

# Biocarbón: Estado del arte, avances y perspectivas en el manejo del suelo



Revista EIA  
ISSN 1794-1237  
e-ISSN 2463-0950  
Año XIX/ Volumen 20/ Edición N.39  
Enero-Junio de 2023  
Reia3919 pp. 1-13

Publicación científica semestral  
Universidad EIA, Envigado, Colombia

## PARA CITAR ESTE ARTÍCULO / TO REFERENCE THIS ARTICLE /

Aguirre-Forero, S.; Villa-Parejo, J.;  
Piraneque-Gambasica, N.  
Biocarbón: Estado del arte, avances y  
perspectivas en el manejo del suelo  
Revista EIA, 20(39), Reia3919.  
pp. 1-13.  
<https://doi.org/10.24050/reia.v20i39.1651>

## ✉ Autor de correspondencia:

Aguirre-Forero, S. (Sonia)  
Ingeniera Agrónoma, Magíster en  
Ciencias Agrarias, Doctora en Ciencias  
Agrarias.  
Correo electrónico:  
[saguirre@unimagdalena.edu.co](mailto:saguirre@unimagdalena.edu.co)

**Recibido:** 26-10-2022

**Aceptado:** 12-09-2022

**Disponible online:** 01-01-2023

✉ SONIA E. AGUIRRE-FORERO<sup>1</sup>

JOSÉ A. VILLA-PAREJO<sup>1</sup>

NELSON V. PIRANEQUE-GAMBASICA<sup>1</sup>

1. Universidad del Magdalena, Santa Marta, Magdalena, Colombia.

## RESUMEN

El biocarbón generado a partir de la pirolisis de materiales orgánicos no solo reduce las emisiones de GEI, sino que impacta muchas otras propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo.

El objetivo del presente artículo fue el de presentar una revisión sistemática de bases de datos en línea acerca del avance y tendencias de conocimiento existente sobre Biocarbón, tema significativo que contribuye a la actualización, síntesis y difusión de conocimientos y permite clasificar el flujo creciente de información e identificar aspectos acreditados de 2011 a 2022.

Durante el periodo, se recopilaron 253 artículos científicos y se seleccionaron 119; se trabajó redes de co-ocurrencia con información representada gráficamente para visualizar número total de conexiones entre entidades, agrupamiento (subdominios) y localizar sinónimos, entre otros. Uno de los criterios de selección fue tipo de publicación y la sinopsis del estudio del efecto del biocarbón en suelo, importancia ambiental y uso en el sector agrícola, así como los enfoques metodológicos del proceso de investigación y viabilidad de implementación.

Los resultados evidenciaron notable incremento de investigación en el tema en los últimos años, con reportes de efectividad, como acondicionador, remediador de suelos, mitigación de GEI y una tendencia para descontaminación de aguas y suelos con un positivo avance de nuevas investigaciones. No obstante, es necesario supervisar los efectos de su aplicación a mediano y largo plazo para originar procesos de producción más limpia en el sector agrícola.

**Palabras clave:** Biocarbón, Biomasa, Enmiendas del suelo, Pirolisis, Aplicación de biocarbón, Adsorbente, Remediación ambiental, Suelos afectados por sales, Carbono del suelo, Sostenibilidad, Mitigación de gases efecto invernadero, Emisión de gases efecto invernadero.

# Biochar: State-of-the-art advances and perspectives for soil management

## Abstract

Biochar generated from the pyrolysis of organic materials reduces GHG emissions and impacts the soil's many other physical, chemical, and biological properties.

This paper aims to show a systematic review of online databases about the progress and trends of knowledge in biochar, an important topic that contributes to the updating, synthesis, and dissemination of knowledge and allows classifying the growing flow of information and identifying accredited aspects from 2011 to 2022.

From 2011 to 2022, 253 scientific articles were collected and 119 were selected. Co-occurrence networks were worked on, and the information was represented through graphs to visualize the total number of connections between entities, grouping (subdomains), and locating synonyms, among others. One of the selection criteria was the type of publication and the synopsis of the study of the effect of biochar on soil, environmental importance, and use in the agricultural sector, as well as the methodological approaches of the research process and implementation feasibility.

The results showed a notable increase in research on the subject in recent years, with reports of effectiveness, as a soil conditioner and remediator, GHG mitigation, and a trend for water and soil decontamination with positive progress of new research. However, it is necessary to monitor the effects of the application of biochar in the medium and long term to originate cleaner production processes in the agricultural sector.

**Keywords:** Biochar, biomass, Soil amendment, Pyrolysis, Biochar application, Adsorbent, Environmental remediation, Salt-affected soils, Soil carbon, Sustainability, GHG mitigation, GHG emission

## 1. Introducción

El biochar (biocarbon o carbón vegetal) conocido desde hace miles de años, es originario de la cuenca amazónica (Glaser y Birk, 2012), donde tribus indígenas tenían como practica cultivar añadiendo restos de residuos orgánicos derivados de quema a fuego lento (sin oxígeno) de madera y otros residuos, sobre suelos (ultisoles y oxisoles) creando parches fértiles o tierras oscuras, colores producidos por la estabilización del carbono orgánico en áreas específicas. Hoy, el biocarbón, es el producto de la pirolisis de la biomasa y ante la creciente crisis ambiental, ha repuntado el interés de muchos investigadores, al presentar propiedades de hidro-retenedor, filtración de lixiviados,

remediador de suelos degradados, precursor de carbono estable, secuestro de CO<sub>2</sub>, entre otros.

El objetivo del presente artículo fue el de presentar una revisión sistemática de bases de datos en línea acerca del avance y tendencias de conocimiento existente sobre Biocarbón. El trabajo permitirá optimizar búsquedas selectas, agrupar trabajos en torno a biocarbón con énfasis en temas agroambientales, lo que favorece la actualización, síntesis y difusión de conocimientos, permite clasificar el flujo creciente de información e identificar contenidos específicos en el área, es una forma de comparar antecedentes, para mejor análisis y discusión de resultados de investigación en torno al tema.

## 2. Materiales y Métodos

Mediante un enfoque mixto, se identificó los principales estudios sobre biocarbón en el sector agroambiental, sus líneas de investigación y aplicaciones. Para la revisión se usó la metodología propuesta por Cruz-O'byrne et al. (2021) estableciendo fases que van desde la construcción de una ecuación de búsqueda hasta el análisis de los resultados.

**Ecuación de búsqueda:** Para la exploración sistemática de información sobre biochar en suelos se seleccionó la base de datos especializada Scopus de Elsevier, donde con las palabras claves *biochar*, *degraded soil* y *soil degradation*, en el campo de búsqueda TITLE-ABS-KEY con limitación documental de solo artículos científicos, se obtuvo la siguiente ecuación de búsqueda:

TITLE-ABS-KEY (biochar AND (“degraded soil” OR “Soil degradation”)) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, “ar”))

**Descarga y procesamiento de datos:** La ecuación de búsqueda arrojó 253 artículos, sometidos a revisión, verificación, ordenamiento de estructura, y suministro de información faltante para ser procesados. Al mismo tiempo, se seleccionó estudios que tuvieran relación directa con suelos (degradados). Como resultado se expusieron 119 artículos para análisis.

**Líneas de investigación:** Se estableció a través de mapas de redes de coocurrencia con palabras clave con un mínimo de ocurrencias de cuatro con el software VOSviewer v1.6.17. Simultáneamente, para la revisión y análisis de los artículos se creó una base de datos en Excel incluyendo información relevante: año de publicación, título, revista, objetivo, preguntas de investigación y resumen.

### 3. Resultados y Discusión

**Top de palabras clave y mapa de redes de coocurrencia:** De los artículos analizados “biochar y su aplicación a suelos degradados”, se extrajo un total de 758 palabras claves de autor. Adicionalmente al término “Biochar”, “Soil degradation” presenta mayor ocurrencia con 22 documentos, seguido de “Soil fertility” (14), “Degraded soil” (12), “Compost” (12), “Carbon sequestration” (11), “Pyrolysis” (10), “Heavy metal” (10), “Soil Amendment” (9) y “Soil quality” (9).

El mapa de redes de coocurrencia mostro 30 términos agrupados en seis clústeres (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). El clúster rojo con 8 términos fue seguido del verde (7), el azul con (5), el amarillo (4), el violeta (3) y el azul claro (3). Cabe mencionar que el tamaño más grande de los nodos pertenece a la palabra de mayor frecuencia, “Biochar” (grupo verde) y está interconectada con los demás grupos. De los 253 artículos referentes al tema se seleccionaron 119 artículos y se evidencia incremento en número de artículos científicos a partir de 2020 (Figura 2), es de aclarar que el cierre de la ventana en 2022 fue junio y en un periodo de 6 meses se vincularon 15 artículos.

Figura 1. Mapa de visualización de red de VOSviewer de coocurrencia de palabras clave.

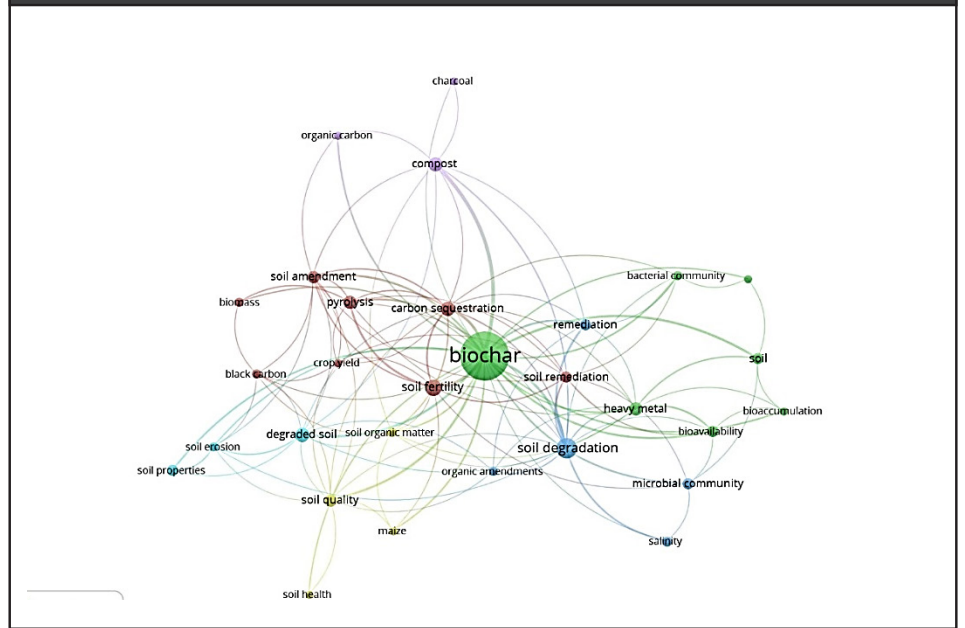
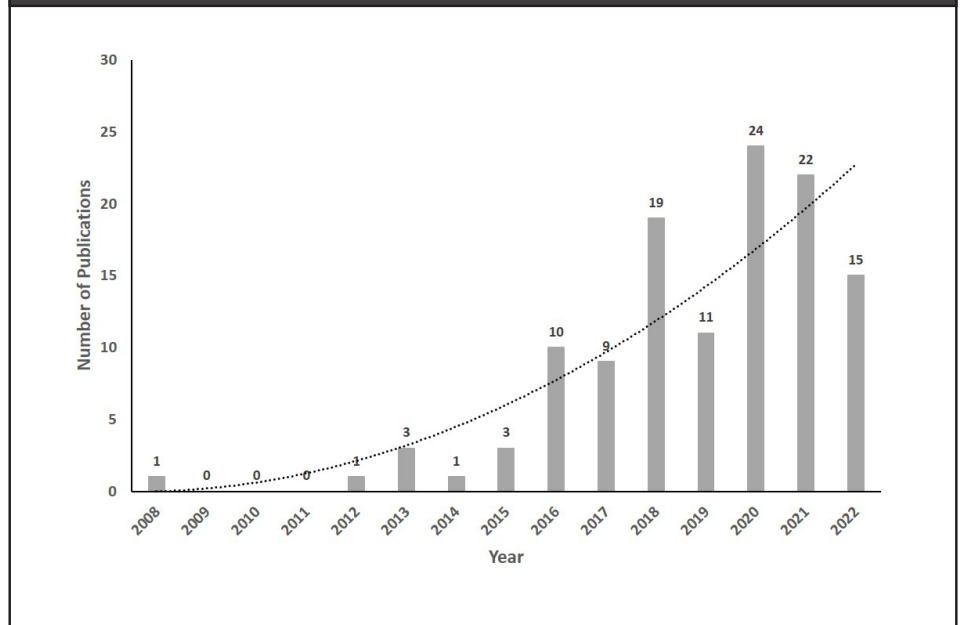


Figura 2. Distribución cronológica de estudios relacionados con el uso de biocarbón (2008-2022).



**Biocarbón en remediación de suelos, producción agrícola y la mitigación del cambio climático:** Investigaciones sobre biocarbón elaborado a partir de las biomásas descritas en la tabla 1, indican que es una enmienda para suelos con limitaciones, que mejora significativamente pH, CIC, aumenta la disponibilidad del P, K, Na y Ca, estabilidad estructura y el contenido de humedad, lo que conduce a mayor rendimiento de cultivos (Nguyen et al., 2021). Aplicado en suelos pobres mejora condiciones edáficas y mantiene macroagregados, importante porque es donde el K, el P y el N son menos susceptibles a pérdidas. Fonseca et al., (2021), reportan efecto de protección, adsorción y encapsulación del carbono orgánico del suelo (COS), concluyendo que secuestra carbono en zonas con bajo contenido de materia orgánica (Liu et al., 2018).

*Tabla 1. Tipos de biomasa utilizadas para producir biocarbón.*

Tipo de biomasa	Autor
Paja de arroz	(Singh et al., 2021)
Cáscara de café	(Nguyen et al., 2021)
Ramas de árboles de manzano	(Qiang et al., 2020)
Residuos maderables	(Zhang et al., 2020)
Restos de maíz	(Palakit et al., 2018)
Madera de acacia	(Kebede et al., 2022).
Estiércol de pollo y aserrín	(Lin et al., 2017)
Madera de eucalipto	(Güereña et al., 2016)
Aspidosperma de quebracho blanco	(Delaye, Ullé y Andriulo, 2020)
Bambú	(Liu et al., 2018)
Cáscara de arroz	(Bu et al., 2017)

Tipo de biomasa	Autor
Madera dura	(Laird et al., 2017)
Cáscaras de coco y cáscaras de nuez	(Jegajeevagan et al., 2016)
Madera de pino, pasto ( <i>Timothy</i> ) y paja de trigo	(Nanda et al., 2013)
Paja de maíz	(Li et al., 2022)
Tallos de pasto elefante y bagazo de caña de azúcar	(Fonseca et al., 2021)
Pedúnculo de banano	(Karim et al., 2019)
Madera de guaje blanco	(Jien et al., 2012)

Por otro lado, Jiang et al. (2020) argumentan que el biocarbón reduce emisiones de óxido nitroso ( $N_2O$ ) al aumentar el pH. Así mismo, la captura de gases como  $CO_2$  y  $CH_4$  ha sido discutida, encontrando que el biocarbón mejora el flujo de  $CO_2$  en el suelo por la estimulación de la micro biota que aumenta significativamente la absorción de  $CH_4$ , favoreciendo la aireación y retención de agua (Bai, Fernández y Spencer, 2022; Fang et al., 2016; Hansen et al., 2016). Sin embargo, algunas investigaciones reportan que la aplicación de biocarbón elaborado a partir de madera nativa (Schillem et al., 2019), residuos de brócoli (Mohawesh et al., 2018) y paja de maíz ( Wei et al., 2021) no presentó efecto significativo en la producción vegetal, lo que evidencia que los resultados de su aplicación, fluctúan de acuerdo al tipo de biomasa, condiciones de pirólisis, proceso y características edáficas, entre otros.

**Biocarbón en adsorción contaminantes y estimulación microbiana:** En la tabla 2, se observa suelos con diferentes contaminantes, que luego de ser tratados con biocarbón; aumentaron la CIC, restringieron lixiviación y la biodisponibilidad de contaminantes (Lahori et al., 2020; Manna y Singh, 2019) y reduce la fitotoxicidad en las plantas; efectos atribuidos al aumento inducido del pH y al área superficial (Adejumo, Owoseni y Mur, 2021; Chen et al., 2022), proporcionan efecto positivo sobre la absorción y translocación de metales pesados en algunas especies de plantas (Abbas et al., 2018; Khan et al., 2018). Fang et al. (2016) afirma que cuando hay humedad

y temperatura alta (40 °C), la adición de biocarbón favoreció la degradación de Bifenilos policlorados (PCB) y el Isotiocianato de metilo (MITC).

**Tabla 2.** Contaminante degradado y tipo de biomasa utiliza para producir biocarbón.

Contaminante degradado	Tipo de biomasa utilizada	Autor
Cd.	Tabaco	(Lahori et al., 2020)
	Tallos de maíz	(Wu et al., 2018)
	Madera dura, bagazo y residuos de peine de maíz	(Khan et al., 2018)
Cd y Na.	Biomasa de trigo	(Abbas et al., 2018)
Pb.	Cascara de arroz	(Adejumo, Owoseni y Mur, 2021)
	Ramas de plátano oriental	(Chen et al., 2022)
Ar y Cu.	Hueso de aceituna y cascarilla de arroz	(De la Rosa et al., 2022)
Pb, Cu, Cd, Mn, Ar, Ni, Zn y Hg.	Paja de <i>Miscanthus giganteus</i> Madera dura Estiercol de granja Residuos de arroz	(Khan et al., 2020) (Madrid y Marrugo-Negrete, 2021) (Nawab et al., 2019)
Bifenilos policlorados (PCB)	Aguja de pino y paja de trigo Bambú	(Tran et al., 2020) (Huang et al., 2018)
Isotiocianato de metilo (MITC)	Maderas duras mixta	Fang et al. (2016)
Pirazosulfuron-etilo	Paja de trigo y arroz	(Manna y Singh, 2019)
Glifosato (N-(fosfonometil)-glicina) y Diuron (3-(3,4-diclorofenil)-1,1-dimetilurea)	Madera de abedul ( <i>Betula sp.</i> ) y madera de abeto noruego ( <i>Picea abies</i> )	(Zhelezova, Cederlund y Stenström, 2017)
Tierras raras (REE)	Bambú	(Zhang et al., 2020)



A la par, informes registran que el biocarbón produce efectos significativos sobre la abundancia, composición y diversidad microbiana, mejora actividad y metabolismo, aumenta la cantidad de carbono orgánico disuelto (COD) e incrementa respiración microbiana, con relación directa sobre la actividad biológica del suelo (Ali et al., 2020; Espinosa et al., 2020; Han et al., 2022; Jien et al., 2021; Teutscherova et al., 2018; Zhang et al., 2020). Así pues, en la tabla 3 se exponen diferentes géneros bacterianos que están influenciados tras la aplicación de biocarbón y aumentan la población (Andrés et al., 2019). En suelos contaminados con metales pesados la adición de biocarbón conduce a la proliferación de bacterias anaeróbicas capaces de ayudar a excluir metales pesados como Pb, Cu y As (Liang et al., 2018). Es oportuno recordar que Luo et al. (2020) afirmó que las alteraciones de la abundancia y la comunidad bacteriana en el suelo están interrelacionadas con las propiedades químicas, como pH, disponibilidad de K y P.

Tabla 3. Comunidades bacterianas beneficiadas con la aplicación de biocarbón.

Comunidades bacterianas beneficiadas	Tipo de biomasa	Autor
<i>Gemmatimonas</i> , <i>Ramlibacter</i> y <i>Haliangium</i>	Estiércol de vaca y paja de caña	(Yin et al., 2022)
<i>Gemmtimonadetes</i> y <i>Proteobacteria</i>	Bambú	(Huang et al., 2018)
<i>Actinobacterias</i> , <i>Acidobacteria</i> y <i>Deltaproteobacteria</i>	Paja de maíz	(Zhao et al., 2020)
<i>Micrococcaceae</i> , <i>Oxalobacteraceae</i> , <i>Nocardiodaceae</i> y <i>Xanthomonadaceae</i>	Madera de manzano ( <i>Malus pumila</i> Mill.)	(Luo et al., 2020)
<i>Pseudarthrobacter</i> , <i>Azospirillum</i> y <i>Rhizobiales</i>	Residuos maderables	(Yin et al., 2022)
<i>Methanocella</i> , <i>Methanosarcina</i> y <i>Methanobacterium</i>	Paja de maíz	(Ni et al., 2018)
<i>Sphingomonas</i> , <i>Lysobacter</i> , y <i>Flavisolibacte</i>		

Respecto a hongos, hay reportes que interviene en índices de diversidad de familias *Cystofilobasidiaceae* y *Guehomyces* que aumentaron significativamente conforme el suelo es enmendado con biocarbón. Además, Bello et al.(2021) aseveran que suprime hongos fitopatógenos como *Edenia* y *Waitea*.

Respecto al biocarbón con otras enmiendas orgánicas en especial en suelos kársticos, salinizados, acidificados, endurecidos y contaminados, algunos reportes de la adición de biocarbón y otros materiales, sostienen que fomenta grupos de bacterias y hongos como *Actinomicetos* en paja de maíz (Li et al., 2020).*Gemmatimonadetes*, *Actinobacteria*, *Bacteroidetes* y *Planctomycetes* con madera (Wei et al., 2020), *Actinobacteria* y *Proteobacteria*, *Ascomycota*, *Basidiomycota* y *Mortierellomycota* en residuos de paja por (Yan et al., 2021), *Bacteroidetes*, *Firmicutes* y *Gemmatimonadetes* con cascarilla de arroz (Zhaoxiang et al., 2020), *Bacillus* y *Clostridium* en residuos vegetales, (Ji et al., 2022) entre otros, organismos que hacen parte de la red microbiana de agregación de biocarbono, claves en los ciclos biogeoquímicos del N, P y C, e importantes en la recuperación de suelos salinos, donde el carbono disuelto del suelo, inciden en el desempeño de bacterias que inhiben la degradación del C lábil, mientras que la disponibilidad de nitrógeno alcalino, fosforo y el contenido de agua potencializan el efecto degradador de las comunidades fúngicas lo que trae consigo la fijación de N y disponibilidad de P (Zhao et al., 2017). No obstante, se reporta (Tabla 4) otro tipo de enmiendas ricas en carbono que han sido comparadas y combinadas con el biocarbón para la recuperar suelos contaminados por metales pesados.

**Tabla 4. Diferentes enmiendas orgánicas e inorgánicas y su aplicación sinérgica y comparativa con biocarbón.**

Tipo de biomasa	Enmienda	Tipo de relación	Resultados	Autor
Madera de pino	Sustancias húmicas y yeso	Sinérgica	Reduce la sodicidad y salinidad, estimula la biomasa microbiana.	(Alcívar et al., 2018)
Cáscara de cacahuete	Estiércol con harina de colza.	Símil	Aumenta actividad enzimática del suelo, promueve crecimiento y tasas fotosintéticas, regula la conductancia estomática. (Yousaf et al., 2021)	(Yang et al., 2018)
Estiércol de granja	Estiércol y purines			
Residuos agrícolas	Biosólidos y cal	Sinergia	Estabiliza pH, reduce metales, aumento del edafón e incremento de los nutrientes disponibles para las plantas.	(Trippe et al., 2021)
Madera	Vinagre de madera	Sinergia y comparación	Promueve crecimiento de plántulas	(Luo et al., 2019)
Paja	Compostaje de paja	Comparación	incidencia en el rendimiento de fruta y el biocarbón mejoró la calidad de la fruta.	(Yan et al., 2021)
		Sinergia	Promoción de la exclusión de Na <sup>+</sup> y la acumulación de K <sup>+</sup> , minimiza daño oxidativo por el estrés de salinidad.	(Song et al., 2022)
Cama de aves	Estiércol de aves, compostaje, cal, dolomita y yeso	Comparación	Suministra nutrientes, principalmente fósforo, y para superar las toxicidades de Al <sup>3+</sup> y Mn <sup>2+</sup> .	(Lauricella et al., 2020)
Paja de cultivo	melaza y estiércol	Sinergia	Elimina el nitrato acumulado en suelo, a través de la alteración de genes funcionales críticos des nitrificantes.	(Jun et al., 2016)
Cáscara de maní	Fertilizantes nitrogenados -urea	Sinergia	Reduce la mineralización neta de N, proceso atribuido al aumento de la relación C:N y a la disminución de la actividad de la ureasa en el suelo	(Luo et al., 2016)
Residuos de maíz	Fertilizante NPK	Sinergia	Disminuye erosión, evitando la pérdida del suelo, mitigando el coeficiente de escorrentía.	(Bashagaluke et al., 2019)

Por otro lado, como el biocarbón presenta bajo contenido de N disponible y a través de la sorción de amonio, puede incorporar más N siendo menos susceptible a pérdidas este efecto puede restringir la absorción de N por la planta, para compensar lo anterior se recomienda adición de compost (Román-Dañobeytia et al., 2021). Liu et al. (2019) demostraron que compostar y adicionar biocarbón de cáscara de maní se aumentó el rendimiento de cultivos. En suelos contaminados con Cd, la fitorremediación en combinación con biocarbón aumento el potencial de crecimiento de las plantas utilizadas. Yousaf et al. (2021) identificaron que *Albizia lebbek* en suelos con Cd y modificados con biocarbón, las plantas presentaron aumento en la longitud máxima de raíces y longitud de brotes a medida que se redujo considerablemente la toxicidad de Cd.

A la par, Dong et al. (2022) argumentaron cómo la adición de biocarbón cambia la morfología de las raíces de las plantas de gruesas y cortas a finas y largas, lo que facilita la absorción de nutrientes. Yousaf et al. (2021) confrontaron el efecto de biochar de estiércol de granja, bagazo de caña de azúcar y astillas de madera en plantas en condiciones salinas, encontrando que el biocarbón con estiércol de granja promueve todos los parámetros fisiológicos y de crecimiento de tres especies de árboles, al contribuir con fósforo en comparación con las demás enmiendas y todos los tipos de biocarbón mostraron reducción de la conductividad eléctrica.

Lee et al. (2022) por su parte, investigaron los efectos de la aplicación de biocarbón de madera y cáscara de arroz sobre suelos erosionados, hallando que ambos son capaces de aumentar entre 2 y 2,6 la tasa de crecimiento de pastos y la cobertura vegetal por el aporte de carbono orgánico y la mejora de propiedades físicas como la estructura del suelo.

**Biocarbón en la calidad y la salud del suelo:** Incorporar biocarbón al suelo promueve la calidad y salud, favorece propiedades edáficas, regula el pH (Bednik et al., 2020), fomenta actividad enzimática (sacarasa, ureasa y fosfatasas alcalinas) y microbiana (bacterias, hongos, protozoos, nematodos y artrópodos) que facilitan la absorción, degradación, aporte y retención de ciertos nutrientes como N, P, K y carbono orgánico en el suelo COS (Cui et al., 2022; Jien et al., 2021; Li e You, 2022); además estabiliza agregados crucial para ampliar la conductividad hidráulica (Laird et al., 2017), y mejora la fertilidad. Entre los resultados, se describen los estudios realizados

por Agbede y Adekiya (2020) y Ali et al. (2015) en residuos de madera Situmeang et al. (2018) en Bambú y Are et al. (2017), en estiércol de bovino entre otros.

**Biocarbón y compostaje como enmiendas para la restauración de suelos:** Usar biocarbón y compostaje de manera individual como combinada, es una alternativa para recuperar suelos degradados como se exhibe en la tabla 5. No obstante, Somerville et al. (2019) y Chávez-García y Siebe (2019) argumentaron que no existió un efecto sinérgico entre el biocarbón y el compostaje, sobre las propiedades edáficas y el crecimiento de las plantas; argumentando que la mezcla debió ser previamente co-compostada y no simplemente mezclada y aplicada al suelo, además de la corta duración del estudio y rápida descomposición del compost. Otros Autores como Schillem et al. (2019) evidencian que biocarbón compostado aplicado a suelo arenoso y libre de carbono, mejoró rendimientos de trigo al crear un medio poroso capaz de fijar nutrientes y reducir efectos de lixiviación, ayudó a aumentar la reserva de materia orgánica y humedad del suelo. Por su parte Aziz et al. (2021), probaron por separado la eficiencia del biocarbón de paja de trigo y compost de residuos agrícolas sobre la degradación de clorpirifos en el suelo, reportando que ambas enmiendas degradan este contaminante, pero que el compostaje presentó mayor tasa de degradación, con la mayor actividad microbiana.

Tabla 5. Investigaciones sobre los efectos sinérgicos de biocarbón y compostaje.

Tipo de biomasa	Compostaje	Resultados	Autor
Madera	Hongos	Mejora la eficiencia del uso del agua de la planta, promueve actividad enzimática (superóxido dismutasa, catalasa, peroxidasa y ascorbato peroxidasa) en los tejidos, aumenta el índice de estabilidad de la membrana, la tasa neta de fotosíntesis en plantas de <i>Althaea rosea</i> cultivadas en zonas áridas y semiáridas degradadas por la minería.	(Roy et al., 2021)
Madera de <i>Quercus ilex</i>	Estiércol de caballo, conejo mezclado con residuos vegetales	Aumenta pH, la concentración fitodisponible de Ca, K, Na y Mg en forma intercambiable en el suelo, el carbono total y previene la lixiviación de N más allá de 15 cm de profundidad.	(Forján et al., 2018; Rodríguez-Vila et al., 2016)

Tipo de biomasa	Compostaje	Resultados	Autor
Residuos de poda del árbol <i>Elaeagnus</i>		Reduce la resistencia a la penetración del suelo, aumenta la actividad microbiana, y nutrientes.	Negiş et al. (2020)
Paja de arroz	Estiércol de ganado y paja de maíz	Estimula índices de diversidad de hongos biomarcadores como el <i>Cystofilobasidiaceae</i> y <i>Guehomyces</i> , y reduce fitopatógenos ( <i>Edenia</i> y <i>Waitea</i> ), alivia acidificación del suelo, aumenta carbono orgánico	(Bello et al., 2021)
Paja de arroz	Estiércol compostado en arrozales	Aumento moderado de C total, aumento de potasio.	(Vu et al., 2015)
Madera Dura	Desechos de jardín	Reduce la movilidad de fenantreno en el suelo, estimula el crecimiento de las comunidades microbianas y su actividad enzimática.	(Marchal et al., 2013)

**Biocarbón - mejora suelos degradados con alto potencial erosivo:** Es una enmienda con buena capacidad de recuperar suelos degradados al promover estructura porosa (Cruz-Méndez et al., 2021; Raúl et al., 2021; Agbede y Oyewumi, 2022; Seitz et al., 2020; Adusu, Abugre y Dei-Kusi, 2021; Kebede et al., 2022). Investigaciones evidencian que su efecto de mezcla o dilución, disminuye la densidad aparente de suelos salinos, alcalinos y con alto potencial de erosión, y mejora su capacidad de retención de agua, cohesión y por su aporte a la CIC y grupos funcionales del biocarbón proporciona C, N, P, K, Fe y cantidades modestas de Ca, Cu y Zn, estabilizan pH por la oxidación de la superficie del biocarbón, proceso responsable de la formación de grupos funcionales orgánicos ácidos, como los grupos carboxílicos y fenólicos.

Finalmente, al comparar biocarbón obtenido de diferentes biomásas (tanto vegetal como animal), objeto de estudio de Jyoti Bora et al. (2021) reportaron aumento de la capacidad de retención de agua del suelo por la microporosidad y la presencia de diferentes grupos funcionales hidrofílicos e hidrofóbicos de las enmiendas, mostraron que forman una red compleja entre la partícula del biocarbón y el agua, agregando que el biocarbón de origen vegetal tiene mayor potencia para aumentar la ductilidad del suelo en comparación con los de origen animal. Así mismo, Abideen et al. (2020) mencionan que el biocarbón aumento la capacidad de retención de agua y la eficiencia del sistema fotosintético reportado en el crecimiento de las plantas. Conjuntamente, la adición de biocarbón asegura materia orgánica

relativamente estable en el suelo lo que mejora el estado del N total y reduce la disponibilidad de nitrato y amonio (Horák et al., 2021; Karim et al., 2020; Yan et al., 2022).

**Biocarbón en la emisión de GEI:** Las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) del suelo contribuye al total de GEI en la atmósfera, el biocarbón logra mitigar emisión de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  y  $\text{N}_2\text{O}$  en las tierras agrícolas (Li e You, 2022), por su gran superficie, alta porosidad, estabilidad y la capacidad para retener cationes metálicos y minerales, por su intercambio catiónico, el biocarbón es adecuado para diversas aplicaciones en la agricultura y en gestión ambiental. Wang et al. (2019), reportaron el efecto de la adición de biocarbón sobre emisiones de  $\text{NO}_x$  en un suelo calcáreo, en cámara de flujo dinámico, en condiciones controladas agregó diferente concentración de biocarbón para medir el flujo de emisión. Los resultados indicaron que el biocarbón puede reducir las emisiones de  $\text{NO}_2$ , adicionalmente aumenta pH, capacidad de retención de agua y reduce la densidad aparente del suelo, aspectos que reducen la lixiviación de nitratos en las aguas subterráneas y de óxido nitroso.

Por otro lado, Winders et al. (2019) sustentaron efectos del biocarbón en concentración de 0 %, 0,8 % o 3 % de la materia seca de la dieta bovinos sobre la digestibilidad de la dieta y la producción de  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$  del ganado en crecimiento y finalización, donde la producción de metano del tratamiento con biocarbón al 0,8 % en relación con el control se redujo 9,5 % y 18,4 % resultados que concuerdan con Saleem et al. (2018) quienes lograron aumento lineal en la digestibilidad de MS (materia seca), OM, ADF (fibra digerible) y NDF (fibra no digerible) y reducción del 25 % en la producción de  $\text{CH}_4$  al agregar 0,5 % de biocarbón en un sistema de rumen artificial. Los resultados anteriores muestran que es una alternativa viable para mitigar el impacto de la ganadería en el ambiente.

Finalmente, a pesar de los resultados anteriores y múltiples evidencias de las bondades de este material, muchas organizaciones llaman la atención para que no sea incluido (el biocarbón) como negocio de comercio de carbono. No obstante, teniendo en cuenta la sucesión de desastres provocados por los agro-combustibles, donde la conversión de usos de la tierra supone gran amenaza para la biodiversidad y para los ecosistemas naturales y de los suelos necesarios para la agricultura, algunas de las compañías comerciales de biocarbón ya están utilizando una amplia variedad de “desechos”

sin restricción que pueden causar efectos aún desconocidos cuando no se cumplen los estándares de calidad requeridos. Así lo comunica [www.biofuelwatch.org.uk/docs/biocharbriefing.pdf](http://www.biofuelwatch.org.uk/docs/biocharbriefing.pdf) citando que “*La propuesta de ‘mitigar el cambio climático’ a través de la utilización de biochar a gran escala es una forma peligrosa*”

Se evidenció incremento del conocimiento en biocarbón en el tiempo, logrando profundizar diferentes aspectos, características, usos (acondicionador, remediador de suelos, mitigación del GEI) y su interés sigue tendencia positiva a medida del avance de nuevas investigaciones. La síntesis de la revisión, señala su uso como estrategia sostenible en el manejo y gestión de residuos agrícolas, al mismo tiempo, es apropiado como enmienda del suelo que mejora las propiedades químicas en suelos salinos y sódicos, secuestro de carbono, mitiga la contaminación, purifica el agua y genera energía entre otros. Numerosas investigaciones concluyen que es beneficioso para los agro ecosistemas desde el punto de vista ambiental y agronómico. Sin embargo, es necesario supervisar la calidad de los materiales y los efectos de la aplicación de biocarbón a mediano y largo plazo para promover un proceso de producción más limpia en el sector agrícola afín de alcanzar los objetivos del desarrollo sostenible.

**Conflicto de intereses:** El manuscrito fue elaborado y revisado por todos los autores, que declaran la ausencia de cualquier conflicto que puede poner la validez de los resultados en riesgo.

#### 4. Referencias

- Abbas, T.; Rizwan, M.; Ali, S.; Adrees, M.; Zia-Ur-Rehman, M.; Qayyum M. F.; Ok, Y. S.; Murtaza, G. (2018). Effect of biochar on alleviation of cadmium toxicity in wheat (*Triticum aestivum* L.) grown on Cd-contaminated saline soil. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(26), 25668–25680. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8987-4>
- Abideen, Z.; Koyro, H. W.; Huchzermeyer, B.; Gul, B.; Khan, M. A. (2020). Impact of a biochar or a biochar-compost mixture on water relation, nutrient uptake and photosynthesis of *Phragmites karka*. *Pedosphere*, 30(4), 466–477. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60362-X](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60362-X)
- Adejumo, S. A.; Owoseni, O.; Mur, L. A. J. (2021). Low light intensity and compost modified biochar enhanced maize growth on contaminated soil and minimized Pb induced oxidative stress. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(2), 104764. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104764>
- Aduku, D.; Abugre, S.; Dei-Kusi, D. (2021). Potential of biochar for minesoil amendment and floristic diversity enhancement at the yongwa quarry site in the eastern region of Ghana. *Agricultural Science Digest*, 41(1), 61–65. <https://doi.org/10.18805/ag.D-254>



- Agbede, T. M.; Adekiya, A. O. (2020). Influence of biochar on soil physicochemical properties, erosion potential, and maize (*Zea mays* L.) grain yield under sandy soil condition. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 51(20), 2559-2568. <https://doi.org/10.1080/00103624.2020.1845348>
- Agbede, T. M.; Oyewumi, A. (2022). Benefits of biochar, poultry manure and biochar-poultry manure for improvement of soil properties and sweet potato productivity in degraded tropical agricultural soils. *Resources, Environment and Sustainability*, 7, 100051. <https://doi.org/10.1016/j.resenv.2022.100051>
- Alcívar, M.; Zurita-Silva, A.; Sandoval, M.; Muñoz, C.; Schoebitz, M. (2018). Reclamation of saline-sodic soils with combined amendments: Impact on quinoa performance and biological soil quality. *Sustainability*, 10(9), 3083. <https://doi.org/10.3390/su10093083>
- Ali, I.; Ullah, S.; He, L.; Zhao, Q.; Iqbal, A.; Wei, S.; Shah, T.; Ali, N.; Bo, Y.; Adnan, M.; Amanullah; Jiang, L. (2020). Combined application of biochar and nitrogen fertilizer improves rice yield, microbial activity and N-metabolism in a pot experiment. *PeerJ*, 8, e10311. <https://doi.org/10.7717/peerj.10311>
- Ali, K.; Arif, M.; Jan, M. T.; Khan, M. J.; Jones, D. L. (2015). Integrated use of biochar: A tool for improving soil and wheat quality of degraded soil under wheat-maize cropping pattern. *Pakistan Journal of Botany*, 47(1), 233-240.
- Andrés, P.; Rosell-Melé, A.; Colomer-Ventura, F.; Deneff, K.; Cotrufo, M. F.; Riba, M.; Alcañiz, J. M. (2019). Belowground biota responses to maize biochar addition to the soil of a Mediterranean vineyard. *Science of the total environment*, 660, 1522-1532. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.101>
- Are, K. S.; Adelana, A. O.; Fademi, I. O.; Aina, O. A. (2017). Improving physical properties of degraded soil: Potential of poultry manure and biochar. *Agriculture and Natural Resources*, 51(6), 454-462. <https://doi.org/10.1016/j.anres.2018.03.009>
- Aziz, H.; Wang, X.; Murtaza, G.; Ashar, A.; Hussain, S.; Abid, M.; Murtaza, B.; Saleem, M. H.; Fiaz, S.; Ali, S. (2021). Evaluation of compost and biochar to mitigate chlorpyrifos pollution in soil and their effect on soil enzyme dynamics. *Sustainability*, 13(17), 9695. <https://doi.org/10.3390/su13179695>
- Bai, X.; Fernandez, I. J.; Spencer, C. J. (2022). Chemical Response of Soils to Traditional and Industrial Byproduct Wood Biochars. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 53(6), 737-751. <https://doi.org/10.1080/00103624.2022.2028812>
- Bashagaluke, J. B.; Logah, V.; Opoku, A.; Tuffour, H. O.; Sarkodie-Addo, J.; Quansah, C. (2019). Soil loss and run-off characteristics under different soil amendments and cropping systems in the semi-deciduous forest zone of Ghana. *Soil Use and Management*, 35(4), 617-629. <https://doi.org/10.1111/sum.12531>
- Bednik, M.; Medyńska-Juraszek, A.; Dudek, M.; Kloc, S.; Kręć, A.; Labaz, B.; Waroszewski, J. (2020). Wheat straw biochar and NPK fertilization efficiency in sandy soil reclamation. *Agronomy*, 10(4), 496. <https://doi.org/10.3390/agronomy10040496>
- Bello, A.; Wang, B.; Zhao, Y.; Yang, W.; Ogundeji, A.; Deng, L.; Egbeagu, U. U.; Yu, S.; Zhao, L.; Li, D.; Li, D.; Xu, X. (2021). Composted biochar affects structural dynamics, function and co-occurrence network patterns of fungi community. *Science of the Total Environment*, 775:145672. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145672>
- Bu, X.; Xue, J.; Zhao, C.; Wu, Y.; Han, F. (2017). Nutrient leaching and retention in riparian soils as influenced by rice husk biochar addition. *Soil Science*, 182(7), 241-247. <https://doi.org/10.1097/SS.0000000000000217>
- Chávez-García, E.; Siebe, C. (2019). Rehabilitation of a highly saline-sodic soil using a rubble barrier and organic amendments. *Soil and Tillage Research*, 189, 176-188. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.01.003>
- Chen, D.; Liu, W.; Wang, Y.; Lu, P. (2022). Effect of biochar aging on the adsorption and stabilization of Pb in soil. *Journal of Soils and Sediments*, 22(1), 56-66. <https://doi.org/10.1007/s11368-021-03059-x>

- Cruz-Méndez, A. S.; Ortega-Ramírez, E.; Lucho-Constantino, C. A.; Arce-Cervantes, O.; Vázquez-Rodríguez, G. A.; Coronel-Olivares, C.; Beltrán-Hernández, I. (2021). Bamboo biochar and a nopal-based biofertilizer as improvers of alkaline soils with low buffer capacity. *Applied Sciences*, 11(14), 6502. <https://doi.org/10.3390/app11146502>
- Cruz-O'byrne, R.; Casallas-Useche, C.; Piraneque-Gambasica, N.; Aguirre-Forero, S. (2021). Knowledge Landscape of Starter Cultures: A Bibliometric and Patentometric Study. *Recent Patents on Biotechnology*, 15(3), 232–246. <https://doi.org/10.2174/1872208315666210928115503>
- Cui, Q.; Xia, J.; Peng, L.; Zhao, X.; Qu, F. (2022). Positive Effects on Alfalfa Productivity and Soil Nutrient Status in Coastal Wetlands Driven by Biochar and Microorganisms Mixtures. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 9, 798520. <https://doi.org/10.3389/fevo.2021.798520>
- De la Rosa, J. M.; Santa-Olalla, A.; Campos, P.; López-Núñez, R.; González-Pérez, J. A.; Almendros, G.; Knicker, H. E.; Sánchez-Martín, Á.; Fernández-Boy, E. (2022). Impact of Biochar Amendment on Soil Properties and Organic Matter Composition in Trace Element-Contaminated Soil. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(4), 2140. <https://doi.org/10.3390/ijerph19042140>
- Delays, L. A. M.; Ullé, J. Á.; Andriulo, A. E. (2020). Biochar application in a degraded soil under sweet-potato production. Effect on edaphic properties. *Ciencia del Suelo*, 38(1), 162–173.
- Dong, X.; Zhang, Z.; Wang, S.; Shen, Z.; Cheng, X.; Lv, X.; Pu, X. (2022). Soil properties, root morphology and physiological responses to cotton stalk biochar addition in two continuous cropping cotton field soils from Xinjiang, China. *PeerJ*, 10, e12928. <https://doi.org/10.7717/peerj.12928>
- Espinosa, N. J.; Moore, D. J. P.; Rasmussen, C.; Fehmi, J. S.; Gallery, R. E. (2020). Woodchip and biochar amendments differentially influence microbial responses, but do not enhance plant recovery in disturbed semiarid soils. *Restoration Ecology*, 28, S381–S392. <https://doi.org/10.1111/rec.13165>
- Fang, B.; Lee, X.; Zhang, J.; Li, Y.; Zhang, L.; Cheng, J.; Wang, B.; Cheng, H. (2016). Impacts of straw biochar additions on agricultural soil quality and greenhouse gas fluxes in karst area, Southwest China. *Soil Science and Plant Nutrition*, 62(5–6), 526–533. <https://doi.org/10.1080/00380768.2016.1202734>
- Fang, W.; Wang, Q.; Han, D.; Liu, P.; Huang, B.; Yan, D.; Ouyang, C.; Li, Y.; Cao, A. (2016). The effects and mode of action of biochar on the degradation of methyl isothiocyanate in soil. *Science of the Total Environment*, 565, 339–345. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.166>
- Fonseca, A. A. D.; Santos, D. A.; Moura-Junior, C. D.; Passos, R. R.; Rangel, O. J. P. (2021). Phosphorus and Potassium in Aggregates of Degraded Soils: Changes Caused by Biochar Application. *Clean - Soil, Air, Water*, 49(12), 2000366. <https://doi.org/10.1002/clen.202000366>
- Forján, R.; Rodríguez-Vila, A.; Cerqueira, B.; Covelo, E. F.; Marcet, P.; Asensio, V. (2018). Comparative effect of compost and technosol enhanced with biochar on the fertility of a degraded soil. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(10), 1–12. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6997-4>
- 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>
- Han, Z.; Xu, P.; Li, Z.; Lin, H.; Zhu, C.; Wang, J.; Zou, J. (2022). Microbial diversity and the abundance of keystone species drive the response of soil multifunctionality to organic substitution and biochar amendment in a tea plantation. *GCB Bioenergy*, 14(4), 481–495. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12926>
- Hansen, V.; Müller-Stöver, D.; Munkholm, L. J.; Peltre, C.; Hauggaard-Nielsen, H.; Jensen, L. S. (2016). The effect of straw and wood gasification biochar on carbon sequestration, selected soil fertility indicators and functional groups in soil: An incubation study. *Geoderma*, 269, 99–107. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.01.033>

- Horák, J.; Kotuš, T.; Toková, L.; Aydin, E.; Igaz, D.; Šimanský, V. (2021). A sustainable approach for improving soil properties and reducing N<sub>2</sub>O emissions is possible through initial and repeated biochar application. *Agronomy*, 11(3), 582. <https://doi.org/10.3390/agronomy11030582>
- Huang, S.; Bao, J.; Shan, M.; Qin, H.; Wang, H.; Yu, X.; Chen, J.; Xu, Q. (2018). Dynamic changes of polychlorinated biphenyls (PCBs) degradation and adsorption to biochar as affected by soil organic carbon content. *Chemosphere*, 211, 120–127. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.07.133>
- Jegajeevagan, K.; Mabilde, L.; Gebremikael, M. T.; Ameloot, N.; De Neve, S.; Leinweber, P.; Sleutel, S. (2016). Artisanal and controlled pyrolysis-based biochars differ in biochemical composition, thermal recalcitrance, and biodegradability in soil. *Biomass and Bioenergy*, 84, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.10.025>
- Ji, X.; Wan, J.; Wang, X.; Peng, C.; Wang, G.; Liang, W.; Zhang, W. (2022). Mixed bacteria-loaded biochar for the immobilization of arsenic, lead, and cadmium in a polluted soil system: effects and mechanisms. *Science of The Total Environment*, 811, 152112. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152112>
- Jiang, Y.; Kang, Y.; Han, C.; Zhu, D.; Deng, H.; Xie, Z.; Zhong, W. (2020). Biochar amendment in reductive soil disinfestation process improved remediation effect and reduced N<sub>2</sub>O emission in a nitrate-rich degraded soil. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 66(7), 983–991. <https://doi.org/10.1080/03650340.2019.1650171>
- Jien, S. H.; Chiang, J. L.; Wang, C. S.; Chang, H. J. (2012). Effects of application of biochar on soil fertility of acid red soils. *Journal of Taiwan Agricultural Engineering*, 58(4), 15–22.
- Jien, S. H.; Kuo, Y. L.; Liao, C. S.; Wu, Y. T.; Igalavithana, A. D.; Tsang, D. C. W.; Ok, Y. S. (2021). Effects of field scale in situ biochar incorporation on soil environment in a tropical highly weathered soil. *Environmental Pollution*, 272, 116009. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116009>
- Jun, W.; Yu, S.; Ziyuan, L.; Cheng, H.; Zubin, X.; Wenhui, Z. (2016). Effects of biochar application on N<sub>2</sub>O emission in degraded vegetable soil and in remediation process of the soil. *Acta Pedologica Sinica*, 53(3), 713–723. <https://doi.org/10.11766/trxb201509170443>
- Jyoti, B. M.; Bordoloi, S.; Kumar, H.; Gogoi, N.; Zhu, H. H.; Sarmah, A. K.; Sreeja, P.; Sreedeeep, S.; Mei, G. (2021). Influence of biochar from animal and plant origin on the compressive strength characteristics of degraded landfill surface soils. *International Journal of Damage Mechanics*, 30(4), 484–501. <https://doi.org/10.1177/1056789520925524>
- Karim, A. A.; Kumar, M.; Mohapatra, S.; Singh, S.; K. (2019). Nutrient rich biomass and effluent sludge wastes co-utilization for production of biochar fertilizer through different thermal treatments. *Journal of Cleaner Production*, 228, 570–579. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.330>
- Karim, M. R.; Halim, M. A.; Gale, N. V.; Thomas, S. C. (2020). Biochar effects on soil physiochemical properties in degraded managed ecosystems in northeastern Bangladesh. *Soil Systems*, 4(4), 1–17. <https://doi.org/10.3390/soilsystems4040069>
- Kebede, B.; Tsunekawa, A.; Haregeweyn, N.; Tsubo, M.; Muluaem, T.; Mamedov, A. I.; Meshesha, D. T.; Adgo, E.; Fenta, A. A.; Ebabu, K.; Masunaga, T. (2022). Effect of Polyacrylamide integrated with other soil amendments on runoff and soil loss: Case study from northwest Ethiopia. *International Soil and Water Conservation Research*, 10(3), 487–496. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2021.12.001>
- Khan, A. Z.; Ding, X.; Khan, S.; Ayaz, T.; Fidel, R.; Khan, M. A. (2020). Biochar efficacy for reducing heavy metals uptake by Cilantro (*Coriandrum sativum*) and spinach (*Spinacia oleracea*) to minimize human health risk. *Chemosphere*, 244, 125543. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125543>
- Khan, A. Z.; Khan, S.; Khan, M. A.; Alam, M.; Ayaz, T. (2020). Biochar reduced the uptake of toxic heavy metals and their associated health risk via rice (*Oryza sativa* L.) grown in Cr-Mn mine contaminated soils. *Environmental Technology and Innovation*, 17, 100590. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100590>

- Khan, M. A.; Ding, X.; Khan, S.; Brusseau, M. L.; Khan, A.; Nawab, J. (2018). The influence of various organic amendments on the bioavailability and plant uptake of cadmium present in mine-degraded soil. *Science of the Total Environment*, 636, 810–817. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.299>
- Lahori, A. H.; Mierzwa-Hersztek, M.; Demiraj, E.; Idir, R.; Bui, T. T. X.; Vu, D. D.; Channa, A.; Samoon, N. A.; Zhang, Z. (2020). Clays, limestone and biochar affect the bioavailability and geochemical fractions of cadmium and zinc from zn-smelter polluted soils. *Sustainability*, 12(20), 1–16. <https://doi.org/10.3390/su12208606>
- Laird, D. A.; Novak, J. M.; Collins, H. P.; Ippolito, J. A.; Karlen, D. L.; Lentz, R. D.; Sistani, K. R.; Spokas, K.; Van Pelt, R. S. (2017). Multi-year and multi-location soil quality and crop biomass yield responses to hardwood fast pyrolysis biochar. *Geoderma*, 289, 46–53. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.11.025>
- Lauricella, D.; Butterly, C. R.; Clark, G. J.; Sale, P. G.; Li, G.; Tang, C. (2020). Effectiveness of innovative organic amendments in acid soils depends on their ability to supply P and alleviate Al and Mn toxicity in plants. *Journal of Soils and Sediments*. 20(11), 3951–3962. <https://doi.org/10.1007/s11368-020-02721-0>
- Lee, H. S.; Kim, Y.; Kim, J.; Shin, H. S. (2022). Quantitative and qualitative characteristics of dissolved organic matter derived from biochar depending on the modification method and biochar type. *Journal of Water Process Engineering*, 46, 102569. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102569>
- Li, J.; Shao, X.; Huang, D.; Shang, J.; Liu, K.; Zhang, Q.; Yang, X.; Li, H.; He, Y. (2020). The addition of organic carbon and nitrogen accelerates the restoration of soil system of degraded alpine grassland in Qinghai-Tibet Plateau. *Ecological Engineering*. 158, 106084. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.106084>
- Li, Y.; You, S. (2022). Biochar soil application: soil improvement and pollution remediation. In: Tsang, Daniel C.W.; Ok Yong S. (eds). *Agriculture for Achieving Sustainable Development Goals*. Ed. Academic Press. p. 97-102. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85343-9.00004-5>
- Liang, X.; Chen, L.; Liu, Z.; Jin, Y.; He, M.; Zhao, Z.; Liu, C.; Niyungeko, C.; Arai, Y. (2018). Composition of microbial community in pig manure biochar-amended soils and the linkage to the heavy metals accumulation in rice at harvest. *Land Degradation and Development*, 29(7), 2189–2198. <https://doi.org/10.1002/ldr.2851>
- Lin, Z.; Liu, Q.; Liu, G.; Cowie, A. L.; Bei, Q.; Liu, B.; Wang, X.; Ma, J.; Zhu, J.; Xie, Z. (2017). Effects of Different Biochars on *Pinus elliottii* Growth, N Use Efficiency, Soil N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> Emissions and C Storage in a Subtropical Area of China. *Pedosphere*, 27(2), 248–261. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60314-X](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60314-X)
- Liu, B.; Cai, Z.; Zhang, Y.; Liu, G.; Luo, X.; Zheng, H. (2019). Comparison of efficacies of peanut shell biochar and biochar-based compost on two leafy vegetable productivity in an infertile land. *Chemosphere*, 224, 151–161. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.02.100>
- Liu, Y.; Chen, Y.; Wang, Y.; Lu, H.; He, L.; Yang, S. (2018). Negative priming effect of three kinds of biochar on the mineralization of native soil organic carbon. *Land Degradation and Development*, 29(11), 3985–3994. <https://doi.org/10.1002/ldr.3147>
- Luo, S.; He, B.; Song, D.; Li, T.; Wu, Y.; Yang, L. (2020). Response of bacterial community structure to different biochar addition dosages in karst yellow soil planted with Ryegrass and Daylily. *Sustainability*, 12(5), 2124 <https://doi.org/10.3390/su12052124>
- Luo, X.; Chen, L.; Zheng, H.; Chang, J.; Wang, H.; Wang, Z.; Xing, B. (2016). Biochar addition reduced net N mineralization of a coastal wetland soil in the Yellow River Delta, China. *Geoderma*, 282, 120–128. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.07.015>
- Luo, X.; Wang, Z.; Meki, K.; Wang, X.; Liu, B.; Zheng, H.; You, X.; Li, F. (2019). Effect of co-application of wood vinegar and biochar on seed germination and seedling growth. *Journal of Soils and Sediments*, 19(12), 3934–3944. <https://doi.org/10.1007/s11368-019-02365-9>
- Madrid, D. E. M.; Marrugo-Negrete, J. L. (2021). Effects of adding amendments on the immobilization of heavy metals in mining soils of southern Bolívar. *Ciencia Tecnológica Agropecuaria*, 22(2), e2272. [https://doi.org/10.21930/RCTA.VOL22\\_NUM2\\_ART:2272](https://doi.org/10.21930/RCTA.VOL22_NUM2_ART:2272)

- Manna, S.; Singh, N. (2019). Biochars mediated degradation, leaching and bioavailability of pyrazosulfuron-ethyl in a sandy loam soil. *Geoderma*, 334, 63–71. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.032>
- Marchal, G.; Smith, K. E. C.; Rein, A.; Winding, A.; Trapp, S.; Karlson, U. G. (2013). Comparing the desorption and biodegradation of low concentrations of phenanthrene sorbed to activated carbon, biochar and compost. *Chemosphere*, 90(6), 1767–1778. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.07.048>
- Mohawesh, O.; Coolong, T.; Aliedeh, M.; Qaraleh, S. (2018). Greenhouse evaluation of biochar to enhance soil properties and plant growth performance under arid environment. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 24(6), 1012–1019.
- Nanda, S.; Mohanty, P.; Pant, K. K.; Naik, S.; Kozinski, J. A.; Dalai, A. K. (2013). Characterization of North American Lignocellulosic Biomass and Biochars in Terms of their Candidacy for Alternate Renewable Fuels. *Bioenergy Research*, 6(2), 663–677. <https://doi.org/10.1007/s12155-012-9281-4>
- Nawab, J.; Khan, N.; Ahmed, R.; Khan, S.; Ghani, J.; Rahman, Z.; Khan, F.; Wang, X.; Muhammad, J.; Sher, H. (2019). Influence of different organic geo-sorbents on *Spinacia oleracea* grown in chromite mine-degraded soil: a greenhouse study. *Journal of Soils and Sediments*, 19(5), 2417–2432. <https://doi.org/10.1007/s11368-019-02260-3>
- Negiş, H.; Şeker, C.; Gümüş, I.; Manirakiza, N.; Mücevher, O. (2020). Effects of Biochar and Compost Applications on Penetration Resistance and Physical Quality of a Sandy Clay Loam Soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 51(1), 38–44. <https://doi.org/10.1080/00103624.2019.1695819>
- Nguyen, B. T.; Le, L. B.; Pham, L. P.; Nguyen, H. T.; Tran, T. D.; Van Thai, N. (2021). The effects of biochar on the biomass yield of elephant grass (*Pennisetum Purpureum* Schumach) and properties of acidic soils. *Industrial Crops and Products*, 161, 113224. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.113224>
- Ni, N.; Wang, F.; Song, Y.; Bian, Y.; Shi, R.; Yang, X.; Gu, C.; Jiang, X. (2018). Mechanisms of biochar reducing the bioaccumulation of PAHs in rice from soil: Degradation stimulation vs immobilization. *Chemosphere*, 196, 288–296. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.12.192>
- Palakit, K.; Duangsathaporn, K.; Lumyai, P.; Sangram, N.; Sikareepaisarn, P.; Khantawan, C. (2018). Efficiency of biochar and bio-fertilizers derived from maize debris as soil amendments. *Environment and Natural Resources Journal*, 16(2), 79–90. <https://doi.org/10.14456/enrj.2018.17>
- Qiang, M.; Gao, J.; Han, J.; Zhang, H.; Lin, T.; Long, S. (2020). How adding biochar improves loessal soil fertility and sunflower yield on consolidation project land on the chinese loess plateau. *Polish Journal of Environmental Studies*, 29(5), 3759–3769. <https://doi.org/10.15244/pjoes/118204>
- Raul, C.; Bharti, V. S.; Dar Jaffer, Y.; Lenka, S.; Krishna, G. (2021). Sugarcane bagasse biochar: Suitable amendment for inland aquaculture soils. *Aquaculture Research*, 52(2), 643–654. <https://doi.org/10.1111/are.14922>
- Rodríguez-Vila, A.; Forján, R.; Guedes, R. S.; Covelo, E. F. (2016). Changes on the Phytoavailability of Nutrients in a Mine Soil Reclaimed with Compost and Biochar. *Water, Air, and Soil Pollution*, 227(12), 1–12. <https://doi.org/10.1007/s11270-016-3155-x>
- Román-Dañobeytia, F.; Cabanillas, F.; Lefebvre, D.; Farfan, J.; Alferez, J.; Polo-Villanueva, F.; Llacsahuanga, J.; Vega, C. M.; Velasquez, M.; Corvera, R.; Fernandez, L. E.; Silman, M. R. (2021). Survival and early growth of 51 tropical tree species in areas degraded by artisanal gold mining in the Peruvian Amazon. *Ecological Engineering*, 159, 106097. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.106097>
- Roy, R.; Núñez-Delgado, A.; Sultana, S.; Wang, J.; Munir, A.; Battaglia, M. L.; Sarker, T.; Seleiman, M. F.; Barmon, M.; Zhang, R. (2021). Additions of optimum water, spent mushroom compost and wood biochar to improve the growth performance of *Althaea rosea* in drought-prone coal-mined spoils. *Journal of Environmental Management*, 295, 113076. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113076>

- Saleem, A. M.; Ribeiro, G. O. Jr.; Yang, W. Z.; Ran, T.; Beauchemin, K. A.; McGeough, E. J.; Ominski, K. H.; Okine, E. K.; McAllister, T. A. (2018). Effect of engineered biocarbon on rumen fermentation, microbial protein synthesis, and methane production in an artificial rumen (RUSITEC) fed a high forage diet. *Journal of animal science*, 96(8), 3121–3130. <https://doi.org/10.1093/jas/sky204>
- Schillem, S.; Schneider, B. U.; Zehner, U.; Hüttl, R. F. (2019). Effect of N-modified lignite granulates and composted biochar on plant growth, nitrogen and water use efficiency of spring wheat. *Archives of Agronomy and Soil Science*. 65(13), 1913–1925. <https://doi.org/10.1080/03650340.2019.1582767>
- Seitz, S.; Teuber, S.; Geißler, C.; Goebes, P.; Scholten, T. (2020). How do newly-amended biochar particles affect erodibility and soil water movement? —a small-scale experimental approach. *Soil Systems*, 4(4), 1–14. <https://doi.org/10.3390/SOILSYSTEMS4040060>
- Singh, G.; Mavi, M. S.; Choudhary, O. P.; Gupta, N.; Singh, Y. (2021). Rice straw biochar application to soil irrigated with saline water in a cotton-wheat system improves crop performance and soil functionality in north-west India. *Journal of Environmental Management*, 295, 113277. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113277>
- Situmeang, Y. P.; Adnyana, I. M.; Subadiyasa, I. N. N.; Merit, I. N. (2018). Effectiveness of Bamboo Biochar combined with compost and NPK fertilizer to improved soil quality and corn yield. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 8(5), 2241–2248. <https://doi.org/10.18517/ijaseit.8.5.2179>
- Somerville, P. D.; Farrell, C.; May, P. B.; Livesley, S. J. (2019). Tree water use strategies and soil type determine growth responses to biochar and compost organic amendments. *Soil and Tillage Research*, 192, 12–21. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.04.023>
- Song, X.; Li, H.; Song, J.; Chen, W.; Shi, L. (2022). Biochar/vermicompost promotes Hybrid Pennisetum plant growth and soil enzyme activity in saline soils. *Plant Physiology and Biochemistry*, 183, 96–110. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2022.05.008>
- Teutscherova, N.; Lojka, B.; Houška, J.; Masaguer, A.; Benito, M.; Vazquez, E. (2018). Application of holm oak biochar alters dynamics of enzymatic and microbial activity in two contrasting Mediterranean soils. *European Journal of Soil Biology*, 88, 15–26. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2018.06.002>
- Tran, C. V.; Pham, H. Q.; Dinh, T. V.; Nguyen, K. M. (2020). Influence of biochar amendments on surface charge and bioavailability of heavy metals in degraded soils. *Suranaree Journal of Science and Technology*, 27(4), 1–10.
- Trippie, K. M.; Manning, V. A.; Reardon, C. L.; Klein, A. M.; Weidman, C.; Ducey, T. F.; Novak, J. M.; Watts, D. W.; Rushmiller, H.; Spokas, K. A.; Ippolito, J. A.; Johnson, M. G. (2021). Phytostabilization of acidic mine tailings with biochar, biosolids, lime, and locally-sourced microbial inoculum: Do amendment mixtures influence plant growth, tailing chemistry, and microbial composition? *Applied Soil Ecology*, 165, 103962. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.103962>
- Vu, Q. D.; De Neergaard, A.; Tran, T. D.; Hoang, Q. Q.; Ly, P.; Tran, T. M.; Jensen, L. S. (2015). Manure, biogas digestate and crop residue management affects methane gas emissions from rice paddy fields on Vietnamese smallholder livestock farms. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 103(3), 329–346. <https://doi.org/10.1007/s10705-015-9746-x>
- Wang, B.; Lee, X.; Theng, B. K.; Zhang, L.; Cheng, H.; Cheng, J.; Lyu, W. (2019). Biochar addition can reduce NO<sub>x</sub> gas emissions from a calcareous soil. *Environmental Pollutants and Bioavailability*, 31(1), 38–48. <https://doi.org/10.1080/09542299.2018.1544035>
- Wei, M.; Liu, X.; He, Y.; Xu, X.; Wu, Z.; Yu, K.; Zheng, X. (2020). Biochar inoculated with *Pseudomonas putida* improves grape (*Vitis vinifera* L.) fruit quality and alters bacterial diversity. *Rhizosphere*, 16, 100261 <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2020.100261>
- Wei, W.; Liu, S.; Cui, D.; Ding, X. (2021). Interaction between nitrogen fertilizer and biochar fertilization on crop yield and soil chemical quality in a temperate region. *Journal of Agricultural Science*, 159(1–2), 106–115. <https://doi.org/10.1017/S0021859621000277>
- Wu, C.; Li, Y.; Chen, M.; Luo, X.; Chen, Y.; Belzile, N.; Huang, S. (2018). Adsorption of cadmium on degraded soils amended with maize-stalk-derived biochar. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(11), 2331. <https://doi.org/10.3390/>

- Winders, T. M.; Jolly-Breithaupt, M. L.; Wilson, H. C.; Macdonald, J. C.; Erickson, G. E.; Watson, A. K. (2019). Evaluation of the effects of biochar on diet digestibility and methane production from growing and finishing steers. *Translational Animal Science*, 3(2), 775-783. <https://doi.org/10.1093/tas/txz027>
- Yan, S.; Gao, Y.; Tian, M.; Tian, Y.; Li, J. (2021). Comprehensive evaluation of effects of various carbon-rich amendments on tomato production under continuous saline water irrigation: Overall soil quality, plant nutrient uptake, crop yields and fruit quality. *Agricultural Water Management*, 255, 106995. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106995>
- Yan, T.; Xue, J.; Zhou, Z.; Wu, Y. (2021). Biochar-based fertilizer amendments improve the soil microbial community structure in a karst mountainous area. *Science of the Total Environment*, 794, 148757. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148757>
- Yan, T.; Xue, J.; Zhou, Z.; Wu, Y. (2022). Biochar and compost amendments alter the structure of the soil fungal network in a karst mountainous area. *Land Degradation and Development*, 33(5), 685-697. <https://doi.org/10.1002/ldr.4148>
- Yang, L.; Bian, X.; Yang, R.; Zhou, C.; Tang, B. (2018). Assessment of organic amendments for improving coastal saline soil. *Land Degradation and Development*, 29(9), 3204-3211. <https://doi.org/10.1002/ldr.3027>
- Yin, S.; Zhang, X.; Suo, F.; You, X.; Yuan, Y.; Cheng, Y.; Zhang, C.; Li, Y. (2022). Effect of biochar and hydrochar from cow manure and reed straw on lettuce growth in an acidified soil. *Chemosphere*, 298, 134191. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134191>
- Yousaf, M. T. B.; Nawaz, M. F.; Rehman, M. Z. U.; Rasul, F.; Tanvir, M. A. (2021). Ecophysiological response of early stage *Eucalyptus camaldulensis* to biochar and other organic amendments under salt stress. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 58(3), 999-1006. <https://doi.org/10.21162/PAKJAS/21.1012>
- Yousaf, M. T. B.; Nawaz, M. F.; Zia Ur Rehman, M.; Gul, S. L.; Yasin, G.; Rizwan, M.; Ali, S. (2021). Effect of three different types of biochars on eco-physiological response of important agroforestry tree species under salt stress. *International Journal of Phytoremediation*, 23(13), 1412-1422. <https://doi.org/10.1080/15226514.2021.1901849>
- Zhang, Q.; Wan, G.; Zhou, C.; Luo, J.; Lin, J.; Zhao, X. (2020). Rehabilitation effect of the combined application of bamboo biochar and coal ash on ion-adsorption-type rare earth tailings. *Journal of Soils and Sediments*, 20(9), 3351-3357. <https://doi.org/10.1007/s11368-020-02670-8>
- Zhao, C.; Zhang, Y.; Liu, X.; Ma, X.; Meng, Y.; Li, X.; Quan, X.; Shan, J.; Zhao, W.; Wang, H. (2020). Comparing the Effects of Biochar and Straw Amendment on Soil Carbon Pools and Bacterial Community Structure in Degraded Soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20(2), 751-760. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-00162-4>
- Zhao, L.; Zhang, X.; Cheng, G.; Zhang, L.; Liu, X.; Li, H. (2017). Effects of biochar on microbial functional diversity of vegetable garden soil. *Acta Ecologica Sinica*, 37(14), 4754-4762. <https://doi.org/10.5846/stxb201604220758>
- Zhaoxiang, W.; Huihu, L.; Qiaoli, L.; Changyan, Y.; Faxin, Y. (2020). Application of bio-organic fertilizer, not biochar, in degraded red soil improves soil nutrients and plant growth. *Rhizosphere*, 16, 100264. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2020.100264>
- Zhelezova, A.; Cederlund, H.; Stenström, J. (2017). Effect of Biochar Amendment and Ageing on Adsorption and Degradation of Two Herbicides. *Water, Air, and Soil Pollution*, 228, 216. <https://doi.org/10.1007/s11270-017-3392-7>