



**2025** | **16-20**  
GIJÓN | JUNIO

9º CONGRESO **FORESTAL** ESPAÑOL

**9CFE-1573**

---

Organiza





## El uso de biochar mejora las condiciones de los suelos forestales y la germinación y desarrollo de plántulas de *Pinus pinaster*

MARCOS, E. (1), DEL VALLE CAMPO, R. (1), PINTO, R. (1) y LÓPEZ GONZÁLEZ, R. (2)

(1) Área de Ecología. Departamento de Biodiversidad y Gestión Ambiental.  
Universidad de León

(2) Área de Química Física. Departamento de Química y Física Aplicadas.  
Universidad de León.

### Resumen

En las últimas décadas, se ha observado un incremento en el número y la intensidad de los Grandes Incendios Forestales (GIF). Por lo tanto, resulta fundamental implementar medidas correctoras para minimizar los daños en los ecosistemas forestales. Este trabajo evalúa el efecto de la adición de dos tipos de biochar en algunas propiedades de un suelo afectado por diferentes niveles de severidad de fuego, así como en la germinación y el crecimiento, a corto plazo, de plántulas de *Pinus pinaster*. Para ello, se sometieron muestras de suelo a un calentamiento en laboratorio simulando tres niveles de severidad (baja, media y alta), a las cuales se les incorporaron dos tipos de biochar procedentes de restos de poda de vid y de olivo. Posteriormente, se realizó una siembra de semillas de *Pinus pinaster*. Se analizaron variables como la germinación de las plántulas de pino; la longitud aérea (LA), radicular (LR) y total; la biomasa aérea (BA), radicular (BR) y total; las relaciones LA/LR y BA/BR; el pH; el carbono de la biomasa microbiana; y el carbono orgánico del suelo. Los resultados indican que el biochar, especialmente el proveniente de restos de vid, mejora tanto las propiedades de los suelos previamente alterados (en particular, el pH, el contenido de carbono orgánico y el carbono microbiano) como la germinación y el crecimiento de las plántulas de pino.

### Palabras clave

Biomasa, carbono del suelo, enmienda orgánica, germinación, severidad.

### 1. Introducción

En las últimas décadas, los incendios forestales se han transformado en uno de los principales problemas medioambientales que afectan a nuestros ecosistemas forestales. Aunque el número de incendios tiende a disminuir, la superficie afectada se ha visto incrementada (MITECO, 2023) debido a un mayor número de Grandes Incendios Forestales (GIFs). Estos GIFs pueden ser favorecidos, entre otras causas, por el despoblamiento rural y los periodos de sequía de mayor duración que hacen más vulnerables a las masas forestales (RIGO et al., 2017).

Los incendios forestales afectan a la estructura y funcionamiento de los ecosistemas forestales (GONZÁLEZ ULIBARRY, 2017), a través de los cambios en el reciclaje de nutrientes, composición de especies y biodiversidad (AGBESHIE et al., 2022), y su impacto puede ser variable en función de la severidad alcanzada en el incendio (HUERTA et al., 2021). Uno de los componentes del ecosistema más afectados es el suelo, ya que los incendios afectan a un amplio rango de procesos como cambios en la calidad de la materia orgánica, alteración del ciclo de nutrientes, deterioro de su estructura o incremento de los procesos erosivos (CERDINI et al., 2005; DENEGRI et al., 2014; AGBESHIE et al., 2022). Así mismo, estas



alteraciones pueden influir en la capacidad de la vegetación para su regeneración (FERNÁNDEZ-GARCÍA et al., 2019).

Como consecuencia de estas alteraciones es necesario implementar medidas de gestión sostenibles con el fin de mejorar la calidad del suelo afectado por el fuego. Una de las alternativas a otros métodos usados en la actualidad (ej.: mulching) es la aplicación de biochar. 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). 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).

## 2. Objetivos

El objetivo principal es evaluar si la adición de dos tipos de biochar puede ser una herramienta que favorece la recuperación de los ecosistemas forestales afectados por incendios. En este trabajo se pretende: (1) Analizar el impacto de la temperatura sobre la germinación de semillas de pino rodeno y su posterior desarrollo, así como sobre el suelo. (2) Valorar la eficacia del biochar como enmienda para la recuperación del pino rodeno y el suelo forestal y, (3) Determinar si existen diferencias en la eficacia del biochar en función de su procedencia.

## 3. Metodología

### 3.1. Diseño experimental

Para la realización del experimento se recogieron muestras de suelo en los primeros 5 cm de un pinar situado en las cercanías de León (NW de la Península Ibérica). El suelo se tamizó con una malla de 5 mm de diámetro y se calentó en una mufla a diferentes temperaturas (100°C, 250°C y 500°C) simulando tres severidades de incendio (baja, media y alta respectivamente) (CAON et al., 2014). Otra parte 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 y se aplicaron dos tipos de biochar: uno obtenido de restos de poda de vid (BV) y otro de restos de poda de olivo (BO). La tasa de aplicación del biochar fue de 25 t/ha, la cual fue seleccionada en base a otros estudios como los de PERRY et al. (2015; 2016), realizados en ecosistemas de características similares. Se ensayaron los siguientes tratamientos: (1) control sin biochar, y con adición de BV y de BO; (2) 100°C sin biochar, y con adición de BV y de BO; (3) 250°C sin biochar, y con adición de BV y de BO; y (4) 500°C sin biochar, y con adición de BV y de BO. En total se trabajó con 48 muestras (4 temperaturas x 3 tratamientos de biochar x 4 réplicas por tratamiento=48 muestras).

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 en enero y se regaron cada 3 días con 100 ml de agua hasta junio.

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

El número de semillas germinadas se contó semanalmente desde el momento de la siembra. Cuando las plántulas alcanzaron unos 3 cm de altura, se midió la parte aérea para observar su crecimiento semanal. Una vez acabado el periodo de crecimiento, se sacaron las plántulas de cada maceta y se midió su longitud aérea y radicular. Posteriormente se secaron durante 24 horas, para pesar y cuantificar la biomasa seca (aérea, radicular y total) de las plántulas.

### **3.3. Análisis de suelos**

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 que se almacenó a  $-18^{\circ}\text{C}$ . Las muestras se tamizaron a 2 mm y en ellas se determinó el pH en agua (1:2,5) (M.A.P.A., 1986); el carbono de la biomasa microbiana mediante fumigación-extracción con cloroformo (BROOKES et al., 1985) y digestión húmeda utilizando un factor KEC de 0,38 (VANCE et al., 1987); y el carbono orgánico mediante oxidación húmeda con dicromato potásico (M.A.P.A., 1986)

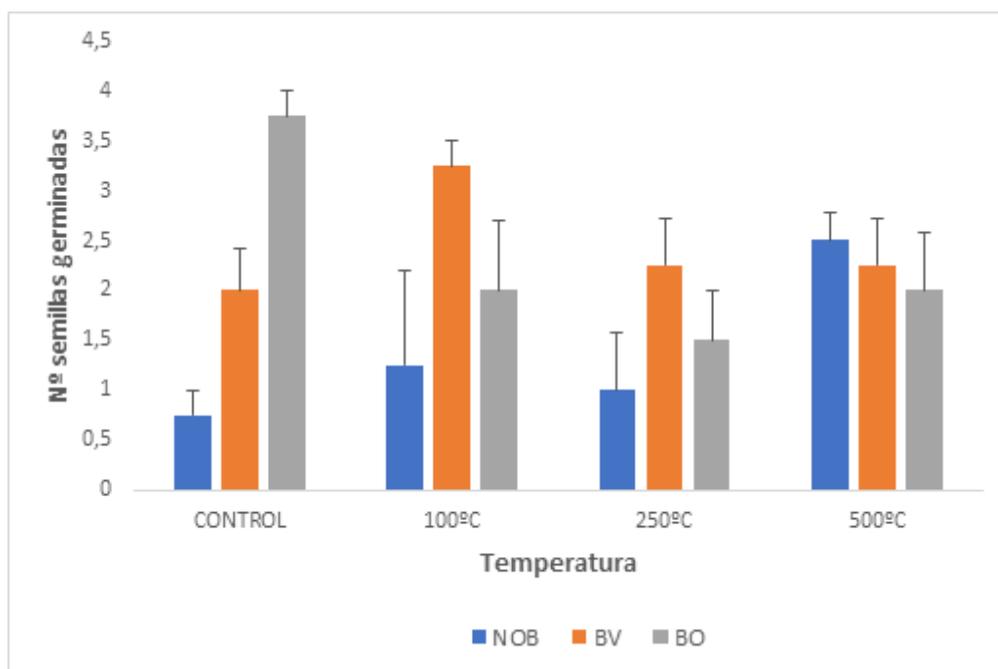
### **3.4. Tratamiento de datos**

Para valorar la eficacia de la adición del biochar en el suelo y en 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 (olivo y vid). 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; pH; carbono de la biomasa microbiana y carbono orgánico del suelo. En los casos que se detectaron diferencias significativas ( $p < 0,05$ ), se realizó la prueba de Tukey para poder ejecutar las comparaciones entre los pares de situaciones existentes. Los análisis estadísticos se llevaron a cabo con el programa IBM SPSS Statistics versión 29 (IBM, 2022).

## **4. Resultados**

### **4.1. Efecto del biochar y la temperatura de calentamiento en la germinación de plántulas de *Pinus pinaster***

No se encontró un efecto significativo de la temperatura en la germinación. Sin embargo, la adición de biochar tanto de olivo como de vid, incrementa significativamente la germinación ( $F=5,69$ ;  $P=0,007$ ) en los suelos no quemados. Además, se detectó 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 en los suelos no quemados o quemados a  $100^{\circ}\text{C}$  y  $250^{\circ}\text{C}$ , pero tiende a disminuir en los quemados a  $550^{\circ}\text{C}$  (Figura 1).



*Figura 1. Valores medios y error estándar de la germinación de las plántulas de Pinus pinaster sobre los suelos calentados a diferentes temperaturas y tipos de biochar*

La longitud aérea presenta diferencias significativas con la adición de biochar ( $F=7,18$ ;  $P=0,002$ ), pero solamente entre los suelos no tratados y los de biochar de poda de vid, siendo este efecto más visible en suelos calentados a 250°C y 500°C (Figura 2). Asimismo, la adición de biochar de poda de vid aumenta significativamente la longitud radicular de las plántulas ( $F=6,35$ ;  $P=0,004$ ), 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.

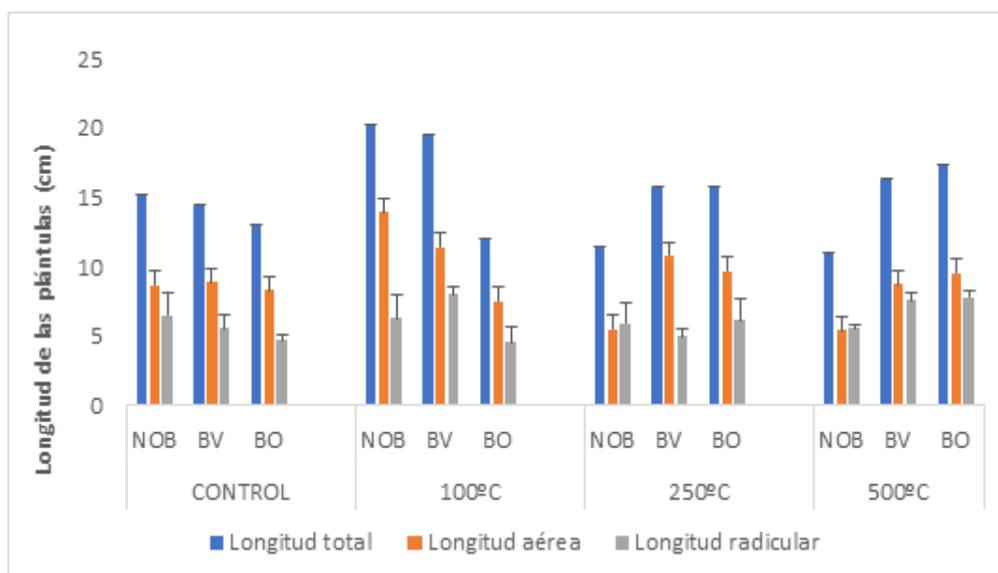


Figura 2. Longitud total, aérea y radicular de las plántulas de *Pinus pinaster* sobre suelos calentados a diferentes temperaturas y tipos de biochar

La biomasa aérea incrementa significativamente con la adición del biochar de vid ( $F=6,34$ ;  $P=0,004$ ) en todas las temperaturas de calentamiento. No se encuentran diferencias significativas 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, ya que la respuesta del suelo a la adición de biochar es diferente en cada 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 resto. Este biochar muestra un aumento significativo en la biomasa de las plántulas en todas las temperaturas ensayadas (Figura 3). 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 250°C. Además, se identificó una interacción significativa ( $F=6,97$ ;  $P<0,001$ ) entre el biochar y la temperatura. 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 si 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 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.

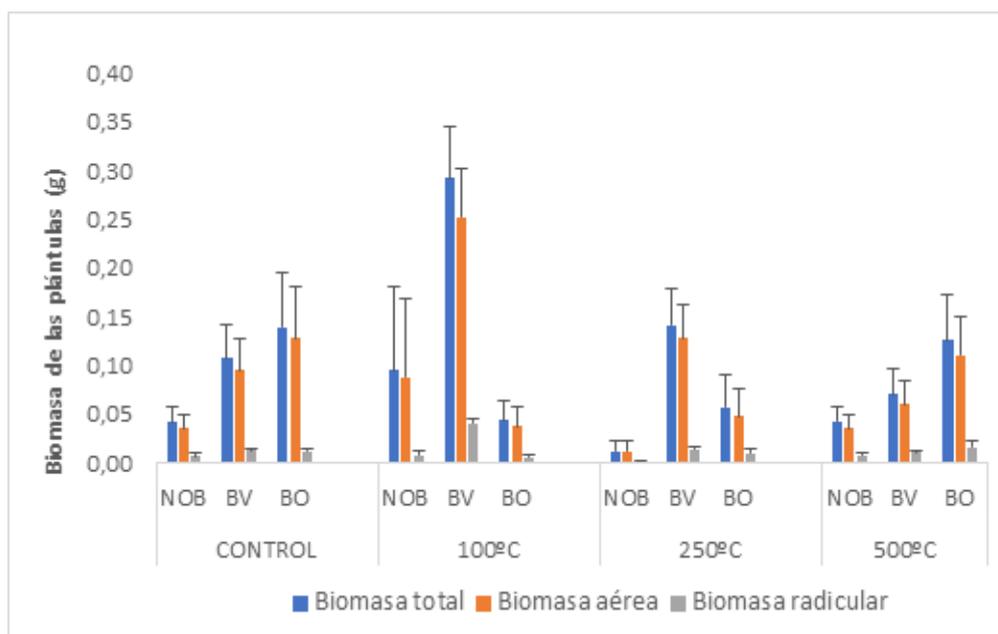


Figura 3. Biomasa total, aérea y radicular de las plántulas de *Pinus pinaster* sobre suelos calentados a diferentes temperaturas y tipos de biochar.

#### 4.2. Efecto del biochar en un suelo afectado por diferentes niveles de severidad del fuego.

El incremento de temperatura afecta significativamente al aumento de pH ( $F=282,46$ ;  $P<0,001$ ), siendo este aumento más acentuado en los suelos calentados a 500°C (pasando de un pH de 5,37 en el control a 7,28 en el quemado a 500°C). Además, la aplicación 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 olivo. Se detectaron diferencias significativas entre todos los tratamientos. 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, exceptuando en el calentamiento de 100°C (Tabla 1).

El incremento de temperatura 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. 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, principalmente los suelos tratados con biochar de olivo (Tabla 1).

La temperatura también influye significativamente en el carbono orgánico de los suelos ( $F=57,74$ ;  $P<0,001$ ), con una clara tendencia a la disminución con el calentamiento a 250°C y 500°C. Sin embargo, no se encontraron diferencias significativas en relación a la adición de biochar, aunque se observa una tendencia a incrementar su contenido al añadir biochar de vid, independientemente de la temperatura de calentamiento (Tabla 1).

Tabla 1. Valores medios y error estándar del pH, carbono de la biomasa microbiana y carbono orgánico presente en el suelo calentado a diferentes temperaturas y tipos de biochar

Tratamiento	pH	Carbono biomasa microbiana ( $\mu\text{g} / \text{g}$ )	Carbono orgánico (%)
NOB-C	5,4 (0,1)	301,7 (153,1)	7,9 (0,4)
NOB-100°C	5,3 (0,1)	248,0 (46,5)	9,0 (0,9)
NOB-250°C	5,9 (0,0)	60,7 (36,1)	3,8 (0,7)
NOB-500°C	7,3 (0,1)	5,2 (5,2)	2,9 (0,3)
BV-C	6,3 (0,1)	124,2 (23,4)	8,4 (1,0)
BV-100°C	6,1 (0,1)	305,4 (41,0)	9,2 (0,1)
BV-250°C	6,3 (0,0)	70,1 (11,8)	4,1 (0,3)
BV-500°C	7,7 (0,0)	41,9 (22,6)	4,1 (0,5)
BO-C	6,5 (0,1)	339,2 (70,8)	8,0 (0,2)
BO-100°C	6,7 (0,1)	388,7 (52,9)	8,5 (0,7)
BO-250°C	6,8 (0,1)	93,4 (27,5)	3,8 (0,7)
BO-500°C	7,8 (0,1)	78,5 (45,5)	3,8 (0,8)

## 5. Discusión

La temperatura alcanzada en los suelos durante el calentamiento tiende a disminuir la capacidad de germinación de las plántulas, sobre todo las que se han sembrado en suelos calentados a altas temperaturas. Un patrón semejante se observa tanto en la longitud como en la biomasa de las plántulas. Solamente los suelos calentados a 100°C parecen tener un efecto positivo sobre la germinación y el desarrollo de las plántulas (longitud y crecimiento).

Las temperaturas alcanzadas en un incendio y su tiempo de permanencia producen cambios importantes en las propiedades del suelo que podrían influir en el establecimiento de la vegetación. 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; HINOJOSA et al., 2021). Por otro lado, 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 de la temperatura (IGLESIAS, 2008; FERNÁNDEZ-GARCÍA et al., 2019). Su disminución está relacionada con la pérdida de biomasa microbiana y la liberación de compuestos que limitan la recuperación de las comunidades fúngicas (FERNÁNDEZ-GARCÍA et al., 2019). El mismo patrón muestra el carbono orgánico, tal y como señalan otros autores. A partir de unos 200°C comienzan las pérdidas de carbono orgánico completando su combustión alrededor de 500°C (MARCOS et al., 2007; BADÍA et al., 2014). Esta pérdida puede ser debida a un incremento de la mineralización, volatilización o combustión del carbono (RODRIGUEZ CARDONA et al., 2020), mientras que a temperaturas más bajas puede incrementar su contenido debido a un aumento del carbono pirogénico como resultado de la combustión incompleta de la materia orgánica (SANTIN et al., 2018).



Ante la situación producida por el paso del fuego, el biochar podría ser una opción a utilizar en la recuperación de suelos más afectados por incendios forestales y en favorecer las condiciones para la regeneración de la vegetación. La adición de biochar tanto de olivo como de vid produce efectos diferentes que dependen de la temperatura de calentamiento del suelo. Así, la germinación de plantas de pino es favorecida por la adición de biochar cuando los suelos no han sido afectados por un incendio. Estos resultados son semejantes a los encontrados por SEAN (2020) en bosques de coníferas de climas templados, donde la adición de biochar provocó un efecto positivo en la germinación. Este efecto positivo también ha sido observado en el crecimiento longitudinal tanto aéreo como radical el cual es más visible en aquellos suelos calentados a temperaturas más altas (250°C y 500°C). Por otro lado, se observa un aumento en la biomasa de las plántulas que han germinado con la adición de biochar, lo cual se puede traducir en un mejor establecimiento de los pinos tras un incendio (PALVIANEN et al., 2020). Resultados semejantes han sido reportados por ROBERTSON et al. (2012) confirma el hecho de que la aplicación del biochar produce un aumento de la biomasa en los pinos y frondosas de bosques suboreales. Estos resultados pueden estar relacionados con una mayor disponibilidad de pH y potasio o la absorción de fenoles inhibidores de la germinación en la capa de hojarasca como consecuencia de la adición de biochar (SEAN, 2020)

No solamente el biochar puede mejorar el estado de las plántulas de pino, sino también las condiciones del suelo. 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. El biochar, generalmente tiene un pH superior a 7,0. En este caso concreto el pH del biochar oscilaba entre 10 y 11 para ambos tipos, haciéndolo adecuado como material de encalado (BOLAN et al., 2023). Otro beneficio es su capacidad de amortiguación del pH del suelo. Su alcalinidad y alta capacidad de amortiguación del pH sugiere que la adición de biochar podría elevar moderadamente el pH ácido del suelo (LI et al., 2024). 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 resultados que difieren entre las investigaciones realizadas pueden atribuirse a diferencias en la materia prima del biochar, el proceso de pirólisis y las distintas propiedades del suelo, además del medio ambiente local (DAI et al., 2020). La adición de biochar ha producido un aumento en los niveles de carbono microbiano, lo que puede ser debido a que el biochar posee una estructura altamente porosa con una gran superficie específica, proporcionando hábitats ideales para los microorganismos del suelo (HILL et al., 2019), mejorando la disponibilidad de nutrientes, y estimulando la actividad y eficiencia de las comunidades microbianas. Estos efectos combinados contribuyen a una mayor acumulación de carbono en la biomasa microbiana, mejorando la salud y fertilidad del suelo (KUMAR et al., 2025). Este resultado se puede respaldar con 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. También, el uso del biochar ha producido un ligero aumento del carbono orgánico del suelo estudiado, aunque en algunos casos después de la adición de biochar el contenido de carbono orgánico en los suelos llega a ser semejante al control sin quemar (JIAO et al., 2024). 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).

A pesar de que ambos tipos de biochar comparten beneficios comunes, como la



mejora de la fertilidad del suelo y la captura de carbono, los biochar empleados en este trabajo presentan diferencias en su composición química, propiedades físicas y efectos específicos en el suelo y las plantas. Por ejemplo, un estudio indica que el biochar de sarmiento de vid puede tener un contenido de carbono fijo y cenizas diferente al de olivo, afectando su capacidad para mejorar la fertilidad del suelo (VIDEGAIN et al., 2019). Mientras que el biochar de olivo es rico en carbono estable, lo que le confiere la capacidad de secuestrar carbono atmosférico y almacenarlo en el suelo durante largos períodos, contribuyendo a la mitigación del cambio climático. En este trabajo, el biochar de vid parece ser más adecuado para mejorar las condiciones de suelo y de vegetación.

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. Estos efectos ya se han observado en enmiendas realizadas en suelos agrícolas, donde estudios como los de LI et al (2019), COOPER et al (2020) y DAI et al (2020), afirman que el uso de 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.

## 6. Conclusiones

Las altas temperaturas del suelo, tienen efectos adversos en la germinación, longitud y biomasa de las plántulas. El incremento de temperatura incrementa el pH del suelo, pero disminuye el carbono de la biomasa microbiana y el carbono orgánico. La adición de biochar, derivado de residuos como olivo o vid, mejora las condiciones del suelo y favorece la regeneración vegetal. Sin embargo, los efectos específicos del biochar dependen del material de origen (e.g., vid vs. olivo), composición química y proceso de pirólisis. El biochar de olivo tiene una mayor capacidad para secuestrar carbono a largo plazo, mientras que el de vid parece ser más adecuado para mejorar condiciones vegetativas. Aunque los efectos positivos son evidentes, existen variaciones en los resultados según las características del suelo, el entorno y el tipo de biochar utilizado. El biochar emerge como una herramienta prometedora para restaurar la funcionalidad del suelo, mejorar la regeneración vegetal y mitigar los efectos negativos del fuego en los ecosistemas.

## 7. Agradecimientos

Los autores agradecen al Prof. J. Cara y col. por el suministro del biochar utilizado en este estudio.

## 8. Bibliografía

AGBESHIE, A.A.; ABUGRE, S.; ATTA-DARKWA, T.; AWUAH, R.; 2022. A review of the effects of forest fire on soil properties. *J For Res* 33 1419-1441.

BADIA, D.; MARTÍ, C.; AGUIRRE, A.J.; AZNAR, J.M.; GONZÁLEZ-PÉREZ, J.A.; DE LA ROSA, J.M.; LEÓN, J.; IBARRA, P.; ECHEVARRÍA, T.; 2014. Wildfire effects on nutrients and organic carbon of a Rendzic Phaeozem in NE Spain: changes at cm-scale topsoil. *Catena* 113 267-275

BOLAN, S.; HOU, D.; WANG, L.; HALE, L.; EGAMBERDIEVA, D.; TAMMEORG, P.; LI,



R.; WANG, B.; XU, J.; WANG, T.; SUN, H.; PADHYE, L.P.; SUN, H.; WANG, H.; SIDDIQUE, K.H.M.; RINKLEBE, J.; KIRKHAM, M.B.; BOLAN, N.; 2023. The potential of biochar as a microbial carrier for agricultural and environmental applications. *Sci Total Environ* 886 163968.

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 Biol Biochem* 17(6) 837-842.

CAON L.; VALLEJO, V.R.; RITSEMA, C.J.; GEISSEN, V.; 2014. Effects of wildfire on soil nutrients on Mediterranean ecosystems. *Earth Sci Rev* 139 47-58

CERDINI, G.; 2001. Effects of fire on properties of forest soils: a review. *Oecología* 143 1-10.

COOPER, J.; GREENBER, I.; LUDWIG, B.; HIPPICH, L., FISCHER, D.; GLASER, B.; KAISER, M.; 2020. Effect of biochar and compost on soil properties and organic matter in aggregate size fractions under field conditions. *Agric Ecosyst Environ* 295 106882

DAI, Y.; ZHENG, H.; JIANG, Z.; XING, B.; 2020. Combined effects of biochar properties and soil conditions on plant growth: A meta-analysis. *Sci Total Environ* 713 136635.

DENEGRI, A.; TORANZO, L.; RUBENACKER, A.; CAMPITELLI, P.; KARLIN, M.; 2014. Efecto de los incendios forestales sobre las propiedades del suelo. *NEXO Agropecuario* 2(1-2) 10-14.

ESCALANTE REBOLLEDO, A.; PÉREZ LÓPEZ, G.; HIDALGO MORENO, C.; LÓPEZ COLLADO, J. 2016. Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo. *Terra Latinoamericana* 34(3) 367-382.

FERNÁNDEZ-GARCÍA, V.; MARCOS, E.; FERNÁNDEZ-GUISURAGA, J.M.; TABOADA, A.; SUÁREZ-SEOANE, S.; CALVO, L.; 2019. Impact of burn severity on soil properties in a *Pinus pinaster* ecosystem immediately after fire. *Int J Wildland Fire* 28 354-364.

GONZÁLEZ ULIBARRY, P.; 2017. Impacto de los incendios forestales en suelos, agua y vegetación. *Bibl. Del Congr. Nac. Chile* 32(1) 3-18

HILL, R.A.; HUNT, J.; SANDERS, E.; TRAN, M.; BURK, G.A.; MLSNA, T.E.; FITZKEE, N.C.; 2019. Effect of biochar on microbial growth: A metabolomics and bacteriological investigation in *E. coli*. *Environ Sci Technol* 53(5) 2635-2646.

HINOJOSA, M.B.; ALBERT-BELDA, E.; GÓMEZ-MÚÑOZ, B.; MORENO, J.M.; 2021. High fire frequency reduces soil fertility underneath Woody plant canopies of Mediterranean ecosystems. *Sci Total Environ* 575 97-106.

HUERTA, S.; FERNÁNDEZ-GARCÍA, V.; MARCOS, E.; SUÁREZ-SEOANE, S.; CALVO, L.; 2021. Physiological and regenerative plant traits explain vegetation regeneration under different severity levels in Mediterranean Fire-Prone ecosystems. *Forests* 12 (2) 149.

IGLESIAS, M.T.; 2009. Estudio del carbono de la biomasa microbiana en suelos alterados. *Lazaroa*, 29 117-123.

JIAO, P.; DELUCA, T.H.; WANG, K.; LIU, X.; HU, Y.; WANG, Y.; 2024. Fire-deposited charcoal enhances soil microbial biomass in a recently harvested subtropical plantation forest. *Geoderma* 448 116964

KUMAR, Y.; REN, W.; TAO, H.; TAO, B.; LINDSEY, L.; 2025. Impact of biochar



amendment on soil microbial biomass carbon enhancement under field experiments: a meta-analysis. *Biochar* 7 2

LEHMANN, J.C.; RILLIG, M.; THIES, J.A.; MASIELLO, C.; HOCKADAY, W.C.; CROWLEY, D.; 2011. Biochar effects on soil biota – A review. *Soil Biol Biochem* 43 1812-1836.

LI, Q.; ZHANG, J.; YE, J.; LIU, Y.; LIN, Y.; YI, Z.; WANG, Y.; 2024. Biochar affects organic carbon composition and stability in highly acidic tea plantation soil. *J Environ Manage* 370 122803.

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* 215 890-902.

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* 138 237-243.

MARTÍNEZ, E.; FUENTES, J.P.; ACEVEDO, E.; 2008. Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal* 8 68-96.

MINISTERIO DE AGRICULTURA, PESCA Y ALIMENTACIÓN; 1986. Métodos Oficiales de Análisis. Tomo III. Madrid: Secretaría General técnica del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.

MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y RETO DEMOGRÁFICO; 2023. Avances informativos de los incendios forestales. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/temas/incendios-forestales/estadisticas-avances.aspx>

MITCHELL, P.J.; SIMPSON, A.J.; SOONG, R.; SCHURMAN, J.S., THOMAS, S.C.; SIMPSON, M.J. 2016. Biochar amendment and phosphorus fertilization altered forest soil microbial community and native soil organic matter molecular composition. *Biogeochemistry* 130 227-245.

NOYCE, G.; BASILIKO, N.; FULTHORPE, R.; SACKETT, R.; THOMAS, S.C.; 2015. Soil microbial responses over 2 years following biochar addition to a north temperate forest. *Bio Fertil Soils* 51 649-659.

PALVIAINEN, M.; AALTONEN, H.; LAURÉN, A.; KÖSTER, K.; BERNINGER, F.; OJALA, A.; PUMPANEN, J.; 2020. Biochar amendment increases tree growth in nutrient-poor, young Scots pine stands in Finland. *For Ecol Manag* 474 118362

PERRY, J.M.; ANDRÉ J.S.; RONALD, S.; JONATHAN, J.S.; THOMAS, S.C.; SIMPSON, M.J.; 2016. Biochar amendment and phosphorus fertilization altered forest soil microbial community and native soil organic matter molecular composition. *Biogemistry* 130 227-245.

PERRY, J.M.; ANDRÉ J.S.; RONALD, S.; SIMPSON, M.J.; 2015. Shifts in microbial community and water-extractable organic matter composition with biochar amendment in a temperate forest soil. *Soil Biol Biochem* 81 244-254.

RIGO, D.; LIBERTÁ, G.; DURRANT, T.; ARTES VIVANCOS, T.; SAN MIGUEL-AYANZ, J.; 2017. Forest fire danger extremes in Europe under climate change: variability and uncertainty, EUR 28926 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg.

RIZWAN, M.; ALI, S., QAYYUM, M.F.; IBRAHIM, M.; ZIA-UR-REHMAN, M.; ABBAS, T.; OK, Y.S.; 2016. Mechanisms of biochar-mediated alleviation of toxicity of trace



- elements in plants: a critical review. *Environ Sci Pollut Res Int* 23(3) 2230-48.
- ROBERTSON, S.J.; RUTHERFORD, M.; LÓPEZ-GUTIÉRREZ, J.; MASSICOTE, H.; 2012. Biochar enhances seedling growth and alters root symbioses and properties of sub-boreal forest soils. *Can. J. Soil Sci* 92(2) 329-340.
- RODRIGUEZ CARDONA, B.M.; COBLE, A.A.; WY, P.; WYMORE, A.S.; KOLOSOV, R.; PODGORSKI, D.C.; ZITO, P.; SPENCER, R.G.; PROKUSKHIN, A.S.; McDOWELL, W.H.; 2020. Wildfires lead to decreased carbon and increased nitrogen concentrations in upland arctic streams. *Sci Rep* 10(1) 1-9
- SANTIN, C.; OTERO, X.L.; DOERR, S.H.; CHAFER, C.J.; 2018. Impact of a moderate/high-severity prescribed eucalypt forest fire on soil phosphorous stocks and partitioning. *Sci. Total. Environ* 621 1103-1114.
- SEAN, C.T.; 2020. Biochar effects on germination and radicle extension in temperate tree seedlings under field conditions. *Can Sci Publi* 51(1) 10-17
- VANCE, E.D.; BROOKES, P.C.; JENKINSON, D.S.; 1987. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biol Biochem* 19(6) 703-707.
- VIDEGAIN, M.; MARCO, P.; MARTÍ, C.; GARCÍA-RAMOS, F.J.; MANYÁ, J.J.; JAIZME-VEGA, M.C.; 2019. Evaluación de los efectos de la aplicación de biochar como enmienda orgánica en un cultivo de sorgo (*Sorghum bicolor* L.) bajo condiciones de invernadero. X Congreso Ibérico de Agroingeniería. Huesca.