

**MÁSTER PROPIO EN AGROECOLOGÍA,  
SOBERANÍA ALIMENTARIA, ECOLOGÍA URBANA Y  
COOPERACIÓN AL DESARROLLO RURAL**

**Efecto de la aplicación de biochar durante el proceso de compostaje  
en un sistema de compostaje en pila**

**CURSO 2022-2023**

**Alumno: Aray Hernández Galván**

**Tutora: Mónica González González**

**Cotutora: Vanesa Raya Ramallo**

**La Laguna, octubre de 2023**



**FUNDACIÓN  
INSTITUTO DE  
AGRICULTURA  
ECOLÓGICA  
Y SOSTENIBLE**



# EFFECTO DE LA APLICACIÓN DE BIOCHAR DURANTE EL PROCESO DE COMPOSTAJE EN UN SISTEMA DE COMPOSTAJE EN PILA.

## RESUMEN

El biochar es un material rico en carbono (60-90 %) generalmente producido por la pirólisis de la biomasa. Se trata de un material que presenta interesantes características ya que puede mejorar los suelos agrícolas aumentando la capacidad de retención de agua, puede mejorar la estabilidad del suelo, ayudar a las poblaciones de microorganismos, etc. Asimismo, se han demostrado ciertos beneficios en su uso en compostaje, los estudios demuestran beneficios en la aireación y en la estructura del compost. Por otro lado, detectaron un aumento de las actividades de ureasa, fosfatasa y polifenol oxidasa del compost combinado con biochar de entre un 30 y un 40 % a pesar de la menor cantidad de biomasa microbiana. Con todo esto, se planteó un estudio de los efectos del biochar dentro de un sistema de compostaje en pila. Se analizaron 3 dosificaciones: un control con un 0% de biochar, una primera dosis del 5% y una segunda del 15%. Se emplearon 12 microcompostadores con 4 repeticiones tomándose muestras de 3 por cada dosificación (9 en total) y empleando los otros para reponer la parte de muestra extraída. Se analizaron los parámetros químicos y microbiológicos de los microcompostadores, así como, los parámetros físicos de la evolución de la pila de compost. Se reflejaron efectos en la evolución química de la pila, pero la microbiología no fue concluyente. Por último, hubo fluctuaciones de temperatura en la evolución de la pila lo que pudo afectar al conjunto experimental.

Palabras clave

Biochar, biocarbón, compost, microcompostadores

D. Aray Hernández Galván, alumno del Máster Propio en Agroecología, Soberanía Alimentaria, Ecología Urbana y Cooperación Rural al Desarrollo de la Universidad de La Laguna, autoriza la lectura, difusión y uso libre de todo el contenido que compone el presente documento.

Aray Hernández Galván

En San Cristobal de La Laguna, 13 de Octubre del 2023

Mónica González González

Vanesa Raya Ramallo

Dña. Mónica González González, Profesora del Máster Propio en Agroecología, Soberanía Alimentaria, Ecología Urbana y Cooperación Rural al Desarrollo de la Universidad de La Laguna,

Dña. Vanesa Raya Ramallo, Cotutora del Trabajo Fin de Máster del Máster Propio en Agroecología, Soberanía Alimentaria, Ecología Urbana y Cooperación Rural al Desarrollo de la Universidad de La Laguna

CERTIFICAN:

Que la presente memoria, titulada **EFEECTO DE LA APLICACIÓN DE BIOCHAR DURANTE EL PROCESO DE COMPOSTAJE EN UN SISTEMA DE COMPOSTAJE EN PILA**, corresponde al trabajo realizado bajo su dirección por Aray Hernández Galván para su presentación como Trabajo Fin de Máster del Máster Propio en Agroecología, Soberanía Alimentaria, Ecología Urbana y Cooperación Rural al Desarrollo de la Universidad de La Laguna.

Y para que conste, firman el presente certificado.

En San Cristóbal de La Laguna, a 13 de octubre de 2023

Como dice Quevedo:

*“Érase un hombre a una nariz pegado  
érase una nariz superlativa  
érase una nariz sayón y escriba  
érase un peje espada muy barbado”*

Y pensando en todas las personas con las que me he topado de narices en mi vida, les agradezco a todas y cada una de ellas el recorrido que me ha llevado hasta aquí.

Dedicado a mi padre,  
Francisco Hernández Ruano  
Inventor, Ingeniero y Físico

## Tabla de contenidos

1. Introducción .....	1
1.1 Objeto .....	1
1.2 Localización .....	1
1.3 Antecedentes (revisión bibliográfica) .....	1
2. Objetivos .....	9
3. Materiales y métodos .....	10
3.1 Localización del ensayo .....	10
3.2 Preparación del experimento con microcompostadores.....	10
4. Resultados y discusión .....	14
4.1 Caracterización de los materiales de partida y seguimiento del proceso de compostaje....	14
4.2 Evolución de la pila de compost.....	14
4.3 Resultados del análisis microbiológico de los tratamientos .....	17
4.4 Evolución de parámetros químicos de los tratamientos .....	21
Conclusiones .....	26
Bibliografía .....	27

# 1. Introducción

## 1.1 Objeto

Este estudio se desarrolla como Trabajo Final del Máster en Agroecología, Soberanía Alimentaria, Ecología Urbana y Cooperación al Desarrollo Rural de La Universidad de La Laguna.

## 1.2 Localización

El procedimiento experimental se ha llevado a cabo en las instalaciones del ICIA de Gran Canaria, Pozo Izquierdo. Es una zona que se caracteriza por mantener una temperatura en torno a los 21°C durante todo el año y alta constancia de los vientos dominantes (alisios). Se encuentra en la franja sureste de Gran Canaria, a 1,2 km de la costa. Se trata por lo tanto de una zona ventosa, con ambiente marino y con temperaturas relativamente estables.

## 1.3 Antecedentes (revisión bibliográfica)

### **Compost**

El compost es un producto orgánico químicamente estable y libre de patógenos con propiedades similares al humus, producto de la transformación de un residuo orgánico en un producto estabilizado y humificado. De aspecto terroso y aroma a tierra mojada. Se obtiene a través de la descomposición de materiales orgánicos biodegradables mediante un proceso biológico llevado a cabo por microorganismos, que se realiza en un sistema controlado oxidativo (es decir, en presencia de oxígeno) y termófilo (con alta temperatura). La mezcla resultante es rica en nutrientes y organismos beneficiosos como bacterias, hongos, protozoos y nematodos.

Se utiliza como abono mejorante del suelo o como sustrato para cultivo, siempre que se realice de la manera adecuada; eso es debido a que aporta nutrientes a los cultivos, en forma de macro y microelementos como son el nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, hierro, zinc, etc., a que tiene un alto contenido en compuestos húmicos e introduce microorganismos beneficiosos.

Durante el proceso de compostaje la pila o montón de compost va a sufrir una serie de cambios relacionados con la actividad de los microorganismos que se encuentran en la misma, que aprovechan el carbono y el nitrógeno presentes para producir su biomasa. Este proceso metabólico genera calor y, por tanto, un aumento de la temperatura de la pila.

La activación de los microorganismos se produce en presencia de oxígeno y de la humedad adecuada, condiciones que se favorecen con el volteo y humedecimiento, si fuera necesario, de la pila durante el compostaje. Con los volteos los materiales se reordenan; así el material que se encuentra en las capas más externas, y por tanto que está más frío, se va a ir homogeneizando con el resto de material y el material que se encuentra en semidescomposición se rompe y entra en un contacto más estrecho. Además, en el volteo se introduce oxígeno necesario, junto con la humedad, para la actividad óptima de los

microorganismos aerobios. La humedad adicional necesaria para el proceso se puede añadir en forma de agua o té de consuelda para compost.

Como se ha comentado, la actividad metabólica de los microorganismos va a generar calor, por lo que de manera genérica cuando se habla de compost se hace referencia al proceso de compostaje térmico (Bueno, 2010) que sigue un esquema de temperaturas similar al mostrado en la Figura 1. Desde el montaje de las pilas se pasa por varias fases. En la etapa inicial mesófila, con temperaturas entre 20°C y 30°C, se activa el compostaje, se generan ácidos y empieza la descomposición rápida del material, debido a que los microorganismos utilizan fuentes sencillas de carbono y nitrógeno, como azúcares, lo que genera una rápida elevación de la temperatura de la pila (Miyatake e Iwabuchi, 2005).

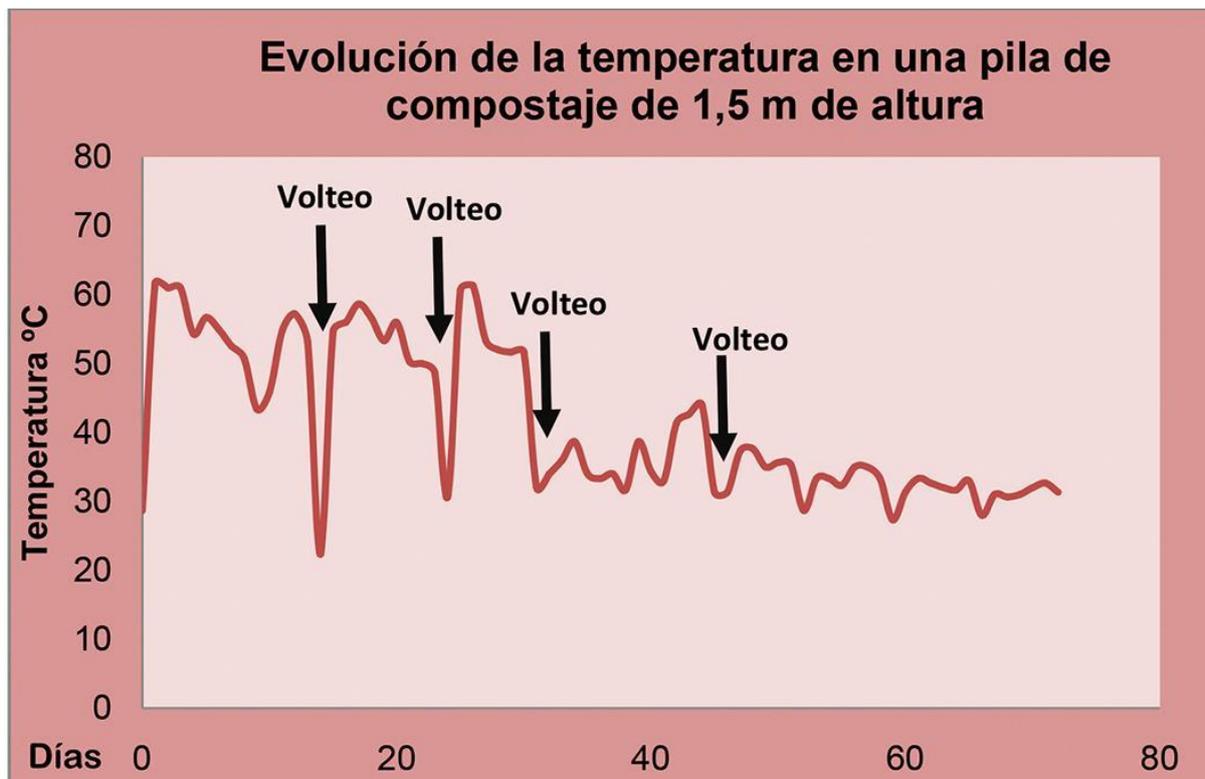


Figura 1. evolución de la temperatura en un proceso de compostaje (M<sup>a</sup> Antonia Elorrieta, 2014)

Por las temperaturas alcanzadas, los microorganismos mesófilos son reemplazados por microorganismos termófilos que degradan las fuentes más complejas de carbono, como la celulosa y lignina. En esta segunda fase termófila, la temperatura óptima debe oscilar entre 35°C y 60-65°C; la temperatura alcanzada es altamente dependiente de los materiales utilizados y de las condiciones ambientales en las que se elabora el compost. Es necesario mantener la temperatura alta para destruir las semillas de malas hierbas, microorganismos patógenos y huevos de insectos parásitos, algunos de los cuales sobreviven en el material de compostaje a temperaturas de hasta 57°C durante varios días (Miyatake e Iwabuchi, 2005). Sin embargo, temperaturas superiores a 70°C, provocan una reducción de la actividad de la mayoría de los microorganismos, algo denominado comúnmente como que el compost se está quemando. Por encima de 76°C se inhibe la actividad bacteriana; en este caso sería necesario voltear y humedecer el compost. El volteo es menos eficaz que el riego para reducir la temperatura, pero el riego ha de ser adecuado para que no se produzcan encharcamientos y reacciones anaeróbicas. Por otra parte, temperaturas bajas producen una ralentización del

proceso de compostaje; en este caso, cuando han descendido por debajo de un valor límite que es variable, es necesario voltear el compost para reactivar el proceso.

El registro de la temperatura del material en descomposición con regularidad va a indicar cuándo se debe airear la pila por volteo, para restablecer la actividad microbiana necesaria para mantener la temperatura requerida durante el mayor tiempo posible. Como norma general, el compost se voltea cuando la temperatura desciende por debajo de 55°C o sube por encima de 72°C.

Durante esta fase de descomposición activa por parte de los microorganismos termófilos, la temperatura bajará unos grados inmediatamente después del volteo, pero volverá a subir hasta la temperatura original en dos o tres horas y se mantendrá elevada durante un tiempo para luego descender paulatinamente hasta un valor en el que se producirá otro volteo.

A la fase termofílica le sigue una fase en la que las fuentes de carbono y nitrógeno se van agotando y el compostaje continúa por degradación de polímeros por organismos mesófilos. La temperatura del compost va descendiendo hasta llegar a la fase de maduración donde se forman compuestos estables como los ácidos húmicos y fúlvicos. La cadencia del descenso de la temperatura viene dado por los condicionantes específicos de la pila y puede ser muy gradual o relativamente rápida. El proceso total de compostaje dura aproximadamente 3 meses (Bueno, 2010).

Los microorganismos que intervienen en el proceso de compostaje aeróbico se dividen en dos grupos: mesófilos aquellos que son activos a temperaturas de 10°C a 45°C y termófilos activos entre 45°C y 70°C. Existe una amplia gama de bacterias y hongos termófilos que se han aislado del compost durante la fase termofílica; sin embargo, se ha descrito que durante la fase termofílica hasta el 87% de los organismos presentes en los montones muestreados pertenecían a la familia Bacillaceae formadora de esporas, siendo *Bacillus stearothermophilus* predominante a temperaturas superiores a 65°C (Fujio y Kume, 1991). Aunque la pila se repuebla cuando se enfría, el mantenimiento de temperaturas inferiores a 65°C garantiza una amplia población de microbios en el compost. Los microorganismos psicrófilos, un tercer grupo de microorganismos que funcionan a temperaturas más bajas, en el intervalo de 10°C a 20°C, no desempeñan un papel importante en el compostaje en caliente, pero participarán en el mantenimiento del compostaje en frío y la etapa de maduración del compost.

## **Biochar**

### *¿Qué es? un poco de historia, proceso productivo*

El biochar o biocarbón es un material rico en carbono (60 - 90%) producido mediante la pirólisis (u otros procesos evolutivos naturales a muy largo plazo) de biomasa de diferente composición, como madera, cáscaras de nueces, residuos agrícolas, entre otros. La pirólisis es un proceso de calentamiento de la biomasa en ausencia de oxígeno, lo que resulta en la descomposición térmica de la materia orgánica produciendo un residuo rico en carbono, que se ha denominado biochar cuando es utilizado como enmienda orgánica de suelos. El carbón vegetal y, especialmente, los carbones activados tienen otros usos como inmovilizadores de

moléculas contaminantes en suelos, aguas, reducción de olores en camas de ganado, etc. dada su elevada superficie específica..

Se cree que los primeros indicios del uso del biochar en el contexto agrícola es el que se observa en las denominadas tierras negras amazónicas (Brasil), que son descritas por Smith en 1879 y Hartt en 1885. Estos autores describen unos suelos oscuros y fértiles en la Amazonia brasileña, pero sin definir un origen concreto. En la actualidad, la hipótesis más aceptada es la de que estos suelos fueron generados mediante la quema controlada de desechos orgánicos. Las teorías sobre el origen de las tierras negras también incluyen quema de los sitios, ya sea por incendios casuales en el área o intencionales, realizados para destruir bosques con el fin de usarlos como tierras de cultivo y para eliminar la maleza. En la actualidad, se encuentran indicios de que es un proceso que se aplicó en diferentes zonas del mundo aunque con diferencias significativas dentro de las técnicas aplicadas.

Hoy en día, existen diversos métodos para la producción de biochar (Tabla 1). Las técnicas termoquímicas más comunes utilizadas para la producción de biochar incluyen la pirólisis, la carbonización hidrotérmica, la gasificación y la torrefacción. De todos estos métodos, la pirólisis es el proceso más común para la producción de biochar (Yaasjikkaa et. al., 2020).

**Tabla 1.** *Diferentes métodos de producción de biochar según Yaasjikkaa et. al, 2020.*

Método	Definición
Pirólisis	Proceso de descomposición térmica de materiales orgánicos en un ambiente libre de oxígeno bajo el rango de temperaturas de 250-900 °C.
Carbonización hidrotérmica	Proceso en el que la biomasa se mezcla con agua y se introduce en un reactor cerrado. A diferentes temperaturas, se obtienen los siguientes productos: biochar a una temperatura inferior a 250 °C denominado carbonización hidrotérmica, bioaceite entre 250-400 °C conocido como licuefacción hidrotérmica y productos gaseosos como CO, CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> y CH <sub>4</sub> producidos a una temperatura superior a 400 °C.
Gasificación	Proceso termoquímico en el que la biomasa, normalmente de origen leñoso, es transformada en un gas combustible mediante la aplicación de calor externo. Se alcanzan temperaturas de entre 650 y 900 °C
Torrefacción	Proceso denominado pirólisis suave. El oxígeno, la humedad y el dióxido de carbono presentes en la biomasa se eliminan utilizando aire atmosférico inerte en ausencia de oxígeno a una temperatura de 300 °C mediante diversos procesos de descomposición.

La estabilidad refractaria del biochar conduce al concepto de captura y almacenamiento de carbono pirogénicoo carbón vegetal, que puede ser un medio para mitigar el cambio climático debido a su potencial de secuestro de carbono. Esto se debe a que si se elabora biochar con madera, ésta contiene un alto porcentaje de carbono (C, 50%), 42% de oxígeno (O), 6% de hidrógeno (H) y el 2% restante de nitrógeno (N) y otros elementos (Gobierno de Canarias, 2015). Del carbono contenido en el biochar una elevada proporción (alrededor del 70-80%) es carbono altamente recalcitrante, que puede permanecer secuestrado durante largos periodos de tiempo en el suelo. Según Schmidt et al. (2022), el biochar producido a temperaturas de pirólisis superiores a 550°C y que presenta una relación molar H:C inferior a 0,4 es muy persistente cuando se aplica al suelo. El 75% de ese carbono del biocarbón

consiste en carbono aromático policíclico estable (PAC) y persistirá tras su aplicación al suelo durante más de 1.000 años, independientemente del tipo de suelo y del clima. El 25% restante del carbono del biocarbón puede considerarse carbono semipersistente (CPS), cuyo tiempo medio de permanencia en el suelo oscila entre 50 y 100 años, dependiendo del tipo de suelo y del clima. Otros autores sugieren que el potencial de secuestro de CO<sub>2</sub> es mucho más alto debido a que la edad media del carbono que se encuentra en sedimentos marinos puede llegar a ser hasta 13.900 años mayor que la edad de otros tipos de carbono orgánico como las sustancias húmicas.

Para la aplicación de enmiendas al suelo, las tasas de descomposición varían dependiendo de las propiedades del suelo y del clima (Roy y Dias, 2017). Por otro lado, el envejecimiento acelerado del biochar en condiciones de campo indica que el biochar producido a partir de cáscara de arroz y con la adición azufre, es capaz de permanecer en suelo durante más de 50 años (Zhao et al., 2020). Esto sugiere que el tipo de biochar, tamaño de las partículas y las condiciones del suelo juegan un papel fundamental en su permanencia en el suelo.

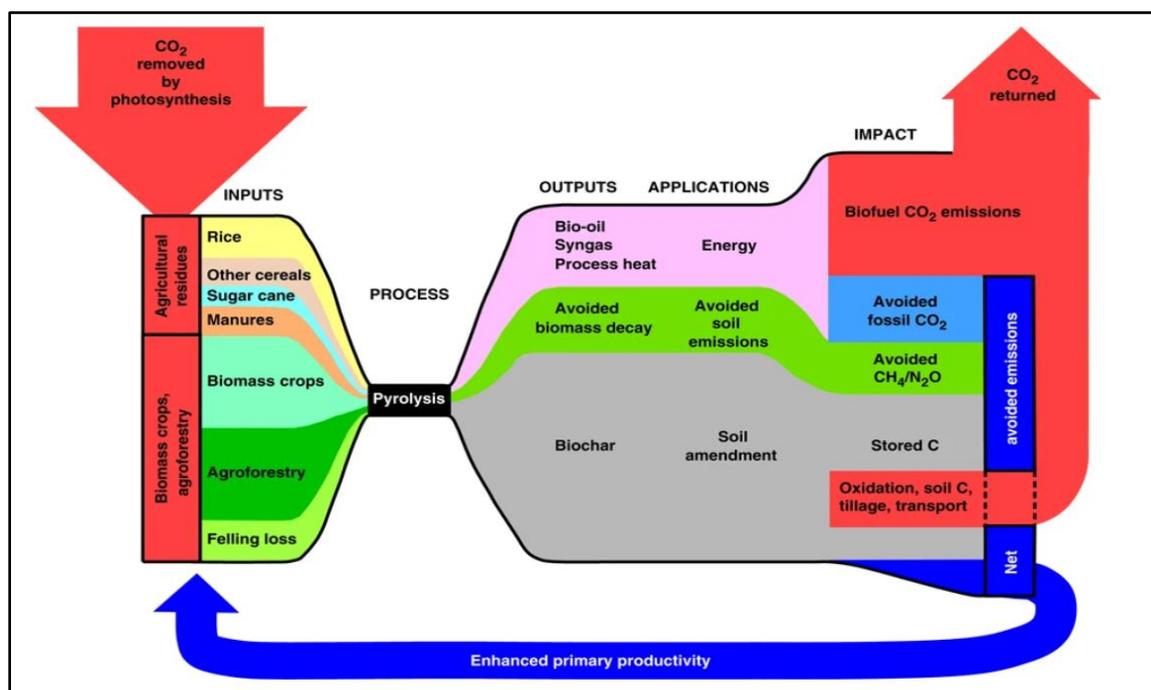


Figura 2. Biochar sostenible para mitigar cambios en el clima (Woolf, D. et al., 2010).

Igualmente, Woolf et al. (2010) sugieren que el biochar almacena niveles considerables de carbono en el suelo (43-94 pg CO<sub>2</sub>-C equivalente) y al mismo tiempo compensa una parte de emisiones de combustibles fósiles gracias a la coproducción de energía (18-39 pg CO<sub>2</sub>-C equivalente) (Figura 2).

El biochar ha sido considerado ampliamente como un material ambientalmente positivo para el suelo. Sin embargo, es crucial tener en cuenta los posibles efectos adversos del mismo, como la alteración de los niveles de pH del suelo dado su elevado pH o la introducción de características químicas indeseables con la posible introducción de contaminantes.

### Uso de biochar en la agricultura y su potencial

El biocarbón puede mejorar los suelos agrícolas de diversas maneras, entre otras, el aumento de la capacidad de retención de agua, la mejora de la estabilidad del suelo mediante la adición de sólidos y la estabilización de agregados, el aumento de las poblaciones de microorganismos y el control de las poblaciones de hongos, y la reducción de la necesidad de adición de fertilizantes, así como su fertilizantes (Allohverdi et al., 2021).

Mejora de la retención de agua: El biochar tiene una alta capacidad para retener agua y nutrientes en el suelo, lo que puede aumentar la disponibilidad de agua para las plantas y reducir la necesidad de riego frecuente. Un ejemplo eficaz de ello es el uso del biochar en el África subsahariana para combatir la sequedad de los suelos. Según Gwenzi et al. (2015), en esta región, los suelos son áridos y generalmente pobres debido a las altas concentraciones de arena procedente de roca granítica. Además, estos suelos son generalmente ácidos (a menudo, con pH inferior a 4), lo que produce graves problemas en el crecimiento de las plantas. Los autores determinan que algunos de estos efectos pueden ser corregidos mediante el uso del biochar. Se sabe que la capacidad de retención hídrica del biochar es proporcional al nivel de porosidad del biocarbón, pero no únicamente. El mejor rendimiento del biocarbón en términos de retención de agua se debe a la combinación de varias propiedades y no puede atribuirse a una sola propiedad del biocarbón. En este sentido, Suliman et al. (2017) sugieren que la retención de agua del biocarbón está controlada por varios parámetros: la porosidad interna del biocarbón, que influye en su densidad aparente, la química superficial y la fuente de materia prima, que controlan la hidrofobicidad y la porosidad del material, junto con la temperatura de producción.

Mejora de la estabilidad y fertilidad del suelo: El biochar puede mejorar la fertilidad del suelo por su porosidad, y al aumentar su contenido de materia orgánica, nutrientes esenciales. Hay pruebas que sugieren que el biocarbón puede ayudar a las poblaciones de micorrizas y rhizobium a nivel radicular (Grus et al., 2019). Está ampliamente aceptado que la adición de materia orgánica ayuda a las especies microbianas (Figura 3) (Van Gestel et al., 1993), sin embargo, los aportes reales de materia orgánica con efectos en el complejo microbiótico del suelo es limitado debido a que el biochar es altamente recalcitrante. Gul et al., (2015) demostraron que la presencia de una porosidad más alta gracias a las enmiendas con biochar contribuye de manera significativa a las poblaciones de la microbiota del suelo. Cuando se evalúa la salud y abundancia de las comunidades de micorrizas, se ha demostrado que la enmienda con biochar las beneficia de las siguientes maneras: proporcionan un refugio para las especies a través de la porosidad, desintoxican los suelos de metales pesados y pueden alterar las propiedades físico-químicas del suelo de forma positiva.

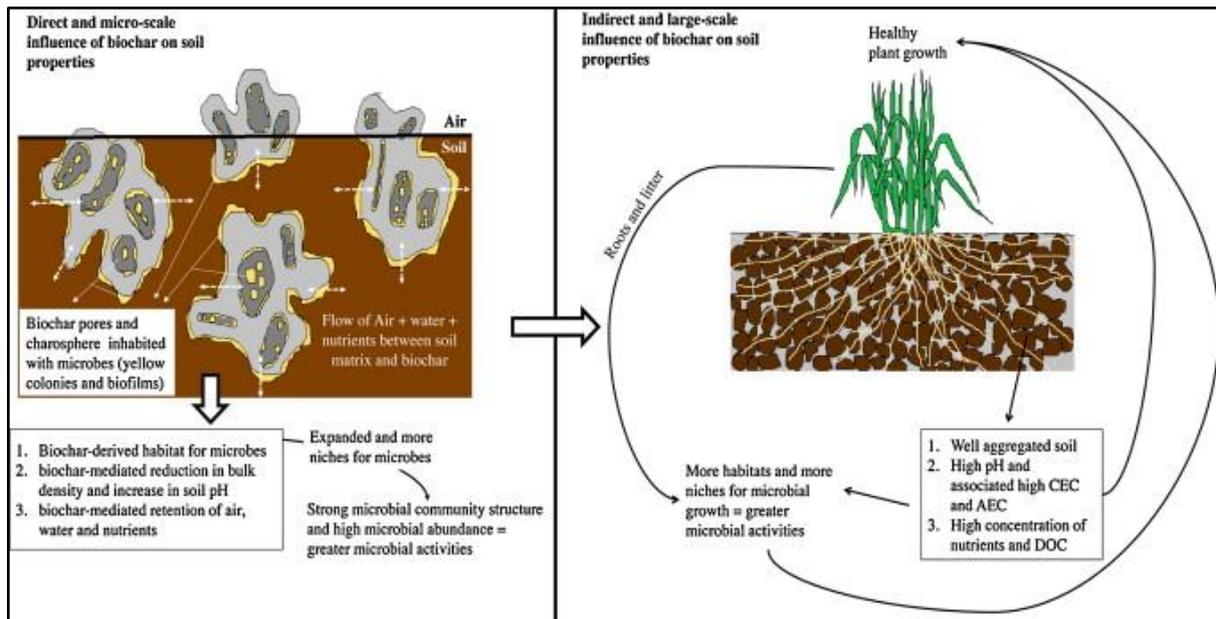


Figura 3. Respuesta de la biomasa microbiana al secado y humedecido del suelo (Van Gestel et al. 1993).

Grus et al., (2019) determinaron que la relación Collembola/Acari muestra una mayor calidad biológica del suelo en el campo donde se aplicó biochar en comparación con los que carecían de la misma. Este efecto positivo se debió probablemente a la mejora de las propiedades químicas del suelo (el contenido de carbono orgánico y la capacidad de intercambio catiónico) tras la adición de biochar. El biochar utilizado en el experimento afectó positivamente a los invertebrados del suelo en los estudios de campo, mientras que en los estudios de laboratorio sólo se observó un efecto a corto plazo.

Reducción de la lixiviación de nutrientes: El uso de biochar puede reducir la pérdida de nutrientes del suelo por lixiviación, lo que puede ser beneficioso. A nivel general, la aplicación de biochar sin "inocular" o sin cargar con nutrientes al suelo provoca una pérdida en productividad, al menos en las primeras cosechas, en un efecto parecido al del compost mal descompuesto o con muchos residuos leñosos. Esto es debido a la captura de los nutrientes y organismos presentes en el suelo por parte de estos materiales. Güereña et al. (2012) demostraron que la aplicación de biochar a un suelo fértil de clima templado no mejoró el crecimiento de los cultivos ni la eficiencia en el uso del nitrógeno, pero aumentó la retención del nitrógeno fertilizante en la capa superficial del suelo. Por otro lado, algunos estudios sugieren que la adición de biocarbón no reduce la lixiviación de amonio, nitrato y fosfato, pero sí la nitrificación (Schulz y Glaser, 2012). Biederman y Harpole (2012) y Thies et al. (2015) registraron un aumento del rendimiento de los cultivos, concentración de potasio en el tejido vegetal, pH del suelo, y del fósforo, potasio, nitrógeno total y carbono total del suelo cuando se aplicó biochar al suelo.

## Biochar y compost

Existen muy pocas referencias al empleo de biochar en los procesos de compostaje y sus efectos en la microbiología de los suelos. Es cierto que algunos estudios reflejan efectos positivos al añadir biochar en el proceso de compostaje, pero sigue sin estar claro si esto se debe a un efecto físico-químico o microbiológico.

Schulz et al. (2013) sugieren que la adición de biochar compostado a sustratos de suelo arenoso y limoso produjo un aumento del crecimiento de las plantas. Este efecto era correlativo a la cantidad aportada. Esto puede explicarse por un aumento del contenido de carbono orgánico total del suelo y por el aporte de nutrientes disponibles para las plantas. El compostaje con biochar combina el alto secuestro de carbono del biocarbón y el potencial de fertilización del compost. El estudio reveló claramente que el crecimiento de las plantas y la fertilidad del suelo eran mayores cuanto más biochar compostado se añadía.

Waqas et al. (2018) demostraron que a unas concentraciones del 10% y 15% de biochar, obtenido a partir de residuos de césped, en el compostaje de residuos alimentarios tenían un efecto positivo. Se produjo un rápido aumento de la temperatura y una elevada descomposición de la materia orgánica. El biochar mejoró el pH del compost y favoreció la amonificación neta y la nitrificación en la mezcla de compostaje, aumentando la concentración de amonio y de nitrato en el producto final.

Asimismo, Zhang et al. (2014) demostraron que el uso de biochar de madera, al 12-18% (p/p), tenía un efecto positivo en las propiedades de los materiales de compostaje de lodos de depuradora, describiendo que las enmiendas del suelo basadas en compost mezclado con biocarbón combinan los efectos positivos del biocarbón puro y los conocidos efectos de los materiales de compostaje. Otros estudios demuestran que el biochar produjo un aumento del 10% en el carbono capturado debido a la extracción de sustancias húmicas y una disminución del 30% del carbono soluble en agua, debido a una mayor tasa de degradación y/o la adsorción de estos compuestos lábiles en el biochar. Las actividades de ureasa, fosfatasa y polifenol oxidasa del compost combinado con biochar aumentaron entre un 30% y un 40% a pesar de la menor cantidad de biomasa microbiana. También se ha descrito que el enriquecimiento de gallinaza con biochar en una proporción 1:1 redujo las pérdidas de nitrógeno en el compost maduro; asimismo, se comprobó que el uso de serrín era más eficiente para conservar la materia orgánica y el nitrógeno en el compost maduro, aunque no se valoró su persistencia en el tiempo.

El biochar se ha convertido en un tema de interés en la agricultura sostenible y la gestión de residuos agrícolas debido a su potencial para mejorar la salud del suelo y reducir los impactos ambientales negativos. No obstante, es importante tener en cuenta que su efectividad puede variar según las condiciones locales del suelo, la biomasa utilizada para su producción y las condiciones de la pirólisis.

## 2. Objetivos

Este estudio se desarrolla como Trabajo Final del Máster en Agroecología, Soberanía Alimentaria, Ecología Urbana y Cooperación al Desarrollo Rural de La Universidad de La Laguna con los siguientes objetivos:

- Determinación de los efectos del biochar en el proceso de compostaje mediante el estudio de la evolución de los parámetros químicos y microbiológicos entre volteos.
- Estudio de la evolución en los parámetros físicos de un compost con biochar en pila.

## 3. Materiales y métodos

### 3.1 Localización del ensayo

El procedimiento experimental se ha llevado a cabo en las instalaciones del Instituto Canario de Investigaciones Agrarias (ICIA) en Pozo Izquierdo, Gran Canaria. Es una zona que se caracteriza por mantener una temperatura en torno a los 21°C durante todo el año y alta constancia de los alisios, vientos dominantes. Se encuentra en la franja sureste de Gran Canaria, a 1,2 km de la costa. Se trata por lo tanto de una zona ventosa, con ambiente marino y con temperaturas relativamente estables.

### 3.2 Preparación del experimento con microcompostadores

En el proceso de experimental desarrollado con la pila de compost se llevaron a cabo los siguientes pasos:

#### a. Elaboración de la pila de compost:

La pila de compost se preparó el 19 de junio de 2023, utilizando restos de poda y estiércol ovino (Tabla 2).

**Tabla 2.** Composición analítica de los componentes del compost

Material	Carbono (%)	Nitrógeno (%)	HR (%)	Peso (Kg)	Densidad (Kg/L)	Volumen (L)
Restos de poda	40,70	1,06	10	810	0,081	10000
Estiércol ovino	34,88	1,92	32	370	0,37	1000

La relación carbono:nitrógeno de la mezcla de los componentes del compost fue 29,27, con una humedad de 16,9%.

El primer volteo de la pila se realizó el 18 de julio de 2023, momento en el que se aplicó el biochar. El segundo volteo se realizó el 24 de agosto de 2023



Figura 4. Aspecto de la de compost tras el primer volteo (ICIA, Gran Canaria)

### b. Planteamiento del ensayo:

Para comprobar el efecto de la aplicación de biochar en el proceso de compostaje, se desarrollaron 3 tratamientos:

- Bio 0 ó Control: compost de la pila en elaboración sin aplicación de biochar.
- Bio 5%: mezcla de compost de la pila en elaboración con un 5% de biochar en volumen.
- Bio 15%: mezcla de compost de la pila en elaboración con un 15% de biochar en volumen.

Para la realización de los tratamientos se emplearon 12 microcompostadores, que se llenaron con las dosis de cada tratamiento según se muestra en la tabla 3. Para homogeneizar y ser más precisos en el llenado de los microcompostadores, se calculó la densidad aparente tanto del compost como del biochar, para realizar la dosificación en peso de cada tratamiento.

Tabla 3. Proporción de compost y biochar dentro de cada microcompostador

Tratamiento	Volumen Compost (L)	Volumen de Biochar (L)
Bio 0	6,3	0
Bio 5%	5,985	0,315
Bio 15%	5,355	0,945

Los microcompostadores, una vez completados, se introdujeron de manera aleatoria en posición horizontal y centrados en el interior de la pila de compost, para que siguieran el proceso de compostaje del conjunto de la pila.

La función de los microcompostadores era la de mantener los tratamientos de estudio separados del conjunto de la pila de compost para poder evolucionar según el tratamiento y extraer y analizar las muestras en cada volteo.

Durante el proceso de volteo la muestra de los microcompostadores también fue volteada y humedecida, al igual que el resto de la pila.

### **c. Parámetros analizados:**

Diariamente se realizó el seguimiento de la temperatura, humedad, producción de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y consumo de oxígeno (O<sub>2</sub>) de la pila de compost con el analizador Compost Manager. El procedimiento de toma de datos es sencillo, ya que consiste en insertar la sonda del equipo y registrar los datos. Esta operación se realiza en diferentes puntos de la pila para obtener una media de las condiciones de la pila.

En los dos volteos de la pila se tomaron muestras de cada microcompostador para su análisis químico y microbiológico. Los parámetros químicos analizados fueron pH, conductividad eléctrica, materia orgánica oxidable, materia orgánica total, carbono orgánico total, nitrógeno total y relación carbono:nitrógeno. Los parámetros microbiológicos analizados fueron: pseudomonas fluorescentes, bacterias totales, Trichoderma spp., hongos filamentosos totales mesófilos y hongos filamentosos totales termófilos. Estas determinaciones se obtuvieron por unidades formadoras de colonias por gramo de materia seca.

### **d. Diseño experimental:**

Se realizaron 4 repeticiones de cada tratamiento (Bio 0, Bio 5% y Bio 10%); es decir, se llenaron un total de 12 microcompostadores (Figura 5 y Figura 6), tomando muestras para analizar de 3 de ellos y usando el cuarto para completar la muestra extraída de los otros 3, de manera que los microcompostadores objeto de análisis se mantuvieran llenos.



Figura 5. Detalle de los microcompostadores con los diferentes tratamientos (izq.) y tamaño (der.)



Figura 6. Detalle del compost utilizado para el proceso experimental (izq.) y lugar de introducción de los microcompostadores (der.)

#### e. Análisis estadístico:

Mediante análisis de la varianza (ANOVA) se evaluó el efecto de la adición de distintos porcentajes de biochar al compost. Las medias se compararon mediante el test de rango múltiple de LSD (Least significant difference) de Tukey ( $p \leq 0,05$ ).

## 4. Resultados y discusión

### 4.1 Caracterización de los materiales de partida y seguimiento del proceso de compostaje.

Durante la preparación del ensayo se caracterizó las condiciones iniciales de la pila de compost mediante su humedad, densidad aparente en húmedo y en seco (Tabla 4).

**Tabla 4.** Humedad y densidad iniciales de la pila de compost.

<b>Humedad (%)</b>	45 ± 1
<b>Densidad aparente húmeda de la pila de compost (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	0,31 ± 0,03
<b>Densidad aparente del compost deshidratado (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	0,14 ± 0,02

Los datos son media ± desviación estándar de tres réplicas.

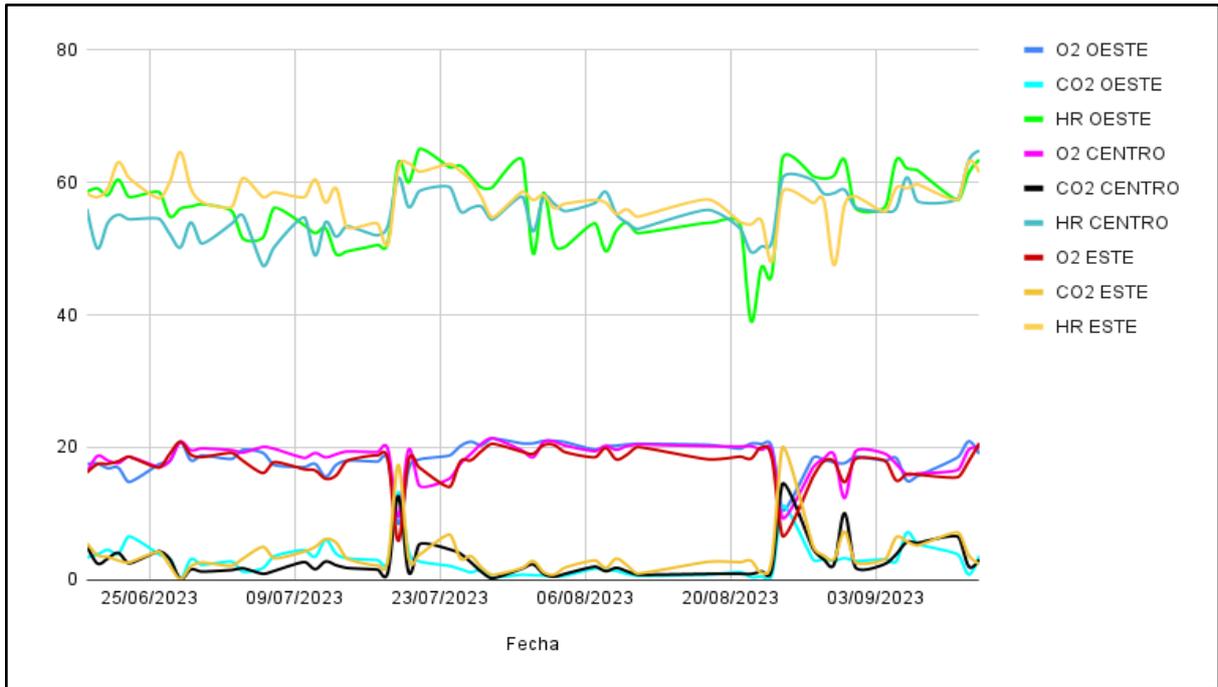
Asimismo, se obtuvieron los datos del biochar para tenerlos como referencia en los análisis posteriores:

**Tabla 5.** Características químicas biochar utilizado

<b>Análisis elemental</b>		<b>Cationes intercambiables (meq/100g)</b>	
pH	8,36	Calcio (Ca)	12,7
Conductividad eléctrica (mS/cm)	12,98	Magnesio (Mg)	4,25
Carbono total (%)	65,96	Sodio (Na)	16,96
Nitrógeno total (%)	1,25	Potasio (K)	30,37
Relación C/N	52,89		
Carbono oxidable (%)	7,49		
Carbono estable (%)	58,47		

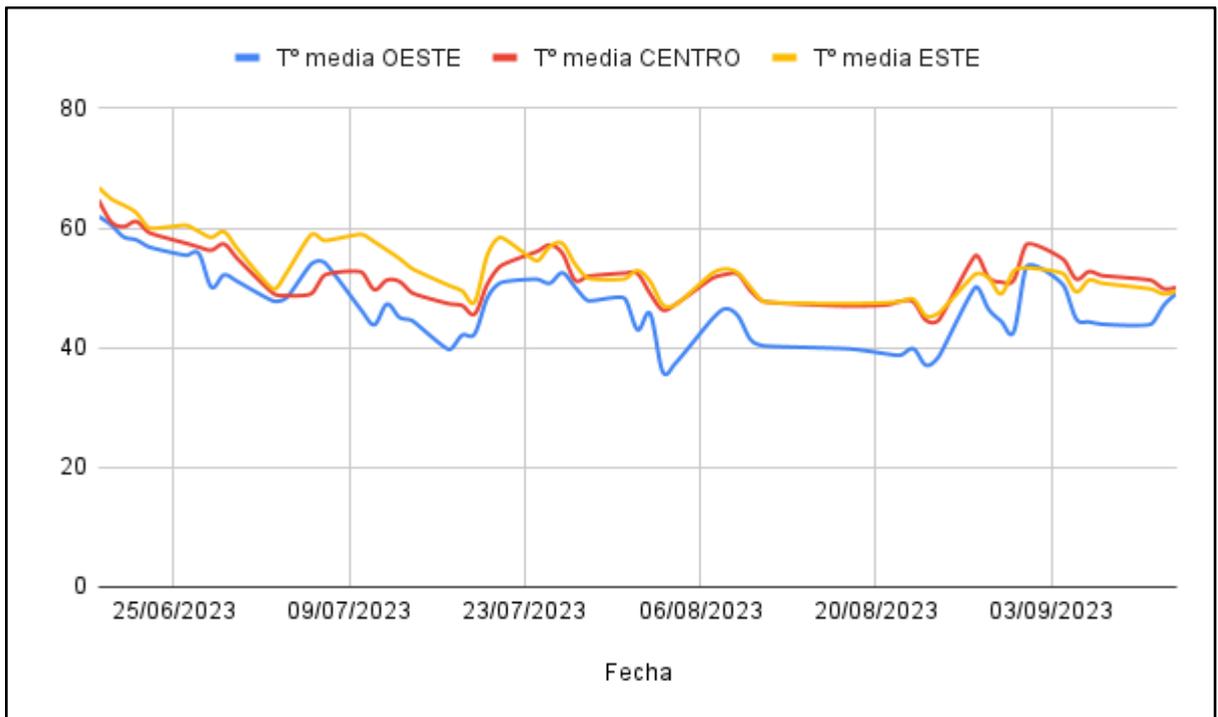
### 4.2 Evolución de la pila de compost

Durante el seguimiento diario de la pila de compost se registró la evolución de la humedad, dióxido de carbono y oxígeno en tres puntos de la pila (oeste, centro y este), tal y como se muestra en la Figura 7.



**Figura 7.** Humedad relativa (%) y concentración de dióxido de carbono (%) y oxígeno (%) de la pila de compostaje en los 3 puntos de medida de la pila.

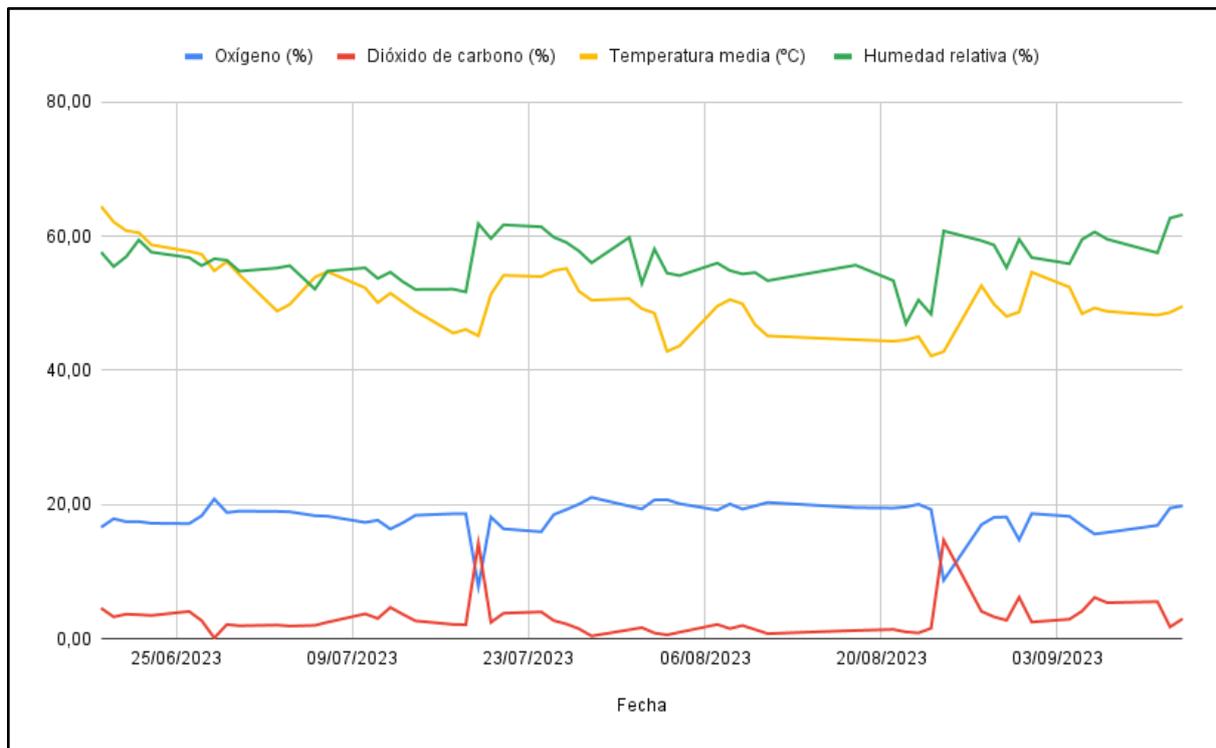
En la Figura 8 se compara la temperatura durante el proceso de compostaje en las diferentes zonas de la pila (oeste, centro y este), con el objeto de comprobar que la evolución fuese homogénea.



**Figura 8.** Comparativa de las temperaturas registradas durante el compostaje en las distintas partes de la pila.

Finalmente, en la Figura 9 se muestra la evolución media de todos los parámetros evaluados para hacer el seguimiento del proceso de compostaje. Como se puede observar se refleja la evolución típica de un pila de compost, mostrando claramente la influencia del volteo (18 de

julio y 24 de agosto) en las concentraciones de oxígeno y dióxido de carbono. En cuanto a la evolución de la temperatura no se reflejó una evolución progresiva de alcanzar un pico y luego una caída paulatina hasta el siguiente volteo, sino que se observaron oscilaciones de temperatura entre ambos volteos.



**Figura 9.** Humedad relativa media (%), concentración media de oxígeno (%) y de dióxido de carbono (%) y temperatura media (°C) de la pila durante el proceso de compostaje.

Para saber si durante el compostaje hubo influencia de las condiciones climáticas, se hizo una iteración de los datos de la temperatura ambiente exterior registrada en la estación meteorológica del ICIA (Figura 10). Asimismo, se compararon los datos de temperatura ambiente con las temperaturas registradas en el compost, para determinar si las fluctuaciones estaban condicionadas por las temperaturas exteriores (Figura 11). Como se puede observar, no se aprecia una correlación directa entre la temperatura exterior y la de la pila de compost. Por otra parte, se pueden apreciar las subidas de temperatura relacionadas con el volteo de la pila el 18/07/2023 y el 24/08/2023.

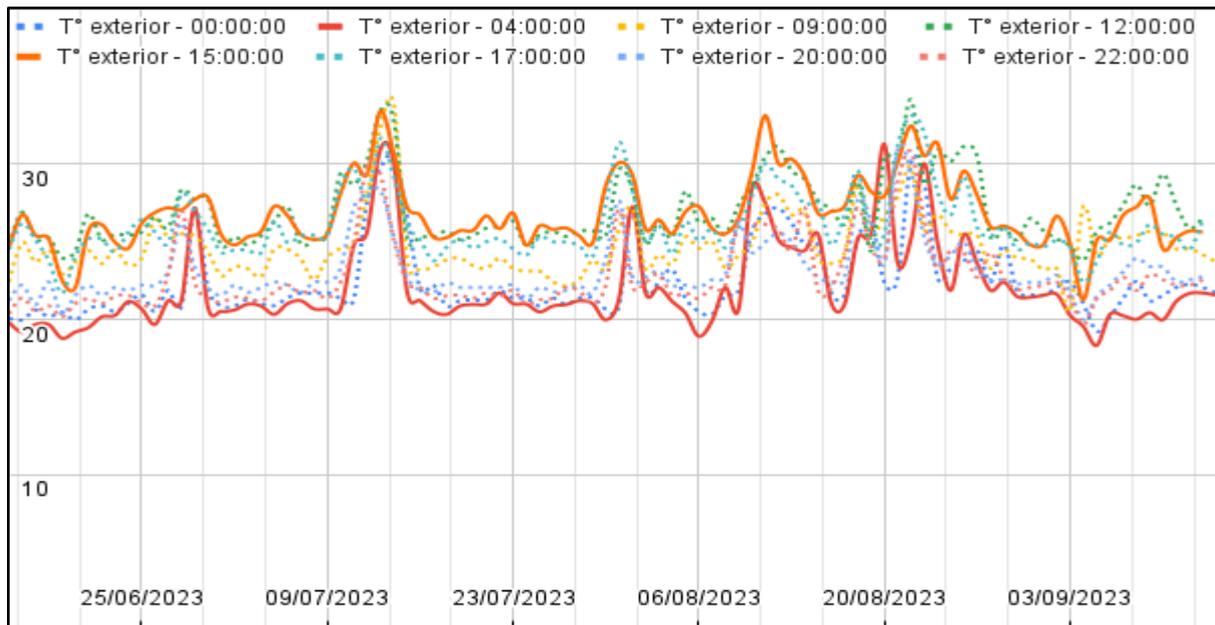


Figura 10. temperatura exterior durante el compostaje.

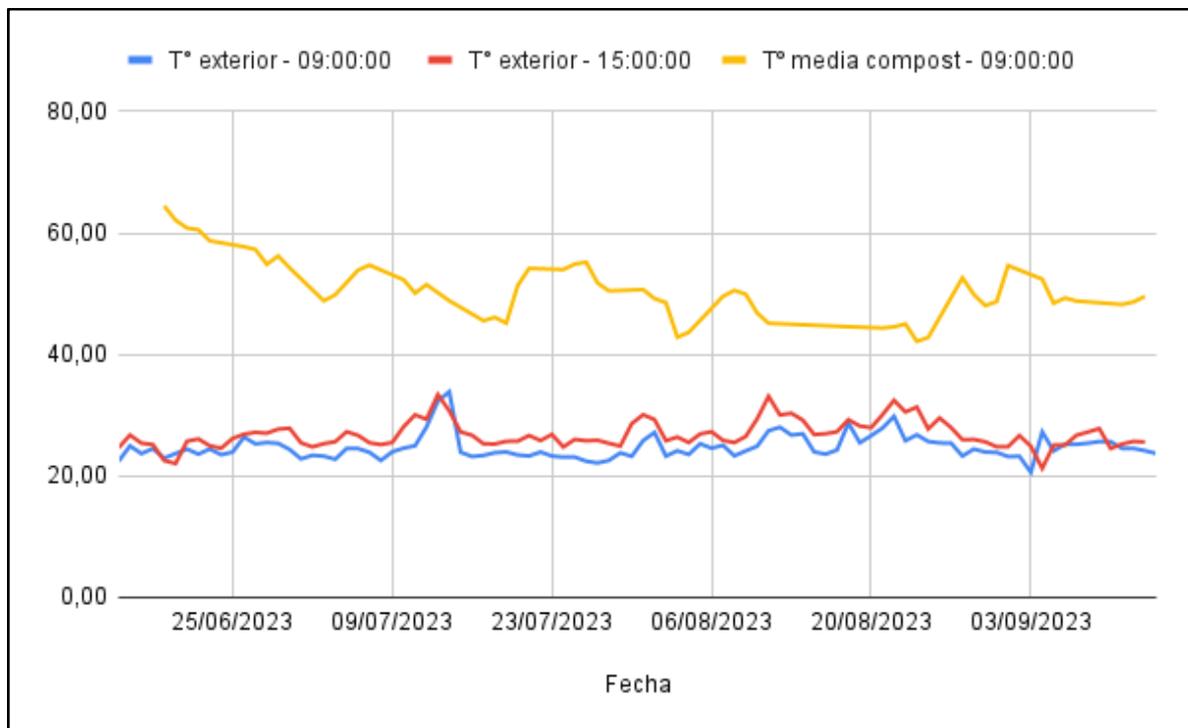
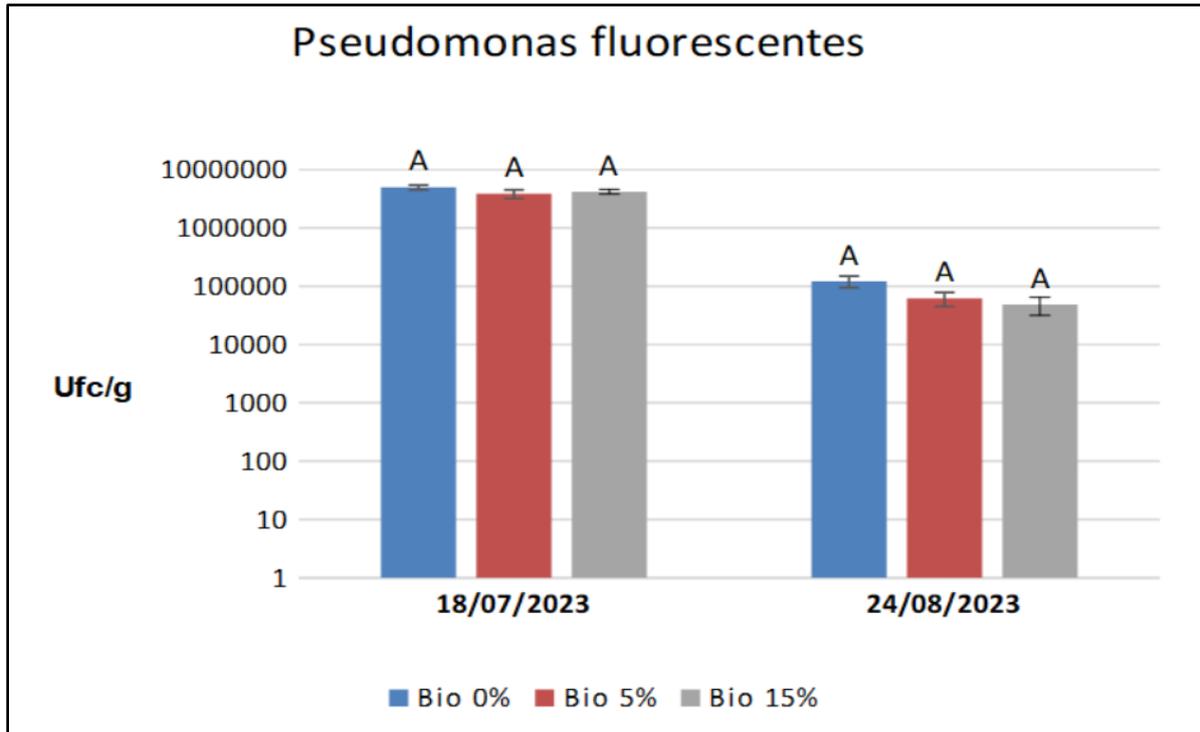


Figura 11. comparativa entre la temperatura exterior y la de la pila en el horario de toma de muestra (9:00) y la máxima del día (15:00).

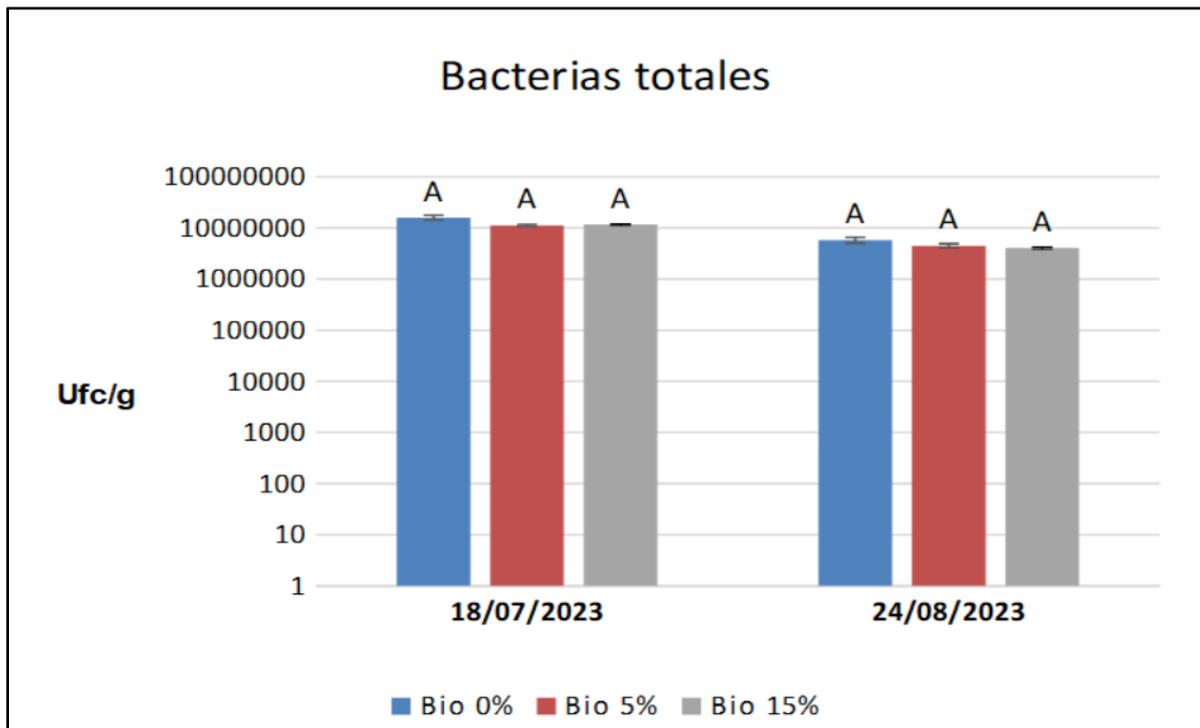
### 4.3 Resultados del análisis microbiológico de los tratamientos

#### a. Bacterias

El primer volteo (18/07/2023) se hace en fase termófila con mayor presencia de bacterias que en la fase mesófila (segundo volteo, 24/08/2023; Figura 12). En los tratamientos con biochar (Figura 12) no se observa una reducción en el número de bacterias con relación al control. Se compara tan solo el conjunto muestral con las distintas dosificaciones. No se establece una comparación entre fechas.



**Figura 12.** Recuento de *Pseudomonas fluorescentes* (unidades formadoras de colonias por gramo de muestra seca); letras distintas denotan diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ) entre compost con distinto contenido en biochar, para cada fecha de muestreo.



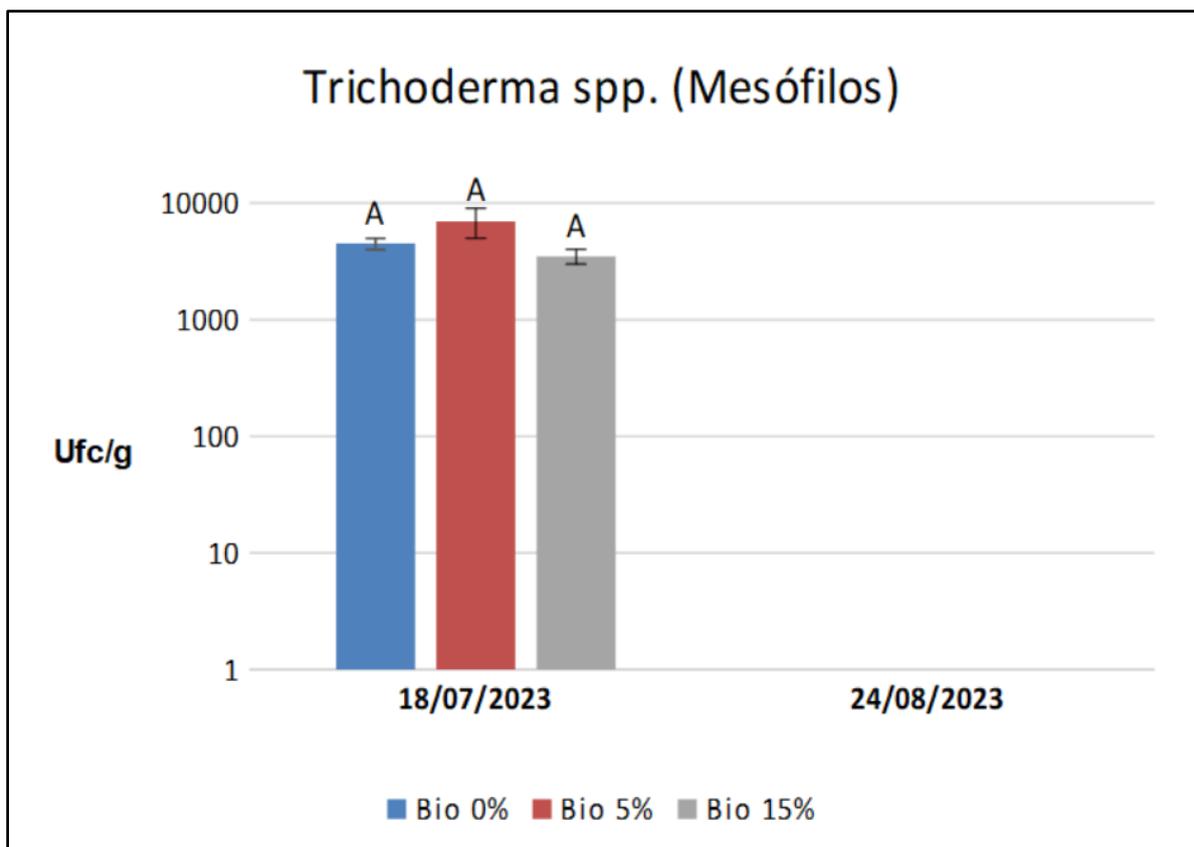
**Figura 13.** Recuento de bacterias totales (unidades formadoras de colonias por gramo de muestra seca); letras distintas denotan diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ) entre compost con distinto contenido en biochar, para cada fecha de muestreo.

Se aprecia una ligera reducción en la presencia de bacterias totales en el segundo volteo (Figura 13), aunque se debe de considerar que son bacterias potencialmente cultivables y

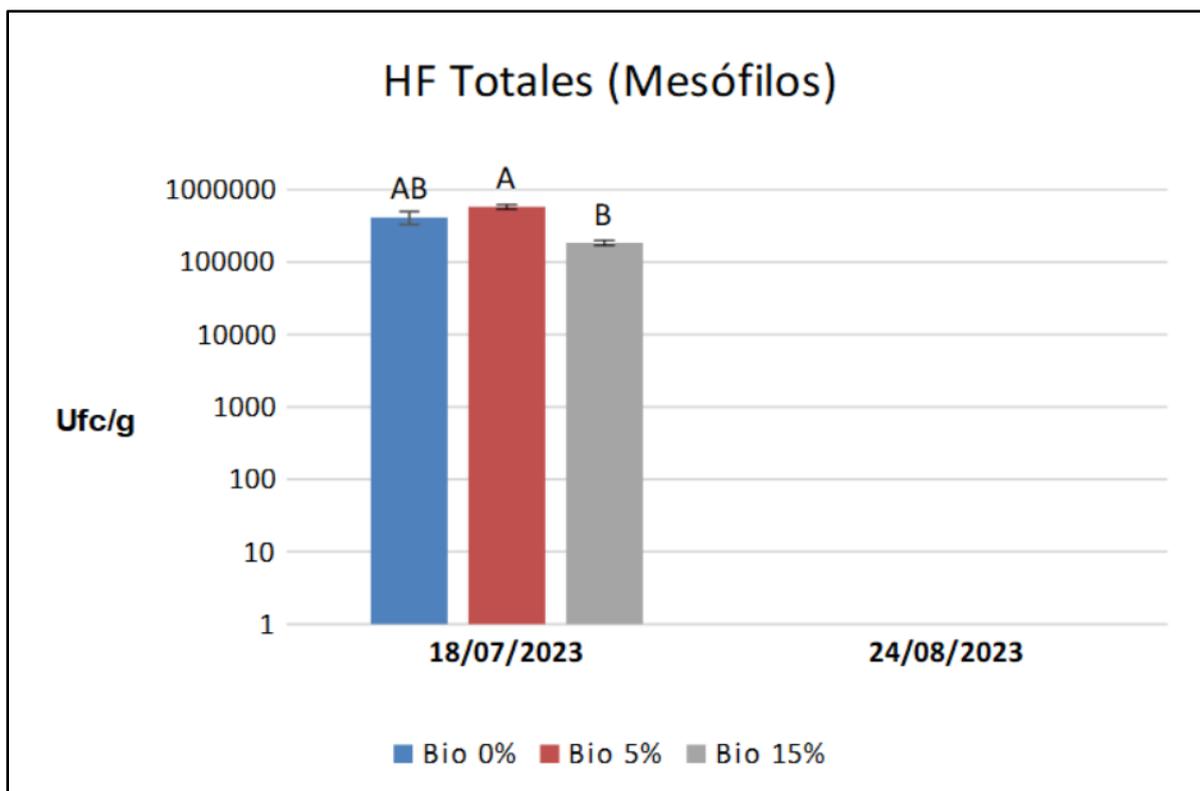
que no son necesariamente las presentes en la pila. Esto es debido a que el cultivo y estimación se realizan en condiciones de laboratorio.

### b. Mesófilos

No se detectaron organismos mesófilos en el segundo volteo (Figura 14 y Figura 15). Esto puede deberse a varias razones: un shock térmico, con temperaturas muy altas de la pila (aunque no se refleja en los datos tomados), un inóculo inicial bajo o las posibles interacciones con el material con el que se formó la pila de compost.

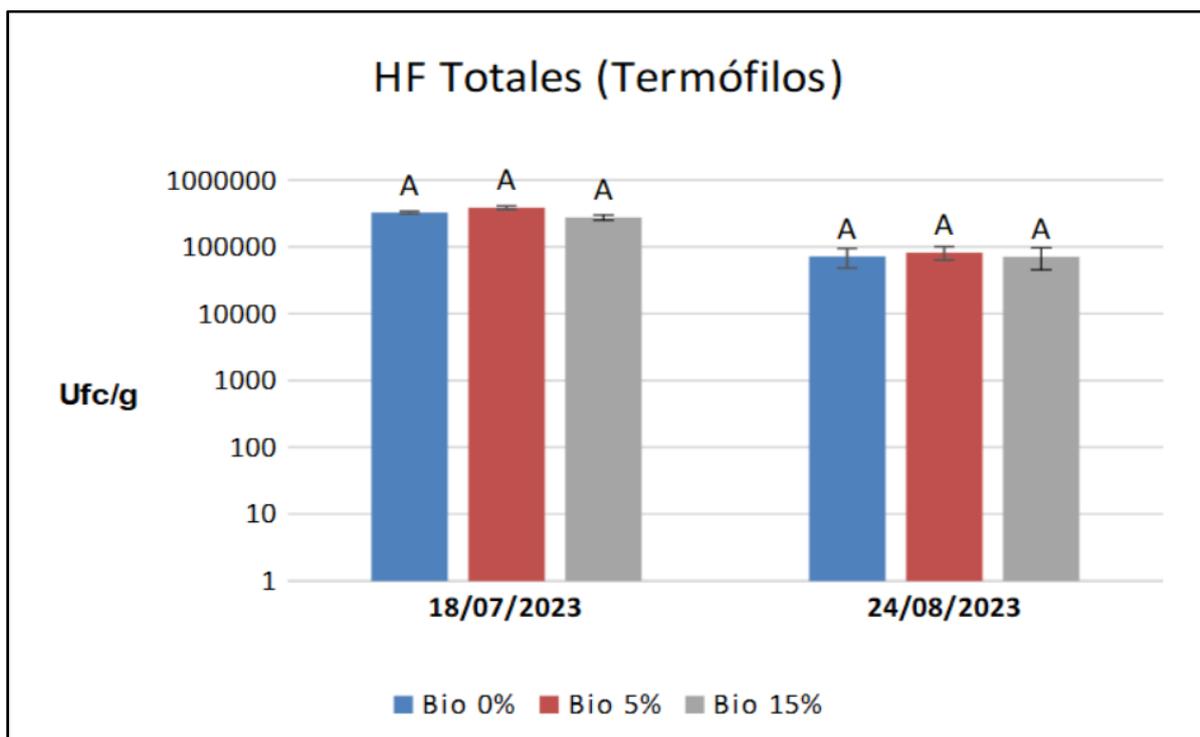


**Figura 14.** Recuento de *Trichoderma spp.* (unidades formadoras de colonias por gramo de muestra seca); letras distintas denotan diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ) entre compost con distinto contenido en biochar, para cada fecha de muestreo.



**Figura 15.** Recuento de hongos filamentosos totales mesófilos (unidades formadoras de colonias por gramo de muestra seca); letras distintas denotan diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ) entre compost con distinto contenido en biochar, para cada fecha de muestreo.

### c. Termófilos

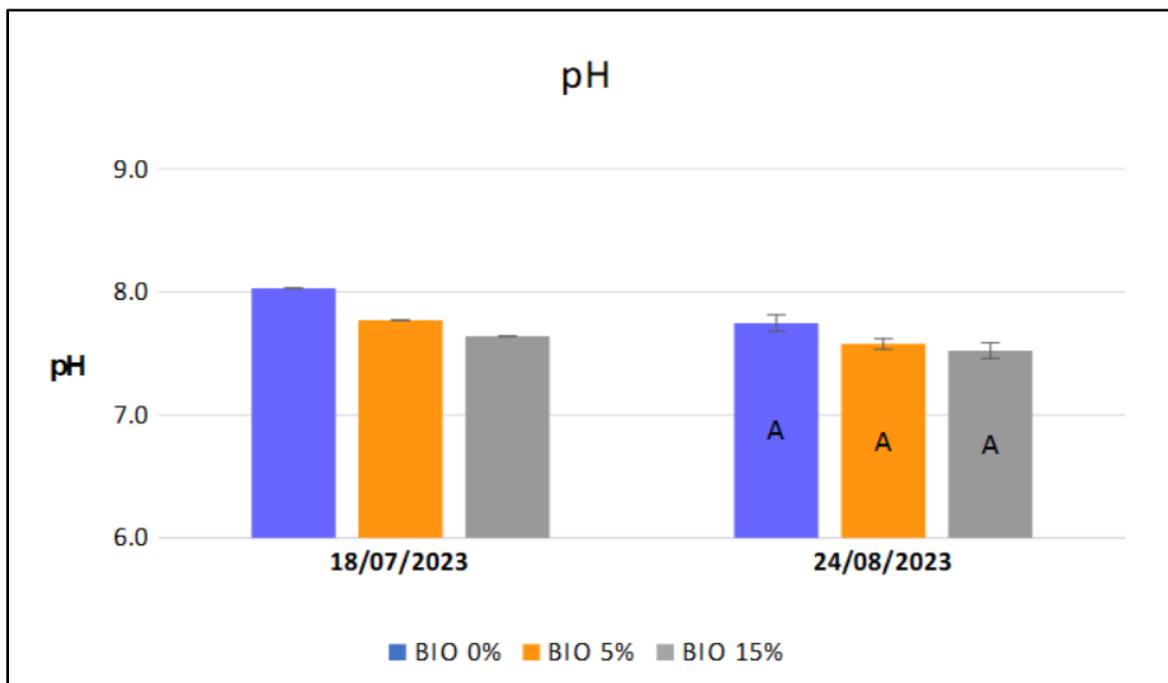


**Figura 16.** Recuento de hongos filamentosos totales termófilos (unidades formadoras de colonias por gramo de muestra seca); letras distintas denotan diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ) entre compost con distinto contenido en biochar, para cada fecha de muestreo.

Los hongos filamentosos de tipo termófilo (Figura 16) sufrieron un ligero descenso en la muestra tomada después del segundo volteo de la pila respecto al primero, lo que indica que la temperatura de la pila ha descendido y las condiciones no son tan adecuadas para el desarrollo de estos microorganismos.

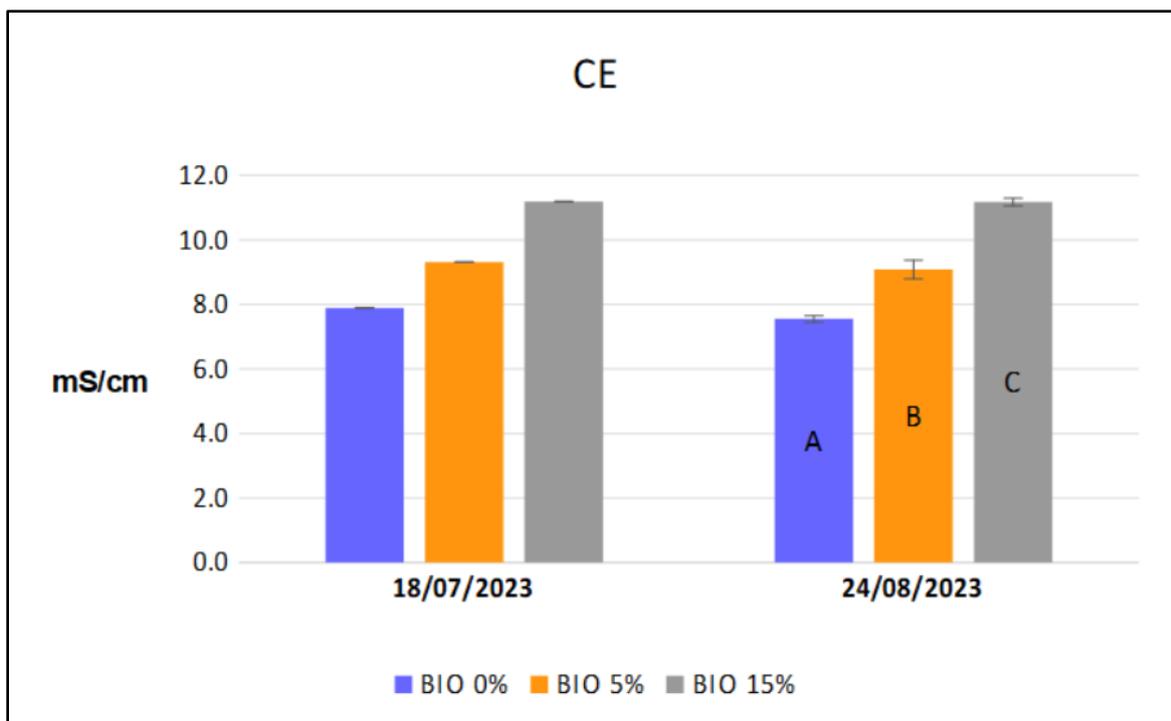
#### 4.4 Evolución de parámetros químicos de los tratamientos

Aunque no hay diferencias estadísticamente significativas, se refleja una tendencia de descenso del pH en el compost proporcional con las dosificaciones más altas de biochar (Figura 17). Esto es contradictorio con los resultados de Waqas et al. (2018) que describieron que la adición de biochar resultó en una alcalinización general del compost, aunque con valores en torno a un pH 8. Por otro lado, Zhang et al. (2014) describieron el efecto contrario, con una alcalinización general del compost en los primeros 7 días y una caída paulatina del pH del compost hasta los 30 días.



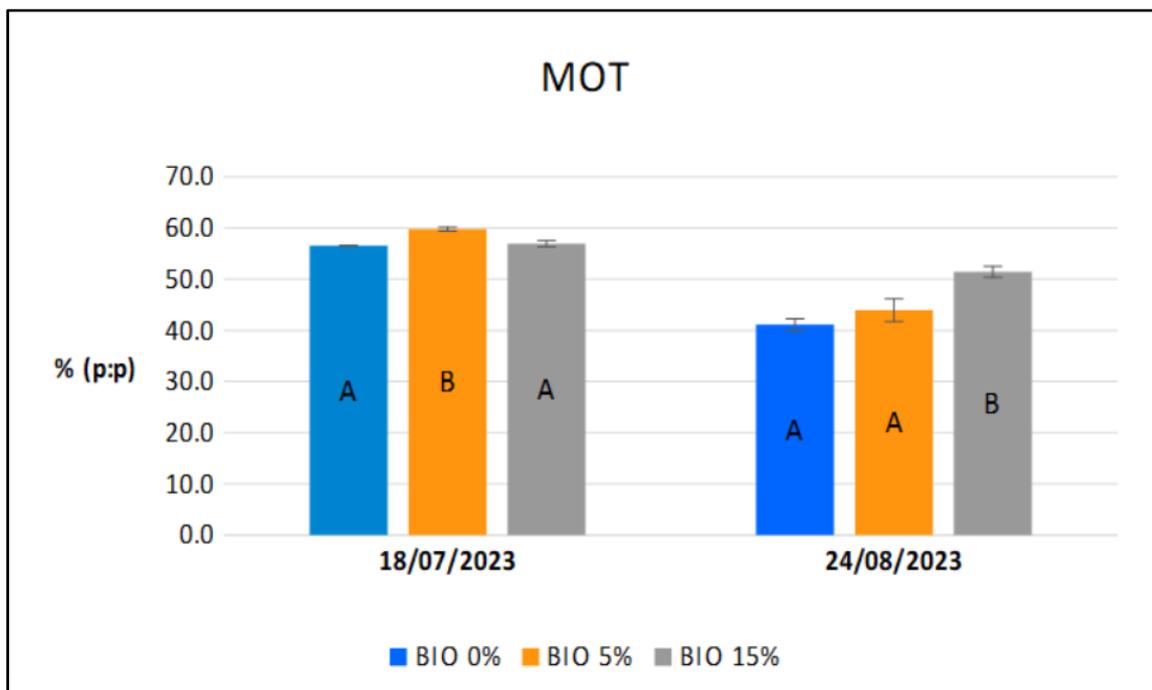
**Figura 17.** Evolución del pH en los distintos tratamientos; letras distintas denotan diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ) entre compost con distinto contenido en biochar, para cada fecha de muestreo.

La conductividad eléctrica tiende a aumentar de forma clara a medida que aumentan las cantidades de biochar sin verse realmente afectado por el compostaje. Esto puede estar relacionado con la elevada CE del biochar que genera esta tendencia (Figura 18).

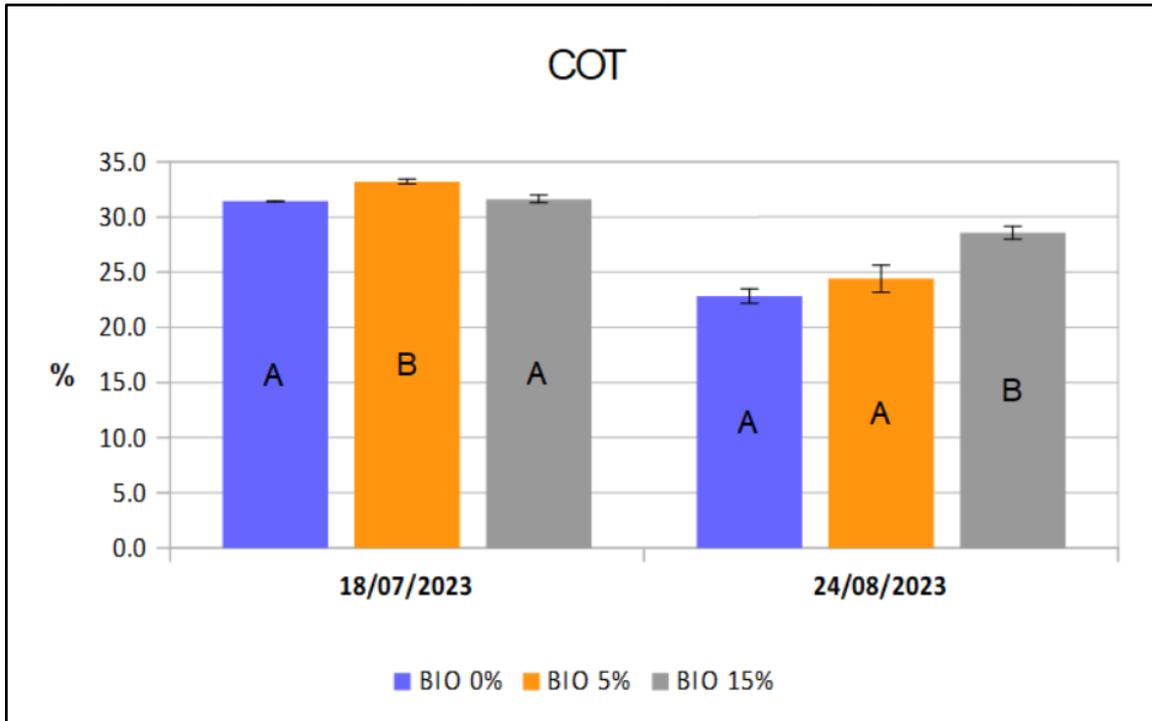


**Figura 18.** Evolución de la conductividad eléctrica (mS/cm) en los distintos tratamientos; letras distintas denotan diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ) entre compost con distinto contenido en biochar, para cada fecha de muestreo.

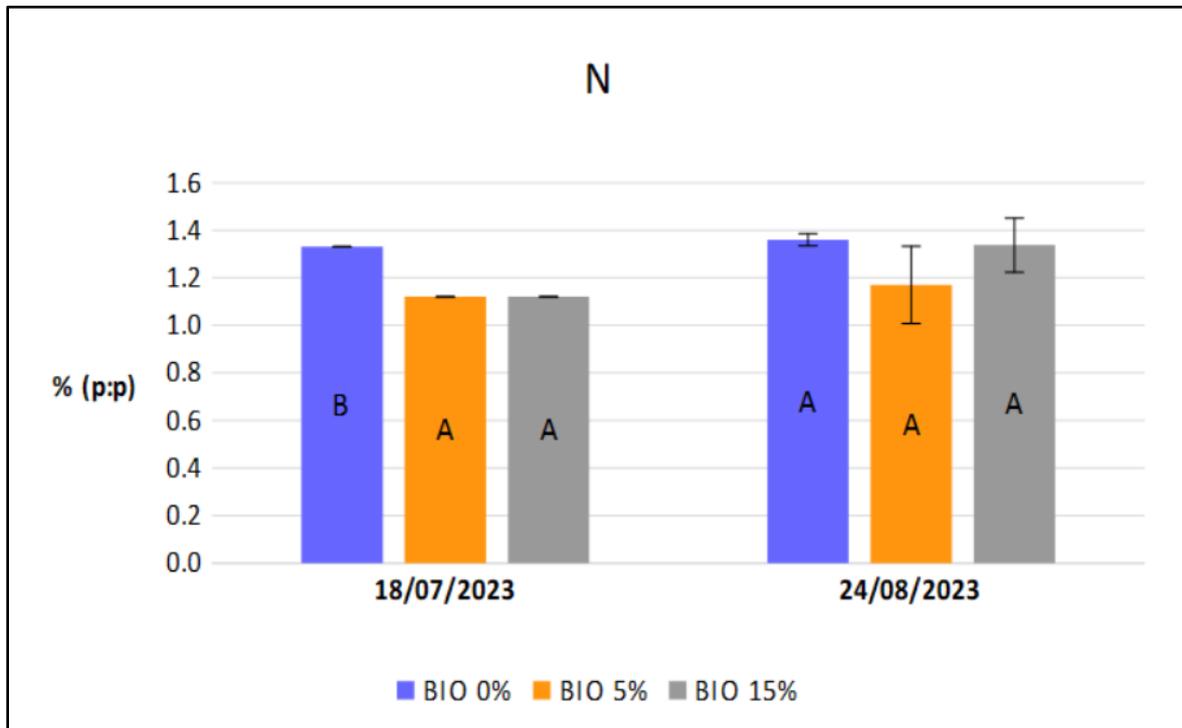
El aumento en la materia orgánica total y el carbono orgánico total (Figura 19 y Figura 20) observado en los tratamientos con biochar, principalmente en el segundo muestreo, estuvo influenciado por el incremento en el contenido de carbono aportado por el biochar.



**Figura 19.** Evolución de la Materia Orgánica Total (MOT) en los distintos tratamientos; letras distintas denotan diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ) entre compost con distinto contenido en biochar, para cada fecha de muestreo.



**Figura 20.** Evolución del Carbono Orgánico Total (COT) en los distintos tratamientos; letras distintas denotan diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ) entre compost con distinto contenido en biochar, para cada fecha de muestreo.

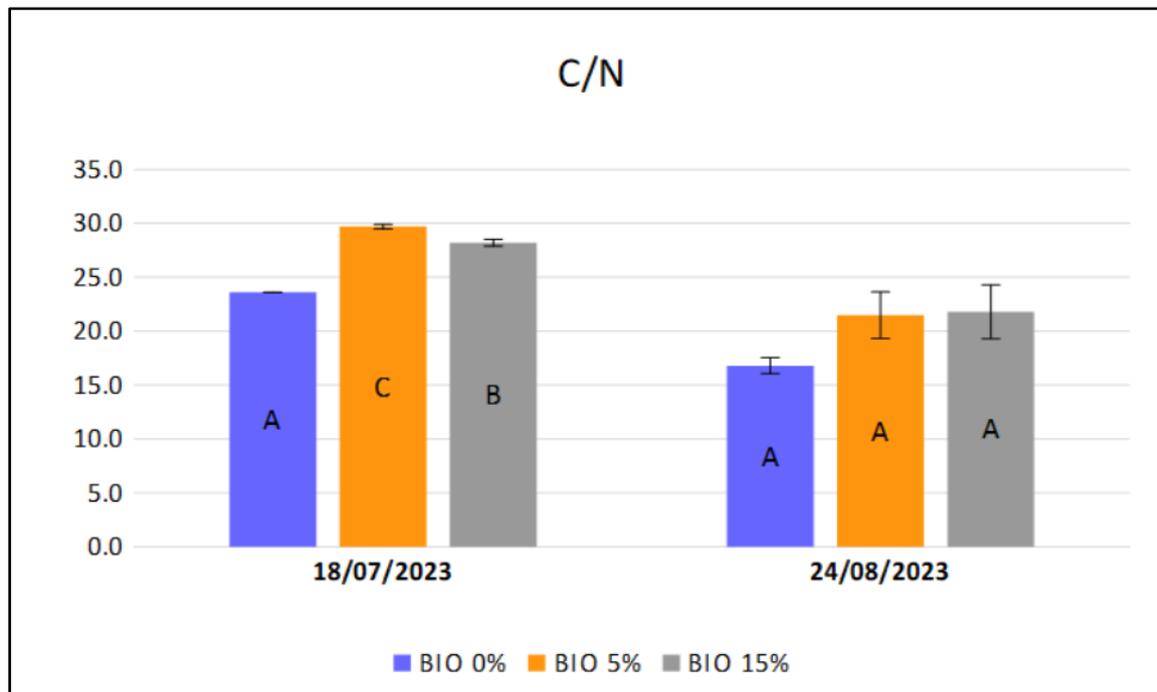


**Figura 21.** Evolución del nitrógeno total (N) en los distintos tratamientos; letras distintas denotan diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ) entre compost con distinto contenido en biochar, para cada fecha de muestreo.

En el primer muestreo se aprecian diferencias significativas en el contenido en nitrógeno entre el control y los dos tratamientos con biochar (Figura 21), pero después del proceso de compostaje estas diferencias no se observan. Al inicio, en los tratamientos con biochar parte del compost se sustituye por biochar, por lo que es normal que tengan menos nitrógeno.

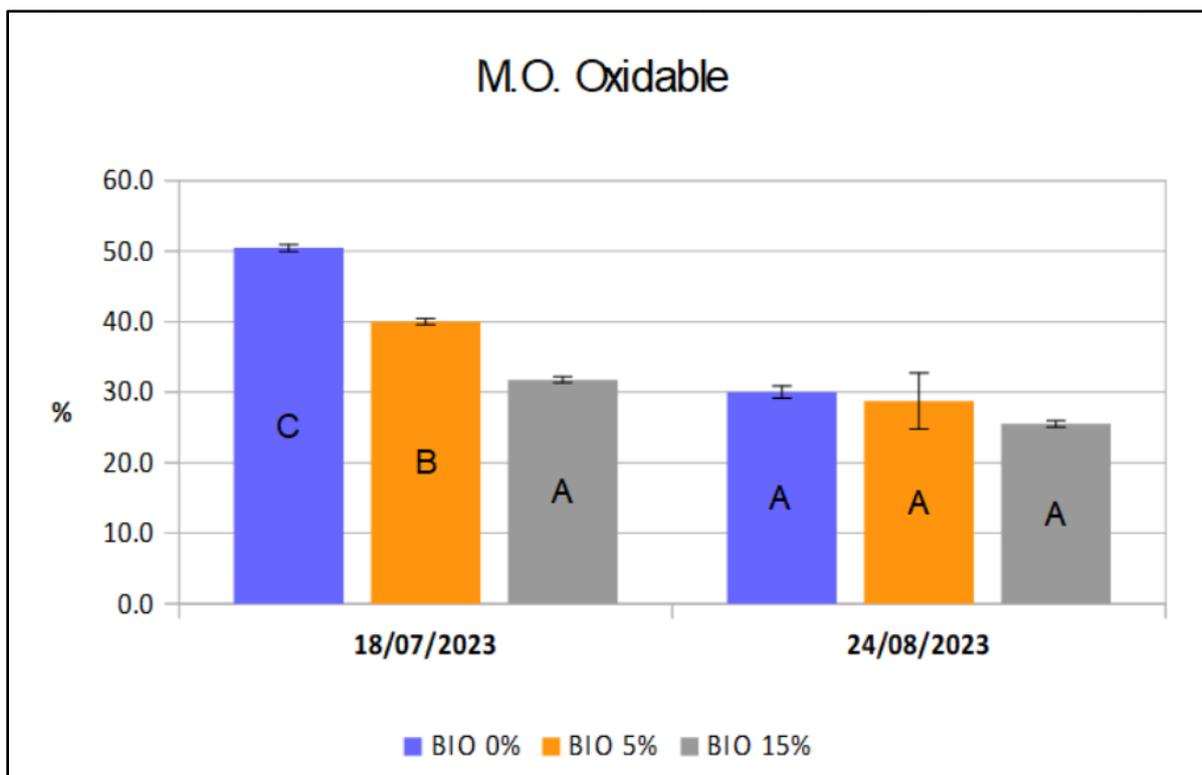
Posteriormente, el biochar puede retener parte del N soluble, lo que podría explicar que se vaya igualando el contenido en nitrógeno entre tratamientos.

En cuanto a la relación entre el carbono y el nitrógeno (C/N), la mayor relación C/N se encuentra en la muestra inicial en los tratamientos con biochar (Figura 22), lo cual se explica por su mayor contenido en carbono y menor en nitrógeno. Estas diferencias se pierden en el segundo muestreo. En general, se puede comprobar el descenso de los materiales ricos en carbono entre el primer conjunto muestral (18/07) y el segundo (24/08); esto se debe principalmente a la transformación de los materiales ricos en carbono en humus (Miyatake e Iwabuchi, 2005).



**Figura 22.** Evolución de la relación carbono nitrógeno (C/N) en los distintos tratamientos; letras distintas denotan diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ) entre compost con distinto contenido en biochar, para cada fecha de muestreo.

En cuanto a la materia orgánica oxidable se puede apreciar un comportamiento influido principalmente por la proporción de biochar en los tratamientos (Figura 23), con menor materia orgánica oxidable a mayor contenido en biochar, al tratarse de un material con carbono altamente recalcitrante.



**Figura 23.** evolución de la Materia Orgánica Oxidable (M.O. Ox.) en los distintos tratamientos; letras distintas denotan diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ) entre compost con distinto contenido en biochar, para cada fecha de muestreo.

# Conclusiones

- La adición de biochar tiene un efecto sobre el pH y, aunque no hubo diferencias significativas en el muestreo coincidente con el segundo volteo entre tratamientos, la tendencia parecería que es que con mayor dosificación de biochar menor es el pH.
- La conductividad eléctrica es mayor a mayores dosificaciones de biochar.
- Los efectos sobre la materia orgánica oxidable son claros; el biochar es un producto altamente recalcitrante y a mayores dosis menor es el contenido de carbono oxidable en el compost.
- De manera generalizada, se puede apreciar un descenso en las poblaciones de microorganismos a medida que avanza el proceso de compostaje, pero sin apreciarse diferencias entre tratamientos de biochar.
- Posteriores muestreos podrán aportar más información de cómo puede estar influyendo la presencia de biochar en las propiedades químicas y microbiológicas del compost.

# Bibliografia

- Agegnehu, G., Srivastava, A. K., & Bird, M. I. (2017). The role of biochar and biochar-compost in improving soil quality and crop performance: A review. *Applied Soil Ecology*, 119, 156–170. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.06.008>
- Allohverdi, T., Mohanty, A. K., Roy, P., & Misra, M. (2021). A review on current status of biochar uses in agriculture. *Molecules*, 26(18), 5584. <https://doi.org/10.3390/molecules26185584>
- Biederman, L. A., & Harpole, W. S. (2012). Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis. *Gcb Bioenergy*, 5(2), 202–214. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12037>
- Borchard, N., Siemens, J., Ladd, B., Möller, A., & Amelung, W. (2014). Application of biochars to sandy and silty soil failed to increase maize yield under common agricultural practice. *Soil & Tillage Research*, 144, 184–194. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.07.016>
- Chen, J., Liu, X., Zheng, J., Zhang, B., Lu, H., Zhong-Zhi, C., Pan, G., Li, L., Zheng, J., Xu-Hui, Z., Wang, J., & Yu, X. (2013). Biochar soil amendment increased bacterial but decreased fungal gene abundance with shifts in community structure in a slightly acid rice paddy from Southwest China. *Applied Soil Ecology*, 71, 33–44. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2013.05.003>
- Fujio, Y., & Kume, S. (1991). Isolation and identification of thermophilic bacteria from sewage sludge compost. *Journal of Fermentation and Bioengineering*, 72(5), 334–337. [https://doi.org/10.1016/0922-338x\(91\)90082-r](https://doi.org/10.1016/0922-338x(91)90082-r)
- Gao, S., DeLuca, T. H., & Cleveland, C. C. (2019). Biochar additions alter phosphorus and nitrogen availability in agricultural ecosystems: A meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 654, 463–472. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.124>

- Gaskin, J. W., Speir, R., Harris, K. M., Das, K. C., Lee, R. D., Morris, L. A., & Fisher, D. K. (2010). Effect of peanut hull and pine chip biochar on soil nutrients, corn nutrient status, and yield. *Agronomy Journal*, *102*(2), 623–633.  
<https://doi.org/10.2134/agronj2009.0083>
- Glaser, B., & Birk, J. J. (2012). State of the scientific knowledge on properties and genesis of Anthropogenic Dark Earths in Central Amazonia (terra preta de Índio). *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, *82*, 39–51. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2010.11.029>
- Gluba, Ł., Rafalska-Przysucha, A., Szewczak, K., Łukowski, M., Szlązak, R., Vitková, J., Kobyłecki, R., Bis, Z., Wichliński, M., Zarzycki, R., Kacprzak, A., & Usowicz, B. (2021). Effect of Fine Size-Fractionated Sunflower Husk Biochar on water retention properties of arable sandy soil. *Materials*, *14*(6), 1335. <https://doi.org/10.3390/ma14061335>
- Gruss, I., Twardowski, J., Latawiec, A. E., Medyńska-Juraszek, A., & Królczyk, J. B. (2019). Risk assessment of low-temperature biochar used as soil amendment on soil mesofauna. *Environmental Science and Pollution Research*, *26*(18), 18230–18239.  
<https://doi.org/10.1007/s11356-019-05153-7>
- Güereña, D., Lehmann, J., Hanley, K., Enders, A., Hyland, C., & Riha, S. J. (2012). Nitrogen dynamics following field application of biochar in a temperate North American maize-based production system. *Plant and Soil*, *365*(1–2), 239–254.  
<https://doi.org/10.1007/s11104-012-1383-4>
- Gul, S., Whalen, J. K., Thomas, B. W., Sachdeva, V., & Deng, H. (2015). Physico-chemical properties and microbial responses in biochar-amended soils: Mechanisms and future directions. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *206*, 46–59.  
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.03.015>
- Gwenzi, W., Chaukura, N., Mukome, F. N., Machado, S., & Nyamasoka, B. (2015). Biochar production and applications in sub-Saharan Africa: Opportunities, constraints, risks and uncertainties. *Journal of Environmental Management*, *150*, 250–261.  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.11.027>

- Haider, F. U., Coulter, J. A., Cai, L., Hussain, S., Cheema, S. A., Wu, J., & Zhang, R. (2022). An overview on biochar production, its implications, and mechanisms of biochar-induced amelioration of soil and plant characteristics. *Pedosphere*, 32(1), 107–130.  
[https://doi.org/10.1016/s1002-0160\(20\)60094-7](https://doi.org/10.1016/s1002-0160(20)60094-7)
- Labrador, J., Porcuna, J. L., & Jaizme Vega, M. C. (2020). *Vivificar el suelo. Conocimientos y prácticas agroecológicas*.
- Li, X., Wang, T., Chang, S. X., Jiang, X., & Song, Y. (2020). Biochar increases soil microbial biomass but has variable effects on microbial diversity: A meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 749, 141593.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141593>
- Mariloli. (2014). VALORIZACIÓN de los restos vegetales: COMPOSTAJE. Parte II. *A En Verde - Medio De Información De Agricultura*. <https://www.aenverde.es/valorizacion-de-los-restos-vegetales-compostaje-parte-ii/>
- Miyatake, F., & Iwabuchi, K. (2005). Effect of high compost temperature on enzymatic activity and species diversity of culturable bacteria in cattle manure compost. *Bioresource Technology*, 96(16), 1821–1825.  
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.01.005>
- Miyatake, F., & Iwabuchi, K. (2006). Effect of compost temperature on oxygen uptake rate, specific growth rate and enzymatic activity of microorganisms in dairy cattle manure. *Bioresource Technology*, 97(7), 961–965.  
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.04.035>
- Ponge, J., Topoliantz, S., Ballof, S., Rossi, J., Lavelle, P., Betsch, J., & Gaucher, P. (2006). Ingestion of charcoal by the Amazonian earthworm *Pontoscolex corethrurus*: A potential for tropical soil fertility. *Soil Biology & Biochemistry*, 38(7), 2008–2009.  
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2005.12.024>

- Roy, P., & Dias, G. (2017). Prospects for pyrolysis technologies in the bioenergy sector: A review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 77, 59–69.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.136>
- Schulz, H., & Glaser, B. (2012). Effects of biochar compared to organic and inorganic fertilizers on soil quality and plant growth in a greenhouse experiment. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 175(3), 410–422. <https://doi.org/10.1002/jpln.201100143>
- Schulz, H., Dunst, G., & Glaser, B. (2013). Positive effects of composted biochar on plant growth and soil fertility. *Agronomy for Sustainable Development*, 33(4), 817–827.  
<https://doi.org/10.1007/s13593-013-0150-0>
- Suliman, W., Harsh, J. B., Abu-Lail, N. I., Fortuna, A., Dallmeyer, I., & García-Pérez, M. (2017). The role of biochar porosity and surface functionality in augmenting hydrologic properties of a sandy soil. *Science of the Total Environment*, 574, 139–147.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.025>
- *TECNOLOGÍA Y CIENCIA | Otro blog de Tecnología en la enseñanza.* (2015). Gobierno de Canarias. <https://www3.gobiernodecanarias.org/medusa/ecoblog/msiedel/>
- Thies, J., Rillig, M., & Graber, E. (2015). Biochar effects on the abundance, activity and diversity of the soil biota. *Biochar for environmental management: science, technology and implementation*, 2, 327-389.  
[https://scholar.google.com/citations?view\\_op=view\\_citation&hl=en&user=SZAJzysAAAAJ&cstart=20&pagesize=80&sortby=pubdate&citation\\_for\\_view=SZAJzysAAAAJ:08ZZubdi9fEC](https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=en&user=SZAJzysAAAAJ&cstart=20&pagesize=80&sortby=pubdate&citation_for_view=SZAJzysAAAAJ:08ZZubdi9fEC)
- Van Gestel, M., Merckx, R., & Vlassak, K. (1993). Microbial biomass responses to soil drying and rewetting: The fate of fast- and slow-growing microorganisms in soils from different climates. *Soil Biology & Biochemistry*, 25(1), 109–123.  
[https://doi.org/10.1016/0038-0717\(93\)90249-b](https://doi.org/10.1016/0038-0717(93)90249-b)

- Waqas, M., Nizami, A., Aburizaiza, A., Barakat, M., Ismail, I. M. I., & Rashid, M. I. (2018). Optimization of food waste compost with the use of biochar. *Journal of Environmental Management*, 216, 70–81. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.06.015>
- Wichuk, K., & McCartney, D. (2007). A review of the effectiveness of current time–temperature regulations on pathogen inactivation during composting. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 6(5), 573–586. <https://doi.org/10.1139/s07-011>
- Winsley, P. (2007). *Biochar and bioenergy production for climate change mitigation*. <https://www.semanticscholar.org/paper/Biochar-and-bioenergy-production-for-climate-change-Winsley/83ccad73f3f0f29cc11734b23f08437282be1663>
- Woolf, D., Amonette, J. E., Street-Perrott, F. A., Lehmann, J., & Joseph, S. (2010). Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nature Communications*, 1(1). <https://doi.org/10.1038/ncomms1053>
- Yaashikaa, P., Kumar, P. S., Varjani, S., & Saravanan, A. (2020). A critical review on the biochar production techniques, characterization, stability and applications for circular bioeconomy. *Biotechnology Reports*, 28, e00570. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2020.e00570>
- Yu, O., Raichle, B. W., & Sink, S. (2013). Impact of biochar on the water holding capacity of loamy sand soil. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 4(1), 44. <https://doi.org/10.1186/2251-6832-4-44>
- Zhang, J., Lü, F., Shao, L., & He, P. (2014). The use of biochar-amended composting to improve the humification and degradation of sewage sludge. *Bioresource Technology*, 168, 252–258. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.02.080>
- Zhao, B., O'Connor, D., Shen, Z., Tsang, D. C., Rinklebe, J., & Hou, D. (2020). Sulfur-modified biochar as a soil amendment to stabilize mercury pollution: An accelerated simulation of long-term aging effects. *Environmental Pollution*, 264, 114687. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114687>