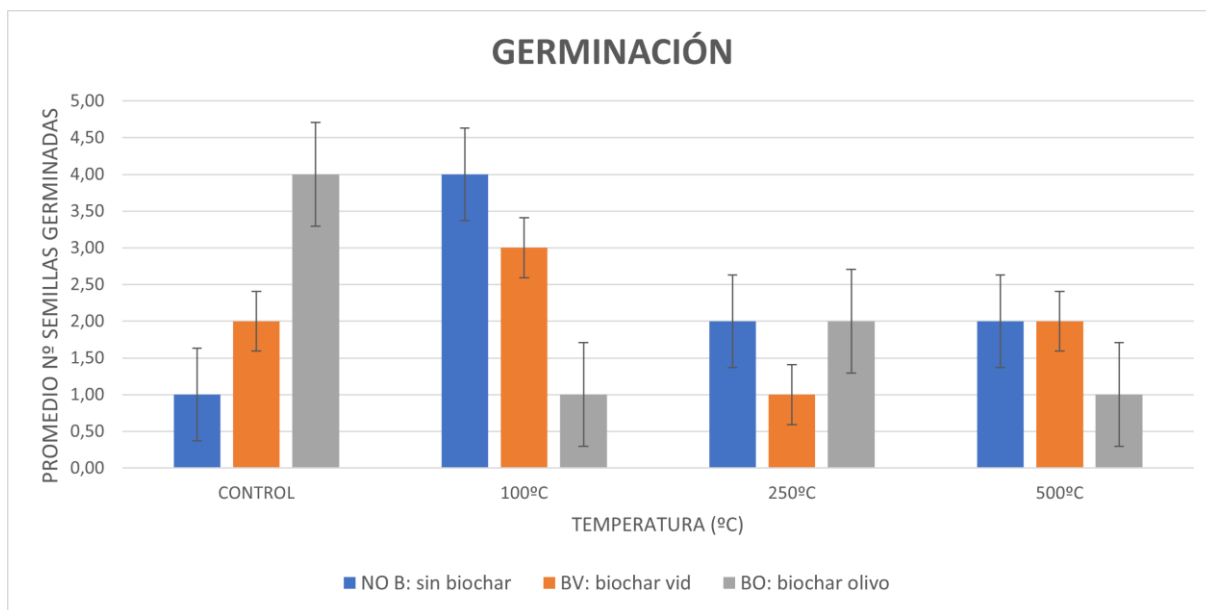


Figura 5. Valores medios y error estándar de la germinación de las plántulas de *Pinus pinaster* sobre los suelos calentados a diferentes temperaturas. Fuente: elaboración propia.

3.1.2. Longitud de las plántulas

En la figura 6 se muestra la longitud total, aérea y radicular de las plántulas de *Pinus pinaster* sobre suelos calentados a diferentes temperaturas y tras añadir los dos diferentes tipos de biochar. De su análisis se desprende que la **longitud aérea** presenta diferencias significativas con la adición de biochar ($F=7,18$; $P=0,002$), pero solamente entre el control y el biochar de poda de vid. Se observa un aumento significativo de la longitud aérea de las plántulas en los suelos principalmente en suelos calentados a 250°C y 500°C. Sin embargo, un patrón opuesto se aprecia en los suelos calentados a 100°C.

En cuanto a la **longitud radicular**, se observa como la adición de biochar de poda de vid aumenta significativamente la longitud radicular de las plántulas ($F=6,35$; $P=0,004$) respecto a la no adición de biochar, presentando el mayor aumento en los suelos calentados a 500°C, que pasa de una longitud de 5,53 cm (sin biochar) a 7,57 cm al añadir biochar de vid. Asimismo, se detectaron diferencias significativas en función de la temperatura ($F=5,13$; $P=0,005$), entre los suelos calentados a 250°C y a 500°C, alcanzando en este último un mayor desarrollo radicular.

La adición de biochar de poda de vid influye significativamente ($F=7,53$; $P=0,002$) en el aumento de la longitud total de las plántulas, especialmente en los suelos calentados a 250°C y 500°C . No se observan diferencias significativas en función de la temperatura.

Por último, la figura 7 representa la ratio resultante de la división entre la longitud aérea y la radicular. No presenta diferencias significativas entre los tratamientos aplicados. Sin embargo, se observa una tendencia de las plántulas a invertir su energía en el desarrollo del crecimiento aéreo con la adición de biochar en los suelos no quemados y los calentados a 250°C y 500°C .

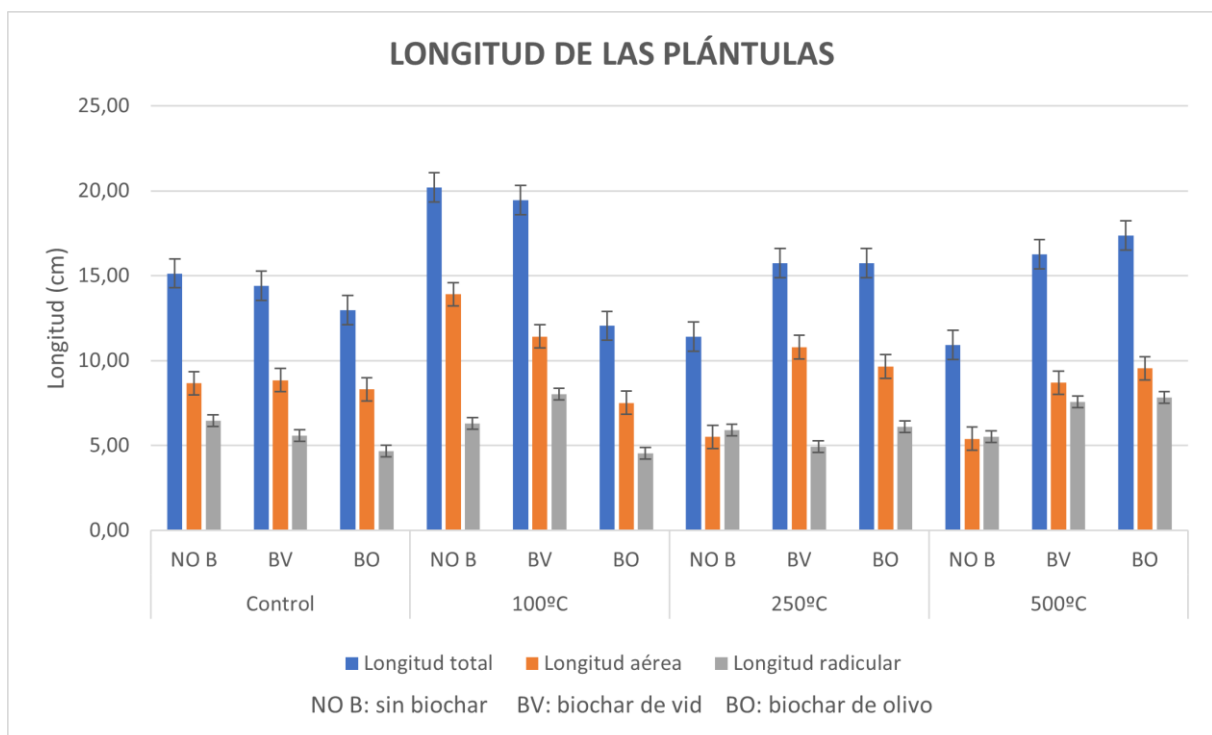


Figura 6. Longitud total, aérea y radicular de las plántulas de *Pinus pinaster* sobre suelos calentados a diferentes temperaturas. Fuente: elaboración propia.

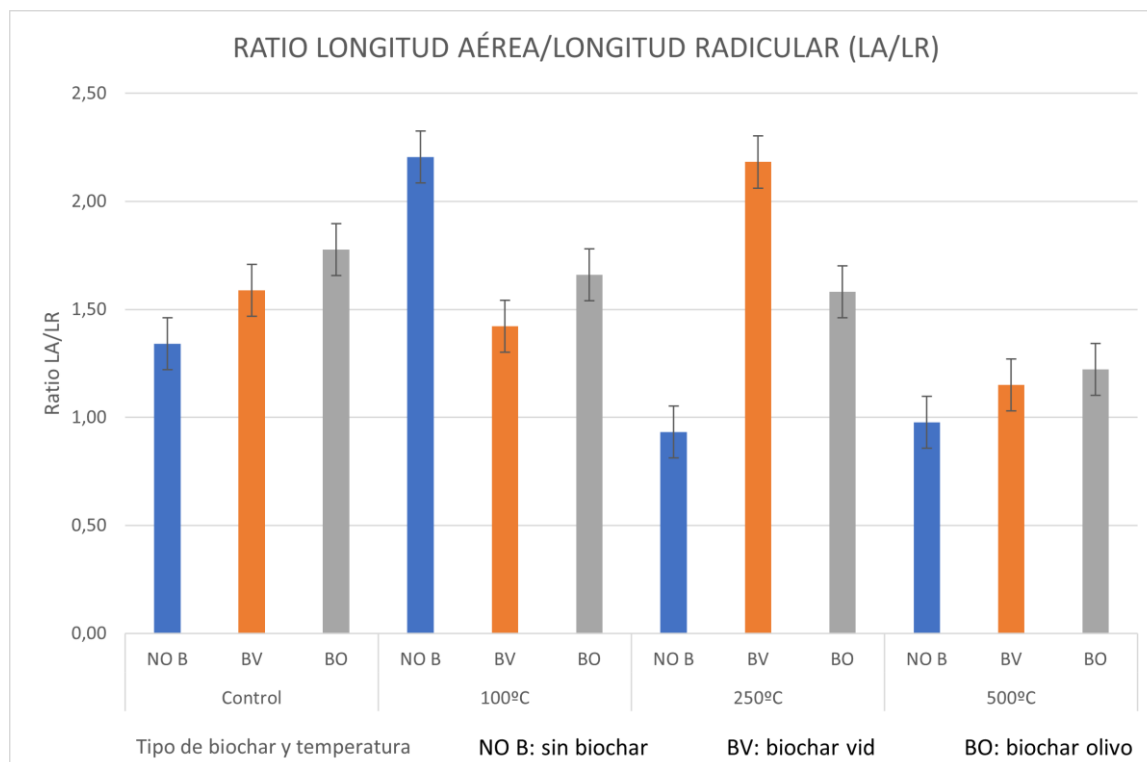


Figura 7. Ratio LA/LR de las plántulas sobre suelo calentado a diferentes temperaturas (azul: sin adición de biochar; naranja: biochar de vid; gris: biochar de olivo. Fuente: elaboración propia.

3.1.3. Biomasa de las plántulas

La figura 8 muestra la biomasa total, aérea y radicular de las plántulas de *Pinus pinaster* sobre suelos calentados a diferentes temperaturas y al añadir dos tipos de biochar diferentes. De la interpretación de la misma se concluye que la **biomasa aérea** presenta diferencias significativas con respecto al uso de biochar ($F=6,34$; $P=0,004$), y sólo entre el control y el biochar de poda de vid (siendo la diferencia máxima pasar de 0,088 g de biomasa promedio en los suelos sin biochar de 100°C, a los 0,25 g de biomasa en los suelos con biochar de poda de vid y quemados a 100°C). Se observa un aumento de la biomasa aérea de las plántulas en todas las temperaturas al añadir biochar de poda de vid.

No se encuentran diferencias significativas al añadir biochar de poda de olivo, en función de la temperatura, pero si una interacción significativa marginal ($F=2,31$; $P=0,055$) entre la adición de biochar y la temperatura.

En cuanto a la **biomasa radicular**, se encontraron diferencias significativas al añadir biochar de poda de vid ($F=13,96$; $P<0,001$) respecto al control. Este biochar muestra un aumento significativo en la biomasa de las plántulas en todas las temperaturas ensayadas.

También se detectan diferencias entre el biochar de poda de vid y de olivo fundamentalmente en suelos sometidos a calentamiento. Asimismo, también el incremento de temperatura afecta de manera significativa al aumento de la biomasa radicular ($F=4,10$; $P=0,013$). Se encontraron diferencias entre 100°C y los 250°C ; y marginalmente entre el no quemado y el quemado a 100°C . Además, se identificó una interacción significativa ($F=6,97$; $P<0,001$) entre el biochar y la temperatura debido a que, en general, la biomasa radicular aumenta con la adición de biochar, pero sufre una ligera disminución a la temperatura de 250°C .

La biomasa total es incrementada significativamente ($F=0,05$; $P=0,003$) por la adición de biochar de poda de vid a las temperaturas de 100°C y 250°C , respecto al control. No se observa una influencia de la temperatura, pero sí una interacción significativa ($F=2,60$; $P=0,034$) entre ambos tratamientos ya que la respuesta al biochar difiere en función de la temperatura alcanzada en el suelo.

Por último, la ratio resultante de la división entre la biomasa aérea y la radicular, únicamente presenta diferencias significativas al aplicar biochar de poda de vid ($F=5,40$; $P=0,009$) con respecto al control, ya que en todos los casos este ratio aumenta excepto en la temperatura de 100°C , donde disminuye.

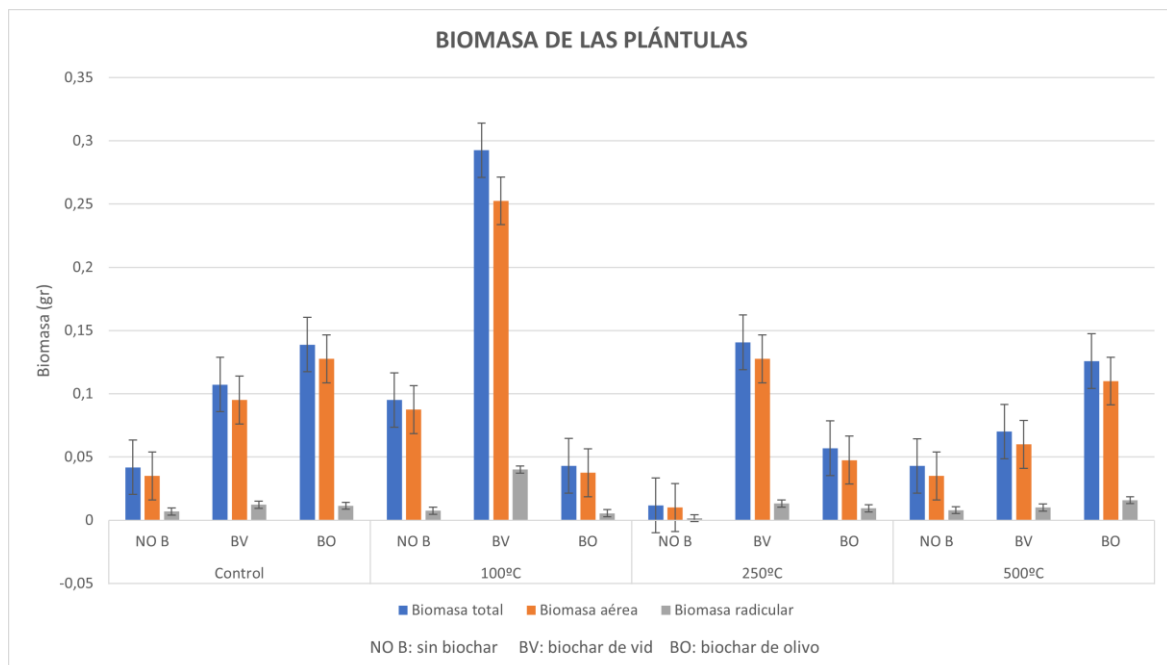


Figura 8. Biomasa total, aérea y radicular de las plántulas de *Pinus pinaster* sobre suelos calentados a diferentes temperaturas. Fuente: elaboración propia.

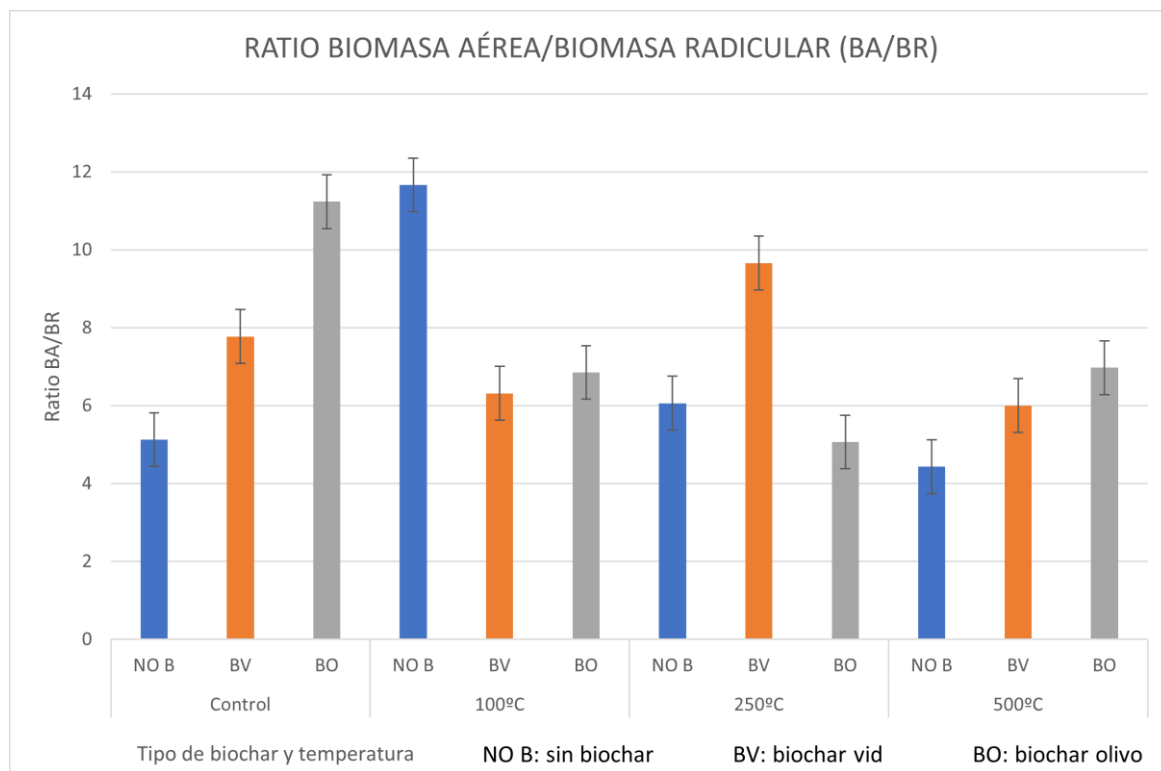


Figura 9. Ratio LA/LR de las plántulas sobre suelo calentado a diferentes temperaturas. Fuente: elaboración propia.

3.2. Efecto del uso del biochar en la recuperación de las propiedades de un suelo afectado por diferentes niveles de severidad del fuego.

3.2.1. pH

Se puede observar en la figura 10 como el incremento de temperatura afecta significativamente al aumento de pH ($F=282,46$; $P<0,001$), siendo este aumento más acentuado en las muestras sin adición de biochar (pasando de un pH de 5,37 en el control a 7,28 en el quemado a 500°C). Se encontraron diferencias significativas entre todos los tratamientos excepto entre el control y los suelos calentados a 100°C. También la procedencia del biochar tiene un efecto significativo ($F=172,85$; $P<0,001$) y beneficioso sobre el pH del suelo incrementando el mismo, sobre todo el biochar procedente de poda de vid. Se detectaron diferencias significativas entre todos los tratamientos de biochar. Asimismo, se identificó una interacción significativa ($F=6,71$; $P<0,001$) entre el biochar y la temperatura debido a que el pH siempre se incrementa con la adición de biochar y temperatura, pero el suelo control sufre una ligera disminución a la temperatura de 100°C.

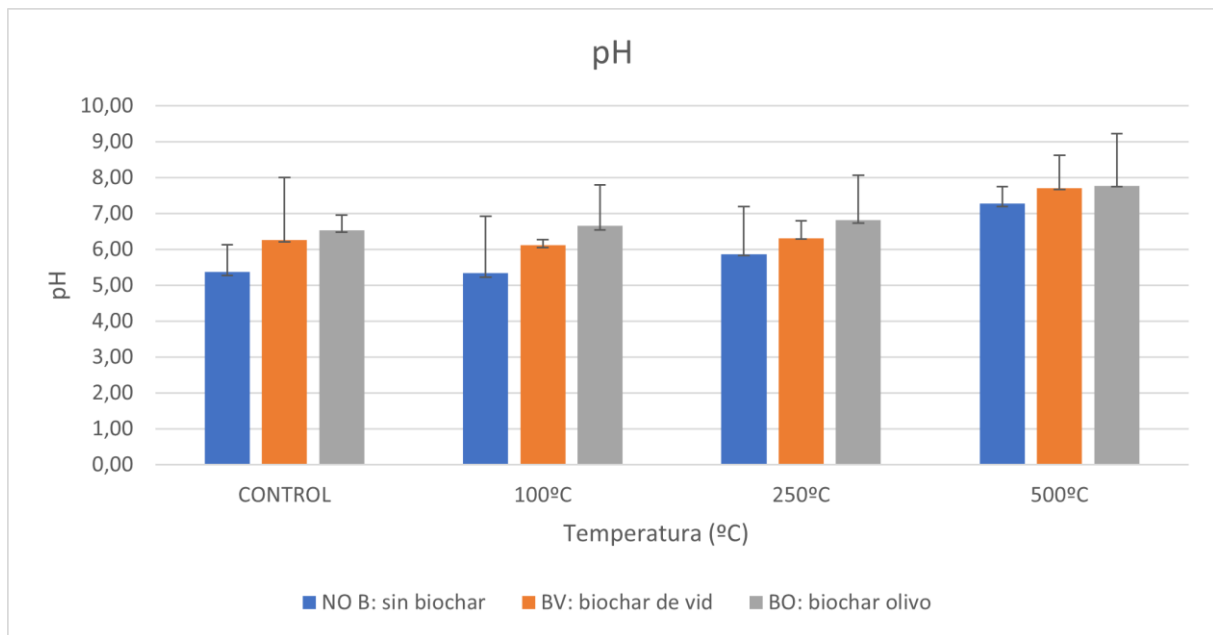


Figura 10. Valores medios y error estándar del pH del suelo calentado a diferentes temperaturas. Fuente: elaboración propia.

3.2.2. Carbono de la biomasa microbiana

En cuanto a la temperatura, se observa en la figura 11 el incremento de ésta afecta significativamente al carbono de la biomasa microbiana ($F=15,85$; $P<0,001$) con una importante disminución en los suelos calentados a 250°C y 500°C. Esta diferencia se observa de manera más acentuada entre los 100°C y los 500°C en los suelos en los que se ha aplicado biochar de poda de olivo (disminuyendo de 388,72 $\mu\text{g/g}$ a 78,53 $\mu\text{g/g}$). Aunque no se encontraron diferencias significativas con la adición de biochar si se observa una tendencia al aumento del carbono de la biomasa microbiana en los suelos más afectados por la temperatura. No se encontraron diferencias en la interacción de ambos factores.

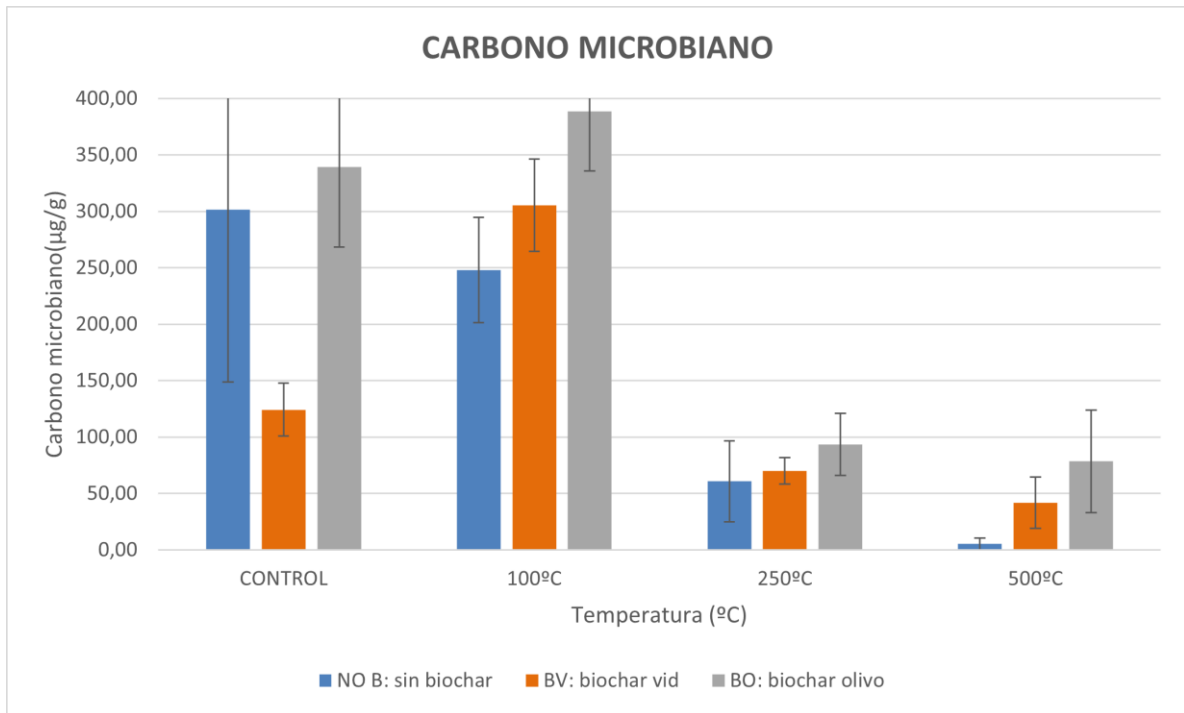


Figura 11. Valores medios y error estándar del carbono microbiano existente en el suelo calentado a diferentes temperaturas. Fuente: elaboración propia.

3.2.3. Carbono orgánico

La figura 12 muestra las variaciones de los valores medios de carbono orgánico y el error estándar que presentan los suelos objeto de estudio.

En el carbono orgánico de los suelos objeto de estudio se encontraron, diferencias significativas en cuanto a la temperatura ($F=57,74$; $P<0,001$), con una clara tendencia a la disminución con temperaturas de 250°C y 500°C. No se encontraron diferencias significativas en la procedencia del biochar y su interacción con la temperatura.

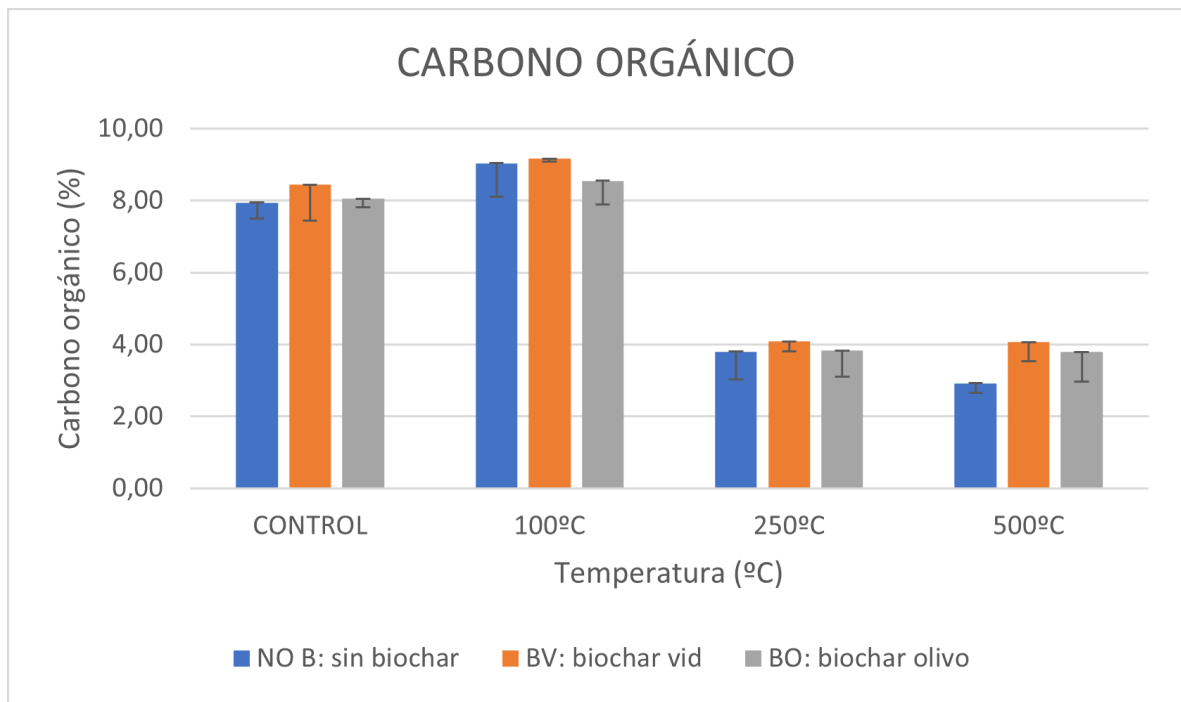


Figura 12. Valores medios y error estándar del carbono orgánico existente en el suelo calentado a diferentes temperaturas. Fuente: elaboración propia.

4. DISCUSIÓN

Los resultados dan a conocer la eficacia del biochar como enmienda en la germinación y crecimiento de plántulas de *Pinus pinaster* y la mejora del pH del suelo cuando se aplica en suelos afectados por diferentes niveles de severidad de fuego.

En primer lugar, se observa un claro aumento de la germinación al aplicar el biochar excepto en el caso de los suelos más afectados por la severidad del fuego (500°C) en los que se muestra una leve disminución, que podría estar relacionados con los numerosos cambios sufridos por el suelo (Certini, 2005) y con la duración del experimento. Un mayor número de germinación de especies leñosas tras un incendio favorece una recuperación más rápida del ecosistema afectado, por lo que resulta positivo. En otros trabajos se encuentran resultados dispares en condiciones similares de estudio. Por ejemplo, Sean, (2020) en coníferas de climas templados, encontró que el biochar provocó un efecto promedio positivo pero pequeño en la germinación de estas. En cambio, según Reyes *et al.*, (2015) el biochar inhibe, disminuye o no condiciona significativamente la germinación en la mayoría de las especies que estudiaron (frondosas y coníferas).

La longitud de las plántulas aumenta al añadir biochar en los niveles de severidad de incendio más altos (250°C y 500°C), mientras que en el control y en los 100°C se observa una leve disminución de la misma. Esto puede deberse a que al añadir el biochar en los suelos más afectados, estos captan los nutrientes más rápidamente ya que existe menos competencia y mayores condiciones favorables a microescala. Además, según el estudio realizado por Calvo *et al.*, (2007) el fuego tiene efectos directos sobre la supervivencia de las plántulas, al cambiar el contenido de nutrientes minerales del ambiente.

En general, excepto en el caso del biochar de olivo en 100°C, se observa un aumento bastante importante en la biomasa de las plántulas, lo que afirma que la adición de biochar mejora el estado de las plántulas que han germinado, lo cual se puede traducir en un mejor establecimiento de los pinos tras un incendio (Palviainen *et al.*, 2020). El estudio de Robertson *et al.*, (2012) confirma el hecho de que la aplicación del biochar produce un aumento de la biomasa en los pinos y frondosas estudiados.

Generalmente, el incremento de temperatura supone un aumento del pH del suelo debido a la liberación de cationes y a la eliminación de sustancias orgánicas (Marcos *et al.*, 2007). En todos los niveles de severidad de fuego, se ha encontrado un aumento del pH del suelo al añadir biochar respecto de la situación en la que no se hizo. No obstante, otros trabajos como el de Noyce *et al.* (2015) afirman que la adición de biochar no altera significativamente el pH del suelo en su ensayo. Estos hallazgos contrastantes entre diferentes estudios pueden atribuirse a diferencias en la materia prima del biochar, el proceso de pirólisis y las distintas propiedades del suelo, además de las del medio ambiente local (Dai *et al.*, 2017).

El carbono de la biomasa microbiana es uno de los factores más importantes en el desarrollo y conservación del suelo, y uno de los más perjudicados por el efecto del fuego (Iglesias, 2008; Fernández-García *et al.*, 2019). La adición de biochar ha producido en general un aumento en los niveles de carbono microbiano, lo que indica que esta adición produce una mejora en el suelo objeto de estudio. Esta teoría se puede respaldar en otros estudios como se indica en la revisión de Lehmann *et al.*, (2011), en la que se afirma que la biomasa microbiana aumenta como resultado de la adición de biochar.

En general, el uso del biochar ha producido un ligero aumento del carbono orgánico del suelo estudiado. Este aumento se considera positivo puesto que estos componentes proporcionan elementos como el N, que normalmente se encuentra de manera deficitaria en el

suelo (Martínez *et al.*, 2008). Además, el aumento del carbono orgánico en el suelo produce de manera indirecta una mitigación del cambio climático mediante el secuestro del mismo en el suelo (Sarauer *et al.*, 2018).

En resumen, el biochar puede ser una opción considerable a utilizar en la recuperación de suelos afectados por incendios forestales, ya que se observa que, obteniendo un biochar con unas condiciones químicas determinadas, se puede lograr mejorar las condiciones tanto edáficas como de la vegetación tras la perturbación, y agilizar en cierta medida la recuperación del mismo.

Estas mejoras se han observado sobre todo en enmiendas realizadas en suelos agrícolas, en donde estudios como los de Cooper *et al* (2020), Dai *et al* (2020), Harris *et al* (2019) afirman que el uso un biochar con características determinadas y para un determinado tipo de suelo produce efectos beneficiosos para las propiedades de los suelos y el crecimiento de las plantas.

5. CONCLUSIONES

1. El uso del biochar sobre suelos previamente alterados por el paso del fuego mejora la germinación de *Pinus pinaster*, así como el crecimiento y el incremento de biomasa en las primeras etapas de desarrollo de las plántulas de pino.
2. La adición de biochar también mejora propiedades del suelo como el pH, y ayuda a la recuperación del carbono de la biomasa microbiana y carbono orgánico del suelo tras su considerable disminución después del fuego.
3. El biochar de poda de vid ha sido con el que se ha conseguido unos resultados más beneficiosos en cuanto a los factores estudiados (germinación y crecimiento de las plántulas, y cambio en las condiciones edáficas del suelo estudiado).
4. Se ha podido observar que la adición de biochar puede producir efectos positivos en los factores indicados anteriormente ante la recuperación de un ecosistema tras un incendio forestal, siendo un tipo de mulching muy accesible y ecológico, puesto que los restos de poda son utilizados frecuentemente en combustiones controladas. Sin embargo, pirolizarlos y cambiar su composición química se genera un biochar con características interesantes para su aprovechamiento de una manera mucho más eficiente y sostenible.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Brookes, P. C., Landman, A., Pruden, G. & Jenkinson, D. S., (1985) “Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: A rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil” *Soil Biology and Biochemistry*, 17(6), pp. 837-842.
2. Bruckman, V. & Pumpanen, J. (2019) “Chapter 17 - Biochar use in global forests: opportunities and challenges”, *Developments in Soil Science*, 36, pp. 427-453.
3. Calvo, L., Santalla, S., Valbuena, L., Marcos, E. *et al.* (2007) “Post-fire natural regeneration of a *Pinus pinaster* forest in NW Spain”, *Plant Ecology*, 197, pp. 81-90.
4. Cerdini, G. (2001) “Effects of fire on properties of forest soils: a review”, *Oecología*, 143, pp. 1-10.
5. Cooper, J *et al* (2020) “Effect of biochar and compost on soil properties and organic matter in aggregate size fractions under field conditions”, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 295.
6. Dai, Y., Zheng, H., Jiang, Z., & Xing, B. (2020) “Combined effects of biochar properties and soil conditions on plant growth: A meta-analysis”, *Science of The Total Environment*, 713.
7. Dai, Z., Zhang, X., Tang, C., Muhammad, N. *et al.* (2016) “Potential role of biochars in decreasing soil acidification - A critical review”, *Science of The Total Environment*, 581-582, pp. 601-611.
8. Denegri, A., Toranzo, L., Rubenacker, A., Campitelli, P. *et al.* (2014) “Efecto de los incendios forestales sobre las propiedades del suelo”, *NEXO Agropecuario*, 2(1-2), pp. 10-14.
9. Escalante Rebolledo, A., Pérez López, G., Hidalgo Moreno, C., López Collado, J. *et al.* (2016) “Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo”, *Terra latinoamericana*. DOI.
10. Fernández-García, V., Marcos, E., Fernández-Guisuraga, J.M., Taboada, A. *et al.* (2019) “Impact of burn severity on soil properties in a *Pinus pinaster* ecosystem immediately after fire”, *International Journal of Wildland Fire* 28, pp. 354-364.

11. Gobierno de México (2018) *Incendios forestales y cambio climático*. Disponible en: <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/incendios-forestales-y-cambio-climatico> (Accedido: 27 de abril de 2023).
12. González Ulibarry, P. (2017) “Impacto de los incendios forestales en suelos, agua y vegetación” *Departamento de estudios, extensión y publicaciones*. DOI.
13. Huerta, S., Fernández-García, V., Marcos, E., Suárez-Seoane, S. *et al.* (2021) “Physiological and Regenerative Plant Traits Explain Vegetation Regeneration under Different Severity Levels in Mediterranean Fire-Prone Ecosystems”, *Forests*, 12 (2), pp. 149.
14. Hueso-González, P., Martínez-Murillo, J.M., & Ruiz-Sinoga, J.D. (2018) “Restoration techniques applying organic amendments: six years of benefits on soil forest properties”, *Cuadernos de Investigación Geográfica de la Universidad de La Rioja*, 44, nº 2.
15. Hueso-González, P., Martínez-Murillo, J.F., Romero Díaz, J.D., & Ruiz-Sinoga, J.D. (2015) “Métodos para la restauración del suelo y recuperación de la cubierta vegetal en un ambiente forestal mediterráneo”, *Análisis espacial y representación geográfica: innovación y aplicación*, pp. 1679-1688.
16. IBM (1968) *IBM SPSS Statistics (Versión 29) [Programa de ordenador]*. Disponible en: <https://www.ibm.com/support/pages/downloading-ibm-spss-statistics-29> (Accedido el 12 de agosto de 2023)
17. Iglesias, M.T. (2009) “Estudio del carbono de la biomasa microbiana en suelos alterados”, *Lazaroa*, 29, pp. 117-123.
18. Lehmann, J., C. Rillig, M., Thies, J., A. Masiello, C. *et al.* (2011) “Biochar effects on soil biota – A review”, *Soil Biology & Biochemistry*, 43, pp. 1812-1836.
19. Li, S., Harris, S., Anandhi, A., & Chen, G. (2019) “Predicting biochar properties and functions based on feedstock and pyrolysis temperature: A review and data syntheses”, *Journal of Cleaner Production*, 215, pp. 890-902.

20. Marcos, E.; Tárrega, R.; Luis, E. (2007) “Changes in a Humic Cambisol heated (100-500°C) under laboratory conditions: The significance of heating time”, *Geoderma*, 138, pp. 237-243.
21. Martínez, E., Fuentes, J.P., & Acevedo, E. (2008) “Carbono orgánico y propiedades del suelo”, *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal*, 8, pp. 68-96.
22. Mataix-Solera, J y Cerdá, A. (2009) “Los efectos de los incendios forestales en los suelos. Síntesis y conclusiones. Nuevos retos en la investigación y en la gestión”, en Universidad de Valencia (ed.) *Efectos de los incendios forestales sobre los suelos de España: El estado de la cuestión visto por los científicos españoles*. 1ª ed. Valencia: Universidad de Valencia, Cátedra Divulgación de la Ciencia, pp. 493-529.
23. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (2019) *Los incendios Forestales en España- Decenio 2006-2015*. Madrid: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Secretaría General Técnica.
24. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (1986). *Métodos Oficiales de Análisis. Tomo III*. Madrid: Secretaría General técnica del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
25. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (2008) *Inventario de tecnologías disponibles en España para la lucha contra la desertificación*. Ficha de la tecnología. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.
26. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2023) *Avances informativos de los incendios forestales*. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/temas/incendios-forestales/estadisticas-avances.aspx> (Accedido: 24 de abril de 2023).
27. Mitchell, P., J. Simpson, A., Soong, R., S. Schurman, J. *et al.* (2016) “Biochar amendment and phosphorus fertilization altered forest soil microbial community and native soil organic matter molecular composition”, *Biogeochemistry*, 130, pp. 227-245.
28. Noyce, G., Basiliko, N., Fulthorpe, R., Sackett, R. *et al.* (2015) “Soil microbial responses over 2 years following biochar addition to a north temperate forest”, *Biology and Fertility of Soils*, 51, pp. 649-659.

29. Palviainen, M., *et al* (2020) “Biochar amendment increases tree growth in nutrient-poor, young Scots pine stands in Finland”, *Forest Ecology and Management*, 474.
30. Perry J, M., André J, S., Ronald, S., Jonathan S, S. *et al.* (2016) “Biochar amendment and phosphorus fertilization altered forest soil microbial community and native soil organic matter molecular composition”, *Biogemistry*, 130, pp. 227-245.
31. Perry J, M., André J, S., Ronald, S., & Myrna J, S, (2015) “Shifts in microbial community and water-extractable organic matter composition with biochar amendment in a temperate forest soil”, *Soil Biology and Biochemistry* 81, pp. 244-254.
32. Reyes, O., Kaal, J., Arán, D., Gago, R. *et al.* (2015) “The Effects of Ash and Black Carbon (Biochar) on Germination of Different Tree Species”, *Fire Ecology*, 11, pp. 119-133.
33. Rizwan, M., Ali, S., Farooq Qayyum, M., Ibrahim, M. *et al.* (2015) “Mechanisms of biochar-mediated alleviation of toxicity of trace elements in plants: a critical review”, *Environ Sci Pollut Res*, 23, pp. 2230-2248.
34. Rigo, D., Libertà, G., Houston Durrant, T., Artés Vivancos, T., San-Miguel-Ayanz, J. (2017) *Forest fire danger extremes in Europe under climate change: variability and uncertainty*. European Commission.
35. Robertson, S J., Rutherford, M., López-Gutiérrez, J., & Massicotte, H. (2012) “Biochar enhances seedling growth and alters root symbioses and properties of sub-boreal forest soils”, *Canadian Journal of Soil Science*, 92(2), pp. 329-340.
36. Robertson, S., Michael, P., López-Gutiérrez, J. & Massicotte, H. (2012) “Biochar enhances seedling growth and alters root symbioses and properties of sub-boreal forest
37. Sarauer, J., Page-Dumroese, D., & Coleman, M. (2018) “Soil greenhouse gas, carbon content, and tree growth response to biochar amendment in western United States forests”, *GCB Bioenergy*, 11, pp. 660-671.
38. Sean, C.T. (2020) “Biochar effects on germination and radicle extension in temperate tree seedlings under field conditions”, *Canadian Science Publishing*, 51(1).

39. Valbuena, L., Nuñez, R., & Calvo, L. (2001) “The seed bank in Pinus stand regeneration in NW Spain after wildfire”, *Web Ecology*, 2, pp. 22-31.
40. Vance, E. D., Brookes, P. C. & Jenkinson, D. S., (1987) “An extraction method for measuring soil microbial biomass C. Soil” *Biology and Biochemistry*, 19(6), pp. 703-707.
41. Vega, J.A., Fontúrbel, T., Fernández, C., Arellano, A. *et al.* (2013) *Acciones urgentes contra la erosión en áreas forestales quemadas. Guía para su planificación en Galicia*. Santiago de Compostela: Xunta de Galicia.
42. Wang, D., Jiang, P., Zhang, H., & Yuan, W. (2020) “Biochar production and applications in agro and forestry systems: A review”, *Science of the Total Environment*, 723.