

<https://doi.org/10.14483/2256201X.22939>


ARTÍCULO DE REVISIÓN


ISSN 0120-0739 • e-ISSN 2256-201X

Evaluación del impacto del biocarbón en la calidad de suelos agrícolas: una revisión sistemática

Assessing the Impact of Biochar on Agricultural Soil Quality: A Systematic Review

Liseth Valentina Moreno Mesa ^a, Heidy Yulieth Rodríguez Ramírez ^a,
Victoria Eugenia Vallejo Quintero ^a 

^a Universidad Central de Colombia. Bogotá, Colombia. 

 Autor para correspondencia

Recibido: 25 de noviembre de 2024

Aceptado: 9 de abril de 2025

Citación: Moreno Mesa, L. V., Rodríguez Ramírez, H. Y., & Vallejo Quintero, V. E. (2025). Evaluación del impacto del biocarbón en la calidad de suelos agrícolas: una revisión sistemática. *Colombia Forestal*, 28(2), e22939. <https://doi.org/10.14483/2256201X.22939>

Highlights

- El biocarbón reduce la dependencia a fertilizantes químicos y mejora la salud edáfica.
 - Las biomásas agrícolas aportan el 61 % de las materias primas para producir biocarbón.
 - El biocarbón mejora propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos agrícolas.
 - El biocarbón estimula la actividad biológica y enzimática del suelo.
 - La cáscara de arroz y el estiércol animal tienen un alto rendimiento de conversión.
-

Resumen

El manejo agrícola convencional ha acelerado la degradación del suelo, afectando su calidad y sostenibilidad. El biocarbón, un material carbonoso producido por pirólisis, ha surgido como una solución para restaurar suelos agrícolas y reducir la dependencia de fertilizantes químicos. En este trabajo se analizó el impacto del biocarbón en la calidad del suelo mediante una revisión sistemática de artículos científicos. Se encontró que la biomasa agrícola es la principal fuente de biocarbón (61 %), seguida de la biomasa forestal (23 %), el estiércol animal (8 %), la biomasa urbana (5 %) y la industrial (3 %). El biocarbón mejora propiedades clave del suelo, como la retención de agua (hasta en un 31 %) y la porosidad (14-19 %), además de

estimular la actividad microbiana y enzimática. Estos beneficios resaltan su potencial para optimizar la calidad edáfica y aumentar el rendimiento agrícola.

Palabras clave: biomasa residual, enmienda del suelo, propiedades del suelo, rendimiento agrícola

Abstract

Conventional agricultural management has accelerated soil degradation, affecting soil quality and sustainability. Biochar, a carbonaceous material produced by pyrolysis, has emerged as a solution to restore agricultural soils and reduce dependence on chemical fertilizers. In this work, the impact of biochar on soil quality was analyzed through a systematic review of scientific articles. Agricultural biomass was found to be the main source of biochar (61%), followed by forest biomass (23%), animal manure (8%), urban biomass (5%) and industrial biomass (3%). Biochar improves key soil properties such as water retention (by up to 31%) and porosity (14-19%), in addition to stimulating microbial and enzymatic activity. These benefits highlight its potential to optimize soil quality and increase agricultural yields.

Keywords: residual biomass, soil amendment, soil properties, agricultural yield

INTRODUCCIÓN

El manejo intensivo del suelo mediante prácticas como el riego excesivo, el monocultivo, el uso indiscriminado de agroquímicos, la labranza convencional y el sobrepastoreo ha deteriorado su calidad, afectando propiedades agrícolas y comprometiendo su sostenibilidad ([Luna-Robles et al., 2021](#); [Urrea Ibáñez de Sendadiano, 2020](#)). Las actividades agrícolas intensivas han alterado las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, comprometiendo además su fertilidad, su seguridad alimentaria y los objetivos de desarrollo sostenible ([Derpsch et al., 2024](#); [Jiang et al., 2024](#)). El uso excesivo de fertilizantes y pesticidas ha generado pérdida de nutrientes, desequilibrios microbianos y efectos negativos en los recursos hídricos, la calidad del aire y la salud humana ([Nsengimana et al., 2023](#); [Osinuga et al., 2023](#)).

Por ello, es crucial adoptar prácticas agrícolas sostenibles para reducir la dependencia de agroquímicos y regenerar el suelo a largo plazo. Los fertilizantes orgánicos como el compost, el estiércol y los abonos verdes mejoran la calidad del suelo de manera responsable ([Lishan & Alemu, 2024](#)). Entre ellos, el biocarbón, que se obtiene mediante la pirólisis de biomasa, destaca por su capacidad para potenciar la sostenibilidad agrícola, mitigar el cambio climático y mejorar el suelo ([Agbede & Oyewumi, 2022](#)). Además, el biocarbón ha demostrado ser eficaz a nivel global, mejorando el pH y la biomasa microbiana en China ([Ma et al., 2023](#)), la fertilidad en viñedos italianos ([Idbella et al., 2024](#)) y la retención de agua en India ([Mohan et al., 2024](#)). En Sudamérica, restauró suelos degradados en Ecuador ([Fiallos-Ortega et al., 2015](#)) y Bolivia ([Middelani, 2019](#)), destacando su contribución a la sostenibilidad agrícola.

En Colombia, el biocarbón enfrenta desafíos como el escaso conocimiento sobre su aplicación y la falta de materia prima y capacidad tecnológica. Sin embargo, las iniciativas de [AGROSAVIA \(2021\)](#) resaltan su potencial en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), especialmente en la Orinoquía. Este compuesto se ha identificado como una herramienta clave para la captura de CO₂ y la transición hacia emisiones netas cero ([Samaniego et al., 2020](#)). Proyectos piloto como el de [Becerra-Agudelo et al. \(2022\)](#) en

Medellín han demostrado mejoras en la calidad del suelo, mientras que [Livia y Suárez \(2021\)](#) destacaron su rol en la fertilidad y sostenibilidad agrícola.

Este trabajo es fundamental, pues identifica áreas clave de investigación para impulsar el uso del biocarbón en suelos agrícolas. Resalta sus beneficios en la mejora de la calidad del suelo, el aumento del rendimiento agrícola y la restauración de suelos degradados. Además, resalta el papel de esta herramienta en la sostenibilidad agrícola, promoviendo suelos más resilientes y productivos. El objetivo principal de este trabajo fue efectuar una revisión del estado del arte de estudios adelantados en relación con el uso del biocarbón para mejorar los suelos agrícolas. Para ello, se establecieron los siguientes objetivos específicos: a) identificar los distintos tipos de biomasa utilizados para la producción de biocarbón y comparar su eficiencia en términos de mejora de las propiedades del suelo y b) determinar el impacto del biocarbón en indicadores físicos, químicos y biológicos del suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se implementó una metodología de revisión sistemática siguiendo las directrices de la guía PRISMA 2020 (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) ([Page et al., 2021](#)), reconocida por su rigor y claridad en la presentación de revisiones sistemáticas y metaanálisis. Esta revisión se estructuró en dos fases. La primera se centró en la selección de bases de datos adecuadas, seguida de la búsqueda exhaustiva y la recopilación de artículos relevantes. En la segunda se llevó a cabo la síntesis y el análisis de la información recopilada, con el objetivo de identificar y destacar los aspectos más relevantes de los artículos en relación con los objetivos establecidos.

Fase 1: selección de bases de datos y recopilación de artículos científicos

Se llevó a cabo una revisión sistemática de la literatura utilizando bases de datos académicas reconocidas, *i.e.*, Dimensions, ScienceDirect, Redalyc y Google Académico. La estrategia de búsqueda empleó palabras clave en inglés y español relacionadas con el biocarbón y su impacto en la calidad del suelo agrícola, lo que permitió identificar 893 publicaciones iniciales. Se definieron criterios de inclusión rigurosos, considerando únicamente artículos publicados entre 2020 y 2024, estudios primarios y revisiones bibliográficas con un diseño metodológico sólido, investigaciones aplicadas a cultivos agrícolas y trabajos enfocados en prácticas agrícolas sostenibles. Por otro lado, se excluyeron publicaciones duplicadas, libros, capítulos de libros, tesis y estudios que no presentaban resultados relevantes para los objetivos de la revisión. Tras aplicar los filtros iniciales, la muestra se redujo a 147 artículos, de los cuales 60 fueron seleccionados tras priorizar estudios centrados en las propiedades físico-químicas del suelo y el rendimiento agrícola. Estos fueron analizados en detalle para garantizar su relevancia.

Fase 2: síntesis y análisis de la información

Los artículos seleccionados se sintetizaron por medio de una matriz bibliográfica con la siguiente información: autor(es), año, país, tipo de artículo, revista, título de artículo, palabras clave, objetivo(s), tipos de biomasa,

En cuanto al análisis de resultados y la discusión, se utilizó Microsoft Excel para organizar y analizar los datos extraídos de los artículos seleccionados. Mediante tablas dinámicas, se consolidó la información y se identificaron patrones y tendencias relevantes, como la distribución temporal, geográfica y temática de los estudios. Los resultados se representaron mediante gráficos estadísticos, y las clasificaciones de variables clave, como biomásas, cultivos y propiedades del suelo, se basaron en criterios teóricos validados en la literatura, garantizando un análisis sistemático y riguroso.

El análisis mostró una distribución porcentual de los artículos por año de publicación: 3 % en 2020, 23 % en 2021, 15 % en 2022, 32 % en 2023, 25 % en 2024 y 2 % en 2025. Se observó un aumento significativo en 2021, lo que refleja el creciente interés global por el biocarbón, impulsado por la demanda de soluciones sostenibles para la agricultura y la gestión de residuos. Geográficamente, los estudios sobre biocarbón para mejorar la calidad del suelo están distribuidos principalmente en Asia (47 %), América del Sur y Europa (15 %), África (12 %), América del Norte (10 %) y Oceanía (2 %), destacando la concentración en ciertos continentes y un enfoque predominante en las ciencias ambientales y agrícolas. China lidera la investigación con 19 publicaciones (Figura 1), que abarcan desde la producción de biocarbón hasta su impacto en el suelo. En contraste, Colombia presenta una producción científica limitada, con siete artículos centrados principalmente en la transformación de biomasa, dejando en segundo plano el estudio de su impacto en la calidad del suelo y la productividad agrícola. Esta brecha resalta la necesidad urgente de profundizar en investigaciones sobre el biocarbón como una herramienta sostenible para mejorar las condiciones edáficas y aumentar la eficiencia en la producción agrícola del país.

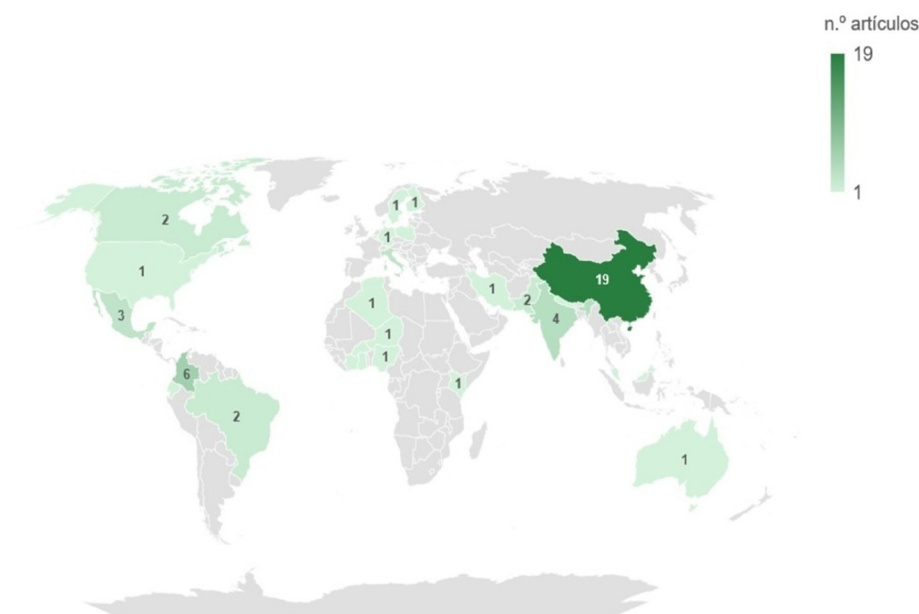


Figura 1. Artículos evaluados por país en relación con la influencia del biocarbón en la calidad de suelos agrícolas

RESULTADOS

Tipos de biomasa y su eficiencia en la producción de biocarbón

La biomasa utilizada para producir biocarbón proviene de diversos materiales orgánicos como los residuos agroindustriales y forestales (Tan, 2023). En este estudio se clasificaron las materias primas para la producción de biocarbón en cinco categorías según su origen. La primera es la biomasa agrícola, que incluye residuos de cultivos como paja, cáscaras y cultivos energéticos como maíz y caña de azúcar (Tan, 2023). La segunda categoría corresponde a la biomasa forestal, que abarca restos de la explotación forestal como ramas, cortezas y residuos madereros (Pérez-Cabrera *et al.*, 2021; Si *et al.*, 2024). La tercera categoría es la biomasa de origen animal, estiércol y otros desechos derivados de la cría de animales (Chagas *et al.*, 2022). La cuarta es la biomasa residual urbana, compuesta por residuos orgánicos urbanos como restos de alimentos y lodos de depuradora (Amoah-Antwi *et al.*, 2020). Finalmente, la quinta corresponde a la biomasa industrial, que engloba residuos orgánicos de procesos industriales, como lo son el carbón de lignito y los residuos de palma de aceite, papel y refinería de azúcar (Zang *et al.*, 2023).

La clasificación presentada en la Tabla 1 facilita la identificación de las fuentes de biomasa y sus aplicaciones en la producción de biocarbón, destacando su potencial para mejorar la calidad del suelo. El análisis muestra que la biomasa agrícola es la principal fuente, representando el 61 % del total, debido a la abundancia de residuos como cáscaras, paja y rastrojos. La biomasa forestal representa el 23 %, derivada principalmente de astillas y aserrín, mientras que el estiércol animal constituye el 8 %, gracias a su alto contenido de nutrientes (He *et al.*, 2024). Los residuos urbanos e industriales aportan el 5 y el 3 % respectivamente, con un alto potencial para la reutilización y reducción del impacto ambiental (Saharudin *et al.*, 2024). Diversos estudios han documentado los rendimientos de estas biomásas, proporcionando ejemplos claros de los precursores más utilizados en cultivos y sus respectivos rendimientos de conversión a biocarbón.

Tabla 1. Rendimiento de conversión de la biomasa utilizada para la elaboración de biocarbón

Tipo de biomasa y % de uso en estudios	Rendimiento de biocarbón	Observaciones	Referencia
Agrícola (61 %)	Palma: 31.8 % Paja de arroz: 32.75-51.36 % Cáscaras de arroz: 44.5 % Residuos de madera clasificados: 29.4-33.6 %	Existe variabilidad en el rendimiento debido a diferencias en composición química.	(James <i>et al.</i> , 2022; Li <i>et al.</i> , 2023)
Forestal (23 %)	Residuos de madera mezclados: 18.5 %	La falta de homogeneidad en las especies de madera mezcladas afecta el rendimiento.	(Adeodun <i>et al.</i> , 2022)
Estiércol animal (8 %)	40-60%	Depende del tipo de estiércol y condiciones de pirólisis.	(Rathnayake <i>et al.</i> , 2023) (Gopinath <i>et al.</i> , 2021; Jat Baloch <i>et al.</i> , 2023; Zhang <i>et al.</i> , 2022)
Residual urbana (5 %)	Lodos de agua residual: 52.4-57.9 %	Alta porosidad y capacidad de adsorción de contaminantes; rica en nutrientes.	(Xu <i>et al.</i> , 2021; Zang <i>et al.</i> , 2023)
Industrial (3 %)	No se presenta un porcentaje específico	Ejemplos: lodos de refinería de azúcar con grupos funcionales Fe-O abundantes; alta capacidad de adsorción de Cd y As en lodos de fábricas de papel.	(Xu <i>et al.</i> , 2021; Zang <i>et al.</i> , 2023)

Características fisicoquímicas del biocarbón según su biomasa de origen

El biocarbón mejora la calidad del suelo gracias a su capacidad de adsorción y mineralización, impulsada por su estructura porosa y los grupos funcionales que promueven la actividad biológica (Bagheri Novair *et al.*, 2023; Singh Yadav *et al.*, 2023). La temperatura de pirólisis de la materia prima afecta sus propiedades fisicoquímicas y, por tanto, su efectividad en aplicaciones agrícolas (Sánchez-Reinoso *et al.*, 2020). Una de sus características más importantes (Tabla 2) es el contenido de carbono, que determina su estabilidad y capacidad de retener nutrientes (Singh Yadav *et al.*, 2023). Sin embargo, también como propiedades claves en el biocarbón, se tuvieron en cuenta el contenido de cenizas, el pH y la capacidad de intercambio catiónico (CIC).

Tabla 2. Propiedades fisicoquímicas del biocarbón

Tipo de biocarbón	Temperatura de producción (°C)	Contenido de carbono (%)	Contenido de cenizas (%)	pH	(CIC) cmol.kg ⁻¹	Área superficial (m ² .g ⁻¹)	Porosidad (%)	Referencia
Madera (gasificación)	600-650	60.19	-	10.15	-	-	-	(Liu <i>et al.</i> , 2022)
Paja de Arroz (pirólisis)	600	42.60	-	10.1	44.8	81.9	8	(Jiang <i>et al.</i> , 2021)
Paja de maíz (pirólisis lenta)	450	41.30	20.80	8.79	31.58	-	-	(Ma <i>et al.</i> , 2023)
Paja de tabaco	500	62.58	-	11.2	-	-	-	(Chen <i>et al.</i> , 2023)
Cáscara de maní	550	59.82	25.32	9.72	26.99	2.24	2.5	(Xu <i>et al.</i> , 2024)
Poda de huertos (pirólisis lenta)	500	77.81	-	9.8	101	-	-	(Idbella <i>et al.</i> , 2024)

Impacto del biocarbón en el rendimiento de cultivos agrícolas

Se identificaron 36 cultivos aplicados con biocarbón, clasificados en las siguientes categorías según sus características agronómicas similares: cereales y granos (*e.g.*, arroz, maíz y trigo), hortalizas, verduras y leguminosas (como lechuga, repollo y pimiento verde), frutales y plantas perennes (como raigrás, plántulas de cáñamo y granadilla), cultivos de rotación, y tubérculos y raíces (como batata y mandioca). Los cereales y granos fueron los más estudiados, lo que refleja su importancia en la agricultura global y su potencial para mejorar el rendimiento agrícola mediante el uso de biocarbón, destacando su contribución a la seguridad alimentaria.

En términos de representatividad, los cereales y granos constituyen el 33 % del total de cultivos analizados. Les siguen los frutales y plantas perennes, con el 28 %; y las hortalizas, verduras y leguminosas, que representan el 25 %. Los cultivos de rotación, fundamentales en las prácticas agrícolas sostenibles, abarcan el 8 %, mientras que los tubérculos y raíces, aunque menos predominantes, aportan un 6 %. Esta diversidad refleja el amplio rango de biomásas agrícolas disponibles para aplicaciones sostenibles en la producción de biocarbón.

Impacto del biocarbón sobre las propiedades del suelo

Se analizaron las propiedades más evaluadas para determinar el impacto del biocarbón en la calidad del suelo. En el ámbito físico, destacaron la capacidad disponible de agua (24 %), la densidad aparente (22 %), la capacidad de retención de agua (19 %) y la porosidad (15 %). Entre las propiedades químicas sobresalieron el pH (21 %), el carbono orgánico del suelo (13 %) y la CIC (11%). A nivel biológico, resaltaron la diversidad de microorganismos (24 %), la materia orgánica (20 %), la actividad enzimática (15 %) y la actividad microbiana (11 %). Adicionalmente, se analizó el impacto del biocarbón sobre el comportamiento de estos indicadores (Tabla 3).

Tabla 3. Impacto del biocarbón en la calidad del suelo

Tipos de biomasa	Tipo de suelo (taxonomía/textura)	Tipo de cultivo	Impacto en las propiedades del suelo			Referencia
			Físicas	Químicas	Biológicas	
Paja de maíz	Franco	Rotación trigo de invierno-maíz de verano	Disminución de la DA	Aumento del pH, DOC, COS y NT del suelo Disminución en el contenido de nitrato y amonio	Aumento en el carbono de la biomasa microbiana del suelo, abundancia de oligótrofos Disminución de copiótrofos y del cociente metabólico	(Ma et al., 2023)
Paja de trigo	-	Planta de cítricos de cinco años (variedad <i>GongChua</i>)	-	Aumento del pH, NA, P y K	Aumento de la MOS Mejora significativamente la diversidad de las bacterias	(Zhang et al., 2021)
Maíz y madera	Alfisol/franco-arcilloso	<i>Panax ginseng</i>	Aumento de la capacidad disponible de agua	Aumento del pH y relación C/N del suelo	Aumento en la EEA	(Liu et al., 2022)
Astillas de madera y corteza	Arena y limo	<i>Raigrás perenne</i>	-	Aumento del pH, COS y concentración de fosfato Disminución del DOC	Aumento de la biomasa, la respiración microbiana del suelo y los microorganismos involucrados en la amonificación de nitratos Aumento en la respiración del suelo, abundancia de bacterias oligotróficas y de especies de hongos en la rizosfera de la vid	(Rijk et al., 2024)
Poda de huertos	Franco-arcillosa arenosa	Viñedo	Reducción significativa de la DA	Aumento del pH, COS, concentraciones de fósforo, amonio y nitrato	Aumento de las actividades enzimáticas arilesterasa y la proteasa, pero reducción de la fosfatasa ácida	(Idbella et al., 2024)
Paja de arroz	Franco-arenoso	Rotación cultivo de arroz y colza	Aumento de la porosidad total y humedad del suelo Disminución de la DA	Aumento de pH, EC, COS, contenido de N y P total, y K	Aumento de la actividad enzimática como ureasa, invertasa, fosfatasa alcalina y catalasa en ambos cultivos	(Khan et al., 2024)

Tipos de biomasa	Tipo de suelo (taxonomía/textura)	Tipo de cultivo	Impacto en las propiedades del suelo			Referencia
			Físicas	Químicas	Biológicas	
Ramas leñosas y troncos (<i>Pinus halepensis</i> Mill.)	Calcisoles háplicos	Trigo duro (<i>Triticum durum</i>)	Capacidad disponible de agua aumentó significativamente	Aumento de EC Aumento de TCCE Disminución de ACCE	La acumulación de MOS mostró una evolución positiva	(Boudjabi <i>et al.</i> , 2023)
Estiércol porcino (PB) Paja de maíz (MB) Cáscara de arroz (RB)	Franco-arenoso y limo arcilloso	Maní alto oleico	Aumento significativo de la humedad del suelo Disminución de la DA del suelo	Aumento del COS y del P disponible Ligeros aumentos en el pH del suelo y la CIC Aumento significativo del N total y K disponible bajo RB e insignificamente bajo PB y MB en relación con el control	Aumento de la actividad de N -acetil-glucosaminidasa y de la proporción relativa de <i>Gammaproteobacteria</i> con todas las enmiendas de biocarbón, además de un número significativamente mayor de géneros específicos de diazótrofos bajo PB y MB	(Liu <i>et al.</i> , 2024a)

DA: densidad aparente; COS: carbono orgánico del suelo; CIC: capacidad de intercambio catiónico; NT: nitrógeno total; CT: carbono total; EC: conductividad eléctrica; DOC: carbono orgánico disuelto; nutrientes totales y disponibles: P, K, Ca, Mg; NA: nitrógeno alcalino; ACCE: equivalente de carbonato de calcio activo CaCO_3 ; TCCE: equivalente total de carbonato de calcio CaCO_3 ; EEA: actividad enzimática extracelular del suelo; MOS: materia orgánica del suelo

DISCUSIÓN

Tipos de biomasa y su eficiencia en la producción de biocarbón

La biomasa agrícola destaca como principal fuente debido a la disponibilidad de subproductos agrícolas fácilmente accesibles que, de otra manera, serían descartados. Esta biomasa no solo contribuye a la sostenibilidad agrícola y a la reducción de residuos, sino que también ayuda a reducir la dependencia de combustibles fósiles (Hamissou *et al.*, 2023). Los residuos de la industria forestal, aunque menores en proporción, son importantes dado que promueven la economía circular y el uso eficiente de los recursos (Joseph *et al.*, 2021). El estiércol animal se presenta como una biomasa valiosa por su alto contenido de nutrientes y materia orgánica, mejorando la calidad del suelo y mitigando así el impacto ambiental al reducir las emisiones de GEI asociadas a la descomposición del estiércol bajo condiciones convencionales (He *et al.*, 2024). Aunque los residuos urbanos e industriales representan una fracción pequeña, su inclusión ofrece beneficios al permitir la reutilización de subproductos y reducir el impacto ambiental, alineándose con las metas de sostenibilidad global y de reducción de la huella de carbono (Saharudin *et al.*, 2024).

De esta manera, las propiedades del biocarbón varían según su materia prima, debido a las diferencias en sus composiciones elementales y mineralógicas. Los residuos agrícolas y de madera contienen principalmente celulosa, hemicelulosa y lignina. Esta última, al ser el principal precursor del biocarbón, influye en sus propiedades fisicoquímicas, dando lugar a biocarbón con características distintas según el proceso de pirólisis (Barrezueta Unda *et al.*, 2024; Böröcsök & Pásztori, 2020; Tan, 2023). Por ello, la Tabla 1 sugiere que el rendimiento del biocarbón varía considerablemente según el tipo de biomasa empleada. Los materiales agrícolas

y forestales presentan una gama amplia de rendimientos debido a diferencias en composición química y homogeneidad. El estiércol animal, si bien depende del tipo de estiércol y las condiciones de pirólisis, se caracteriza generalmente por ofrecer altos rendimientos (40-60 %), mientras que los lodos de aguas residuales destacan por su alta porosidad, su elevada capacidad de adsorción de contaminantes y su riqueza en nutrientes (Gopinath *et al.*, 2021; Jat Baloch *et al.*, 2023; Rathnayake *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2022). En el caso de la biomasa industrial, aunque no se especifica un rendimiento concreto, sus subproductos, como por ejemplo los lodos de fábricas de papel, poseen una alta capacidad para la adsorción de contaminantes como cadmio y arsénico (Xu *et al.*, 2021).

Características fisicoquímicas del biocarbón según su biomasa de origen

En las investigaciones estudiadas (Tabla 2) se identifica que el biocarbón de madera producido a temperaturas elevadas (600-650 °C) es notablemente estable y rico en carbono (60.2 %), lo que lo hace beneficioso para la mejora del suelo (Liu *et al.*, 2022). En comparación, el biocarbón de paja de arroz tiene menor contenido de carbono (42.6 %), lo que limita su efectividad en el secuestro de carbono a largo plazo (Jiang *et al.*, 2021). El contenido de cenizas varía entre tipos: la paja de maíz procesada a 450 °C tiene un 20.8 % de cenizas (Ma *et al.*, 2023), mientras que la madera blanda muestra solo un 2.44 %, lo que indica una mayor pureza y un menor contenido de residuos minerales (Garau *et al.*, 2024; Gutiérrez *et al.*, 2021). El pH, esencial para reducir la acidez, mejorar la disponibilidad de nutrientes y favorecer un entorno saludable para las plantas y los microorganismos, varía según la biomasa del biocarbón, destacándose el de paja de tabaco, con un pH de 11.2, ideal para suelos ácidos (Amoah-Antwi *et al.*, 2020; Chen *et al.*, 2023; Si *et al.*, 2024). La mayoría de los biocarbones son de pH alcalino y deben seleccionarse según las necesidades del suelo. Además, la CIC es clave para la retención de nutrientes, siendo alta en biocarbón de poda de huertos (101 cmol.kg⁻¹) (Idbella *et al.*, 2024). De igual manera, el área superficial del biocarbón es crucial para su capacidad de adsorción. Por ejemplo, el biocarbón de astillas de madera tiene una alta superficie de más de 205 m².g⁻¹, ideal para aplicaciones de alta adsorción, mientras que el de cáscara de maní es mucho menor, con 2.24 m².g⁻¹ (Lozano & Afanasjeva, 2023; Rijk *et al.*, 2024; Xu *et al.*, 2024). La porosidad también varía, destacándose el biocarbón de cascarilla de arroz por su alta porosidad total (86.43 %), lo que favorece la retención de agua y nutrientes (Puentes-Escobar *et al.*, 2022).

El contenido de nutrientes es otro factor importante. El biocarbón de paja de trigo, producido a 400 °C, tiene un alto contenido de nitrógeno (31.6 g.kg⁻¹), útil para suelos deficientes, en contraste con el biocarbón de cáscara de maní, que contiene solo 0.58 g.kg⁻¹. El biocarbón de bambú es rico en fósforo (8532.8 ppm), adecuado para suelos pobres en este nutriente (Orozco Gutiérrez *et al.*, 2021; Purkaystha *et al.*, 2022; Xu *et al.*, 2024). Estas diferencias muestran que las propiedades del biocarbón varían según el tipo de biomasa y el método de producción, requiriendo aplicaciones específicas según las necesidades del suelo.

Impacto del biocarbón en el rendimiento de cultivos agrícolas

Los estudios analizados resaltan cómo el biocarbón influye en el rendimiento de diversos cultivos en comparación con suelos sin tratamiento (controles) o tratados con otras enmiendas. Por ejemplo, Manka'abusi *et*

al. (2024) reportaron aumentos del 32 y 42 % en los rendimientos de repollo y amaranto, respectivamente, cuando se usó biocarbón a base de mazorca de maíz. Otros estudios han encontrado incrementos de hasta un 81.36 % en la biomasa de arroz al aplicar biocarbón derivado de cáscara de maní y paja de maíz (Xu et al., 2024). En los primeros años de estudio, Khan et al. (2024) evidenciaron que el biocarbón aumentó el rendimiento de arroz y colza en 12 y 22 % respectivamente, con rendimientos aún mayores en los siguientes años al usar solo biocarbón.

Además, el biocarbón ha mostrado beneficios en cultivos específicos. Zhang et al. (2021) reportaron un incremento en la calidad de los cítricos, mientras que Liu et al. (2022) observaron un aumento en la biomasa de *Panax ginseng*. También se han destacado efectos positivos en cultivos como cáñamo y albahaca (Garau et al., 2024; Pérez-Cabrera et al., 2022), así como en plántulas de granadilla (Puentes-Escobar et al., 2022). En general, los estudios indican que el biocarbón puede ser una herramienta eficaz para mejorar la fertilidad del suelo y aumentar el rendimiento de diversos cultivos. Sin embargo, su efectividad depende del tipo de biocarbón utilizado y de la dosis aplicada. Las investigaciones indican que las dosis más comunes en agricultura están entre las 10 y las 20 t.ha⁻¹, aunque algunos autores sugieren que estos valores pueden aumentar según la calidad del suelo y la escala del experimento (Agbede & Oyewumi, 2022; Frimpong et al., 2021; Kalu et al., 2021; Liu et al., 2022, 2024a; Orozco Gutiérrez et al., 2021).

Impacto del biocarbón sobre las propiedades del suelo

El uso de indicadores clave en los estudios permitió evaluar cómo diversas propiedades del suelo afectan sus funciones fundamentales. Por ejemplo, la capacidad de retención de agua es esencial para la filtración y el almacenamiento de nutrientes, así como para la biodiversidad. La densidad aparente y la porosidad son factores clave para garantizar la estabilidad estructural del suelo, proporcionar soporte a las raíces y facilitar la producción de biomasa. Los indicadores químicos (el pH, el COS y la CIC) ayudan a entender el ciclaje de nutrientes y la dinámica de regulación de solutos. Los aspectos biológicos, como la actividad enzimática y la diversidad de microorganismos, son críticos para la biodiversidad y el secuestro de carbono (Amoah-Antwi et al., 2020).

Impacto del biocarbón en las propiedades físicas del suelo

Los estudios indican que la aplicación de biocarbón en el suelo ofrece beneficios significativos en términos de propiedades físicas, lo que se ve particularmente reflejado en la mejora de la capacidad de retención de agua y la salud general del suelo (Tabla 3). En suelos franco-arenosos, la adición de biocarbón incrementó el contenido de humedad en cultivos de arroz y colza, con aumentos de hasta 31 y 22 % respectivamente en distintos periodos, y, en suelos con estrés salino, la capacidad de retención de agua aumentó en un 18.93 % (Khan et al., 2024; Liu et al., 2024b). De manera similar, Boudjabi et al. (2023) observaron, en suelos calcisoles, característicos de climas áridos y semiáridos, un aumento significativo en el contenido de agua con la aplicación de dosis bajas de biocarbón. Este efecto de retención hídrica es consistente con los hallazgos de Sharma et al. (2025), quienes reportaron un incremento del 21 % en la humedad del suelo al aplicar biocarbón a una tasa de 3 t.ha⁻¹ en suelos de textura franco-arcillosa-arenosa.

La densidad aparente del suelo también disminuye con la adición de biocarbón, lo cual mejora la aireación y facilita la penetración de raíces, además de reducir la compactación (Garau *et al.*, 2024; Liu *et al.*, 2024a; Ma *et al.*, 2023; Sharma *et al.*, 2025). Liu *et al.* (2024a, 2024b) reportaron una disminución de la densidad aparente de hasta un 16.67 % bajo un estrés salino del 60 %, así como un aumento en la humedad, favoreciendo las condiciones para el desarrollo radicular en suelos franco-arenosos. La estructura porosa del biocarbón ha demostrado incrementar la porosidad total del suelo, facilitando la absorción de nutrientes (Agbede & Oyewumi, 2022; Hamissou *et al.*, 2023). En suelos con estrés salino de 20 y 60 % se observaron aumentos de 7.06 y 4.59 % en la porosidad total con biocarbón de cáscara de arroz, mientras que, con paja de arroz, este valor aumentó en un 14 y un 19 % en cultivos de colza y arroz respectivamente (Khan *et al.*, 2024; Liu *et al.*, 2024b). Esto también mejoró la infiltración de agua y el almacenamiento de aire, aspectos clave para mitigar la erosión.

Impacto del biocarbón en las propiedades químicas del suelo

Los estudios mostraron un impacto en las propiedades químicas del suelo, como el aumento del pH (Tabla 3), observándose un incremento del 3.16 y el 4.22 % en suelos franco-arenosos tratados con biocarbón de mazorca de maíz y cáscara de arroz (Frimpong *et al.*, 2021; Liu *et al.*, 2024b). En suelos franco-limosos se registró un aumento del pH de 7.82 a 7.91 con la adición de 6 % de biocarbón, lo que sugiere que este compuesto puede mitigar el estrés ácido del suelo (Irfan *et al.*, 2021).

La mayoría de los estudios indican que el carbono orgánico del suelo (COS) aumenta tras la aplicación de biocarbón, con un impacto positivo en su retención a largo plazo (Idbella *et al.*, 2024; Jiang *et al.*, 2021; Rijk *et al.*, 2024; Sharma *et al.*, 2025). En suelos franco-arenosos, el COS mostró un incremento inicial con la aplicación de biocarbón de mazorca de maíz, aunque este valor disminuyó con el tiempo. Sin embargo, los niveles de carbono se mantuvieron superiores en comparación con otros tratamientos (Manka'abusi *et al.*, 2024). De manera similar, en suelos tratados con biocarbón de cáscara de arroz, paja de maíz y estiércol porcino se reportaron incrementos de 18-27 % en el COS de todos los tratamientos evaluados (Liu *et al.*, 2024b). Además, el biocarbón ha demostrado ser efectivo en la acumulación de carbono en suelos con bajas concentraciones, promoviendo el incremento de las fracciones de carbono lábiles y estables (Amoah-Antwi *et al.*, 2020; Chagas *et al.*, 2022). Este efecto favorece el secuestro de carbono a largo plazo, contribuyendo a la mejora de la calidad del suelo y a la mitigación del cambio climático.

Respecto a la CIC, diversos estudios reportan incrementos significativos tras la adición de biocarbón, con aumentos del 14 % utilizando biocarbón a base de maíz, del 23.8 % con paja de trigo y hasta en un 48.8 % con una mezcla de cáscara de maní y paja de maíz. Estos resultados evidencian la efectividad del biocarbón para mejorar la fertilidad del suelo y potenciar su capacidad para retener nutrientes esenciales (Liu *et al.*, 2022; Xu *et al.*, 2024; Zhang *et al.*, 2021). El efecto del biocarbón no solo se atribuye al aporte directo de nutrientes, sino también a la mejora en la absorción de minerales por parte de las plantas (James *et al.*, 2022; Orozco Gutiérrez *et al.*, 2021). Su aplicación aumenta la disponibilidad de nutrientes esenciales como el nitrógeno (N), el fósforo (P) y el potasio (K). Por ejemplo, el biocarbón de cáscara de arroz y rastrojo de maíz eleva estos nutrientes en comparación con el control, mientras que el biocarbón de paja de trigo incrementa el P y el K en suelos superficiales. En suelos salinos y alcalinos, el biocarbón —especialmente el de bambú— favorece

la disponibilidad de nutrientes y el crecimiento de cultivos (Li *et al.*, 2023; Lozano & Afanasjeva, 2023; Orozco Gutiérrez *et al.*, 2021; Si *et al.*, 2024; Zhang *et al.*, 2021).

Impacto del biocarbón en las propiedades biológicas del suelo

Los estudios muestran que la adición de biocarbón tiene un impacto positivo en las propiedades biológicas del suelo (Tabla 3). La actividad enzimática y la diversidad microbiana cambian con la incorporación de biocarbón, promoviendo la abundancia de grupos beneficiosos. Se han observado incrementos en las actividades enzimáticas de ureasa, invertasa, fosfatasa y catalasa en cultivos de arroz, colza y toronjil (Khan *et al.*, 2024; Liu *et al.*, 2024a). Por ejemplo, Ma *et al.* (2023) reportaron un aumento del 18 % en el carbono de la biomasa microbiana (MBC) en suelos con biocarbón de paja de maíz, así como un entorno más propicio para oligótrofos. Sin embargo, la diversidad microbiana disminuyó en las capas profundas (40-60 cm). El biocarbón de paja de trigo favoreció la diversidad de bacterias, pero redujo la uniformidad de los hongos (Zhang *et al.*, 2021). Además, el biocarbón de maíz y madera promovió el crecimiento de *Proteobacteria* y *Actinobacteria*, que protegen las raíces de enfermedades (Idbella *et al.*, 2024; Liu *et al.*, 2022). Idbella *et al.* (2024) también observaron un incremento en *Chytridiomycota* en la rizosfera, lo cual está ligado a una mejor retención de agua y una mejor descomposición de materia orgánica. Xu *et al.* (2024) destacaron que el biocarbón de cáscara de maní y paja de maíz aumentó la abundancia y diversidad microbiana, mejorando la estructura de la comunidad y elevando los índices de diversidad alfa (Chao1 y Shannon). Estos cambios indican una mejora en la respiración del suelo y la funcionalidad microbiana general (Rijk *et al.*, 2024).

Potencialidades y limitaciones del biocarbón

El biocarbón presenta un notable potencial para mejorar la calidad del suelo, como se ilustra en la Figura 2, incrementando la retención de agua, la porosidad y estimulando la actividad microbiana y enzimática, lo que beneficia el desarrollo de los cultivos (Agbede & Oyewumi, 2022; Hamissou *et al.*, 2023; Idbella *et al.*, 2024; Ma *et al.*, 2023; Purkaystha *et al.*, 2022). Sin embargo, su efectividad depende del tipo de biomasa utilizada y de las condiciones de pirólisis empleadas durante su producción (Chagas *et al.*, 2022).

A corto plazo, el biocarbón mejora la retención de agua y la porosidad, aunque no genera un impacto inmediato en la CIC. En el mediano plazo, puede disminuir temporalmente la disponibilidad de nutrientes al estabilizar la materia orgánica, ralentizando su descomposición (Joseph *et al.*, 2021). A largo plazo, incrementa la disponibilidad de fósforo y la CIC, si bien se observa una reducción en el volumen de los poros, limitando algunos de los beneficios iniciales (James *et al.*, 2022; Joseph *et al.*, 2021). Además, el carbono lábil del biocarbón, responsable de ciertos beneficios, se consume rápidamente, requiriendo aplicaciones periódicas para mantener su efectividad (Idbella *et al.*, 2024). Un desafío adicional es la variabilidad de los resultados del biocarbón según el tipo de suelo y las condiciones ambientales. A pesar de estas limitaciones, esta sigue siendo una herramienta prometedora para mejorar la calidad del suelo, restaurar suelos degradados y fomentar una agricultura sostenible a largo plazo.

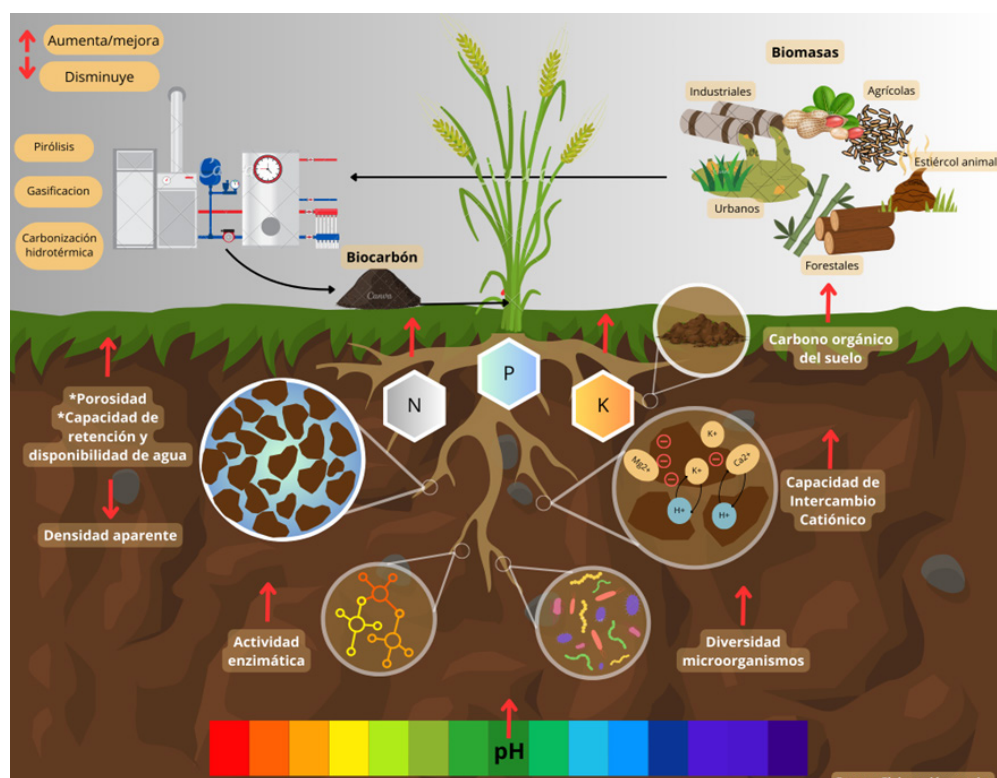


Figura 2. Potencialidades del biocarbón en las propiedades del suelo

CONCLUSIONES

Se identificaron diversos tipos de biomásas como materia prima para la producción de biocarbón, incluyendo residuos agrícolas y forestales, estiércol animal y desechos industriales, lo que representa una solución sostenible para la gestión de residuos. Entre las biomásas identificadas, la agrícola destacó por su abundancia, accesibilidad y potencial para mejorar la calidad de los suelos agrícolas. La incorporación de biocarbón mejoró integralmente las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos, principalmente de los francos. En términos físicos, aumentó la capacidad de retención de agua, redujo la densidad aparente y optimizó la porosidad. Químicamente, elevó el pH, incrementó la capacidad de intercambio catiónico y mejoró la disponibilidad de nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo y potasio. Biológicamente, promovió la diversidad microbiana y potenció la actividad enzimática, fortaleciendo la calidad y salud del suelo.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Universidad Central (Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas) por brindarnos la oportunidad de acceder a sus bases de datos y por el invaluable apoyo del cuerpo docente, cuyo conocimiento y orientación se hicieron presentes en esta investigación.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

CONTRIBUCIÓN POR AUTOR

Todos los autores lideraron la investigación y participaron en la selección de bases de datos, la recopilación y el análisis de artículos, y contribuyeron de manera equitativa a la redacción, revisión y edición del manuscrito.

REFERENCIAS

- Adeodun, S. A., Sangodoyin, A. Y., & Ogundiran, M. B.** (2022). Optimisation of biochar yield from sorted wood wastes as sustainable alternatives to burning to ash. *Ecological Chemistry and Engineering S*, 29(1), 15-26.
<https://doi.org/10.2478/eces-2022-0003>
- 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>
- AGROSAVIA.** (2021). El Proyecto BiocarbonoBiocarbón y AGROSAVIA avanza en iniciativa para la reducción de emisiones de cultivos de arroz en la Orinoquia. *Gobierno de Colombia*.
<https://www.agrosavia.co/noticias/el-proyecto-biocarbono-y-agrosavia-avanzan-en-iniciativa-para-la-reducci%C3%B3n-de-emisiones-de-cultivos-de-arroz-en-la-orinoquia>
- Amoah-Antwi, C., Kwiatkowska-Malina, J., Thornton, S. F., Fenton, O., Malina, G., & Szara, E.** (2020). Restoration of soil quality using biochar and brown coal waste: A review. *Science of The Total Environment*, 722, 137852.
<https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.137852>
- Bagheri Novair, S., Cheraghi, M., Faramarzi, F., Asgari Lajayer, B., Senapathi, V., Astatkie, T., & Price, G. W.** (2023). Reviewing the role of biochar in paddy soils: An agricultural and environmental perspective. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 263, 115228.
<https://doi.org/10.1016/J.ECOENV.2023.115228>
- Barrezueta Unda, S., Romero Bonilla, H., & Rios Hidalgo, M.** (2024). Características principales del biocarbón derivado de restos de *Theobroma cacao* L. para su uso en suelos agrícolas. *Revista Colombiana de Química*, 52(1), 19–24.
<https://doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v52n1.110591>

- Becerra-Agudelo, E., López, J. E., Betancur-García, H., Carbal-Guerra, J., Torres-Hernández, M., & Saldarriaga, J. F.** (2022). Assessment of the application of two amendments (lime and biochar) on the acidification and bioavailability of Ni in a Ni-contaminated agricultural soils of northern Colombia. *Heliyon*, 8(8), e10221.
<https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2022.E10221>
- Börcsök, Z., & Páztory, Z.** (2020). The role of lignin in wood working processes using elevated temperatures: an abbreviated literature survey. *European Journal of Wood and Wood Products*, 79(3), 511-526.
<https://doi.org/10.1007/S00107-020-01637-3>
- Boudjabi, S., Ababsa, N., & Chenchouni, H.** (2023). Enhancing soil resilience and crop physiology with biochar application for mitigating drought stress in durum wheat (*Triticum durum*). *Heliyon*, 9(12), e22909.
<https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2023.E22909>
- Chagas, J. K. M., de Figueiredo, C. C., & Ramos, M. L. G.** (2022). Biochar increases soil carbon pools: Evidence from a global meta-analysis. *Journal of Environmental Management*, 305, 114403.
<https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2021.114403>
- Chen, L., Sun, S., Zhou, Y., Zhang, B., Peng, Y., Zhuo, Y., Ai, W., Gao, C., Wu, B., Liu, D., & Sun, C.** (2023). Straw and straw biochar differently affect fractions of soil organic carbon and microorganisms in farmland soil under different water regimes. *EnvTI*, 32, 103412.
<https://doi.org/10.1016/J.ETI.2023.103412>
- Derpsch, R., Kassam, A., Reicosky, D., Friedrich, T., Calegari, A., Basch, G., Gonzalez-Sanchez, E., & dos Santos, D. R.** (2024). Nature's laws of declining soil productivity and Conservation Agriculture. *Soil Security*, 14, 100127.
<https://doi.org/10.1016/J.SOISEC.2024.100127>
- Fiallos-Ortega, L. R., Flores-Mancheno, L. G., Duchi-Duchi, N., Flores-Mancheno, C. I., Baño-Ayala, D., & Estrada-Orozco, L.** (2015). Restauración ecológica del suelo aplicando biochar (carbón vegetal), y su efecto en la producción de *Medicago sativa*. *Ciencia y Agricultura*, 12(2), 13-20.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=560058661006>
- Frimpong, K. A., Phares, C. A., Boateng, I., Abban-Baidoo, E., & Apuri, L.** (2021). One-time application of biochar influenced crop yield across three cropping cycles on tropical sandy loam soil in Ghana. *Heliyon*, 7(2), e06267.
<https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2021.E06267>
- Garau, M., Lo Cascio, M., Vasileiadis, S., Sizmur, T., Nieddu, M., Pinna, M. V., Sirca, C., Spano, D., Roggero, P. P., Garau, G., & Castaldi, P.** (2024). Using biochar for environmental recovery and boosting the yield of valuable non-food crops: The case of hemp in a soil contaminated by potentially toxic elements (PTEs). *Heliyon*, 10(6), e28050.
<https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2024.E28050>
- Gopinath, A., Divyapriya, G., Srivastava, V., Laiju, A. R., Nidheesh, P. V., & Kumar, M. S.** (2021). Conversion of sewage sludge into biochar: A potential resource in water and wastewater treatment. *Environmental Research*, 194, 110656.
<https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2020.110656>

- Gutiérrez, J., Pérez, J. F., & Rubio Clemente, A.** (2021). *Biocarbón derivado de pellets de Pinus patula para la enmienda de suelos degradados*.
<https://dspace.tdea.edu.co/handle/tdea/4859>
- Hamissou, I. G. M., Appiah, K. E. K., Sylvie, K. A. T., Ousmaila, S. M., Casimir, B. Y., & Benjamin, Y. K.** (2023). Valorization of cassava peelings into biochar: Physical and chemical characterizations of biochar prepared for agricultural purposes. *Scientific African*, 20, e01737.
<https://doi.org/10.1016/J.SCIAF.2023.E01737>
- He, D., Luo, Y., & Zhu, B.** (2024). Feedstock and pyrolysis temperature influence biochar properties and its interactions with soil substances: Insights from a DFT calculation. *Science of The Total Environment*, 922, 171259.
<https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2024.171259>
- Idbella, M., Baronti, S., Giagnoni, L., Renella, G., Becagli, M., Cardelli, R., Maienza, A., Vaccari, F. P., & Bonanomi, G.** (2024). Long-term effects of biochar on soil chemistry, biochemistry, and microbiota: Results from a 10-year field vineyard experiment. *Applied Soil Ecology*, 195, 105217.
<https://doi.org/10.1016/J.APSOIL.2023.105217>
- Irfan, M., Ishaq, F., Muhammad, D., Khan, M. J., Mian, I. A., Dawar, K. M., Muhammad, A., Ahmad, M., Anwar, S., Ali, S., Khan, F. U., Khan, B., Bibi, H., Kamal, A., Musarat, M., Ullah, W., & Saeed, M.** (2021). Effect of wheat straw derived biochar on the bioavailability of Pb, Cd and Cr using maize as test crop. *Journal of Saudi Chemical Society*, 25(5), 101232.
<https://doi.org/10.1016/J.JSCS.2021.101232>
- James, A., Sánchez, A., Prens, J., & Yuan, W.** (2022). Biochar from agricultural residues for soil conditioning: Technological status and life cycle assessment. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 25, 100314.
<https://doi.org/10.1016/J.COESH.2021.100314>
- Jat Baloch, M. Y., Zhang, W., Sultana, T., Akram, M., Shoumik, B. A. Al, Khan, M. Z., & Farooq, M. A.** (2023). Utilization of sewage sludge to manage saline-alkali soil and increase crop production: Is it safe or not? *Environmental Technology & Innovation*, 32, 103266.
<https://doi.org/10.1016/J.ETI.2023.103266>
- Jiang, K., Teuling, A. J., Chen, X., Huang, N., Wang, J., Zhang, Z., Gao, R., Men, J., Zhang, Z., Wu, Y., Cai, L., Huang, Z., Ma, Z., & Pan, Z.** (2024). Global land degradation hotspots based on multiple methods and indicators. *Ecological Indicators*, 158, 111462.
<https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2023.111462>
- Jiang, Z., Yang, S., Pang, Q., Xu, Y., Chen, X., Sun, X., Qi, S., & Yu, W.** (2021). Biochar improved soil health and mitigated greenhouse gas emission from controlled irrigation paddy field: Insights into microbial diversity. *Journal of Cleaner Production*, 318, 128595.
<https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.128595>

- Joseph, S., Cowie, A. L., van Zwieten, L., Bolan, N., Budai, A., Buss, W., Cayuela, M. L., Graber, E. R., Ippolito, J. A., Kuzakov, Y., Luo, Y., Ok, Y. S., Palansooriya, K. N., Shepherd, J., Stephens, S., Weng, Z., & Lehmann, J. (2021). How biochar works, and when it doesn't: A review of mechanisms controlling soil and plant responses to biochar. *GCB Bioenergy*, 13(11), 1731-1764.
<https://doi.org/10.1111/GCBB.12885>
- Kalu, S., Simojoki, A., Karhu, K., & Tammeorg, P. (2021). Long-term effects of softwood biochar on soil physical properties, greenhouse gas emissions and crop nutrient uptake in two contrasting boreal soils. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 316, 107454.
<https://doi.org/10.1016/J.AGEE.2021.107454>
- Khan, Z., Zhang, K., Khan, M. N., Zhu, K., & Hu, L. (2024). Effects of biochar persistence on soil physiochemical properties, enzymatic activities, nutrient utilization, and crop yield in a three-year rice-rapeseed crop rotation. *European Journal of Agronomy*, 154, 127096.
<https://doi.org/10.1016/J.EJA.2024.127096>
- Lishan, T., & Alemu, F. (2024). Elucidating sole application of farmyard manure and blended NPSB fertilizer effects on soil properties at Bench Shako and West Omo zone, South West Ethiopia. *Heliyon*, 10(1), e22908.
<https://doi.org/10.1016/J.HELİYON.2023.E22908>
- Liu, C., Tian, J., Chen, L., He, Q., Liu, X., Bian, R., Zheng, J., Cheng, K., Xia, S., Zhang, X., Wu, J., Li, L., Joseph, S., & Pan, G. (2024a). Biochar boosted high oleic peanut production with enhanced root development and biological N fixation by diazotrophs in a sand-loamy Primisol. *Science of The Total Environment*, 932, 173061.
<https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2024.173061>
- Liu, C., Xia, R., Tang, M., Chen, X., Zhong, B., Liu, X., Bian, R., Yang, L., Zheng, J., Cheng, K., Zhang, X., Drosos, M., Li, L., Shan, S., Joseph, S., & Pan, G. (2022). Improved ginseng production under continuous cropping through soil health reinforcement and rhizosphere microbial manipulation with biochar: a field study of Panax ginseng from Northeast China. *Horticulture Research*, 9, uhac108.
<https://doi.org/10.1093/HR/UHAC108>
- Liu, Y., Jiang, W., Zhao, W., Xu, L., Wang, M., Jian, J., Chen, X., Wang, E., & Yan, J. (2024b). Effects of biochar application on soil properties and the growth of *Melissa officinalis* L. under salt stress. *Scientia Horticulturae*, 338, 113704.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113704>
- Livia, W. P., & Suárez, N. F. M. (2021). Biocarbon from pruning and gardening residues on the Santander University campus, using a pyrolysis system with minimal gas emission. *Journal of Sustainability Perspectives*, 1(2), 117-121.
<https://doi.org/10.14710/JSP.2021.11750>
- Li, Z., Zheng, Z., Li, H., Xu, D., Li, X., Xiang, L., & Tu, S. (2023). Review on Rice Husk Biochar as an Adsorbent for Soil and Water Remediation. *Plants*, 12(7), 1524.
<https://doi.org/10.3390/PLANTS12071524>

- Lozano, H. A. M., & Afanasjeva, N.** (2023). Efecto de la aplicación de biochar en la actividad microbiana en suelos: Revisión. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 21(2), 193-209.
<https://doi.org/10.18684/RBSAA.V21.N2.2023.2197>
- Luna-Robles, E. O., Cantú-Silva, I., González-Rodríguez, H., Marmolejo-Monsiváis, J., Yáñez-Díaz, M. I., Hernández, F. J., & Béjar-Pulido, S. J.** (2021). Effects of forest management on the physical and hydrological properties of an Umbri-sol in the Sierra Madre Occidental. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 27(1), 19-32.
<https://doi.org/10.5154/R.RCHSCFA.2019.11.085>
- Manka'abusi, D., Zongo, N., Lompo, D. J. P., Steiner, C., Marschner, B., & Buerkert, A.** (2024). Soil properties and ag-ro-nomic effects of repeated biochar amendment and fertilization in an urban horticultural system of Burkina Faso. *European Journal of Agronomy*, 159, 127234.
<https://doi.org/10.1016/J.EJA.2024.127234>
- Ma, R., Wu, X., Liu, Z., Yi, Q., Xu, M., Zheng, J., Bian, R., Zhang, X., & Pan, G.** (2023). Biochar improves soil organic car-bon stability by shaping the microbial community structures at different soil depths four years after an incorpora-tion in a farmland soil. *Current Research in Environmental Sustainability*, 5, 100214.
<https://doi.org/10.1016/J.CRSUST.2023.100214>
- Middelanis, T.** (2019). El biocarbón aplicado al suelo retiene agua y nutrientes en los valles interandinos del Departamen-to de Cochabamba, Bolivia. *Acta Nova*, 9(3), 429-449.
http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1683-07892019000300007&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Mohan, D., Preetiva, B., Chaubey, A. K., Singsit, J. S., Mina, U., & Pittman Jr., C. U.** (2024). Eggplant growth in wheat straw-, wheat straw biochar- and compost-amended soils: a field study of CO₂ emission dynamics, soil physicoche-mical, microbial, and nutrient effects. *Waste Management Bulletin*, 1(4), 143-157.
<https://doi.org/10.1016/J.WMB.2023.10.004>
- Nsengimana, V., de Dieu Nsenganeza, J., Hagenimana, T., & Dekoninck, W.** (2023). Impact of chemical fertilizers on di-versity and abundance of soil-litter arthropod communities in coffee and banana plantations in southern Rwanda. *Current Research in Environmental Sustainability*, 5, 100215.
<https://doi.org/10.1016/J.CRSUST.2023.100215>
- Orozco Gutiérrez, G., Medina Telez, L., Elvira Espinosa, A., Cervantes Preciado, J. F., Orozco Gutiérrez, G., Medina Telez, L., Elvira Espinosa, A., & Cervantes Preciado, J. F.** (2021). Biocarbón de bambú como mejorador de la fertilidad del suelo en caña de azúcar. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 12(65), 67-88.
<https://doi.org/10.29298/RMCF.V12I65.780>
- Osinuga, O. A., Aduloju, A. B., & Oyegoke, C. O.** (2023). Impact of agrochemicals application on soil quality indicators and trace elements level of wetlands under different uses. *Journal of Trace Elements and Minerals*, 5, 100090.
<https://doi.org/10.1016/J.JTEMIN.2023.100090>

- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Alonso-Fernández, S. (2021). Declaración PRISMA 2020: una guía actualizada para la publicación de revisiones sistemáticas. *Revista Española de Cardiología*, 74(9), 790-799.
<https://doi.org/10.1016/j.recesp.2021.06.016>
- Pérez-Cabrera, C. A., Juárez-Lopez, P., Anzaldo-Hernández, J., Alia-Tejagal, I., Salcedo-Pérez, E., & Balois-Morales, R. (2021). Beneficios potenciales del biocarbón en la productividad de cultivos agrícolas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(4), 713-725.
<https://doi.org/10.29312/REMEXCA.V12I4.2542>
- Pérez-Cabrera, C. A., Juárez-López, P., Anzaldo-Hernández, J., Alia-Tejagal, I., Valdez-Aguilar, L. A., Alejo-Santiago, G., Castro-Brindis, R., López-Martínez, V., & Alvarado-Camarillo, D. (2022). Biocarbón de ápices de caña de azúcar como enmienda de suelo para el cultivo de *Ocimum basilicum* var. *thyrsiflora* en invernadero. *Terra Latinoamericana*, 40, 1077.
<https://doi.org/10.28940/TERRA.V40I0.1077>
- Puentes-Escobar, T. C., Rodríguez-Carlosama, A., & López, C. A. (2022). Effect of biochar use as a substrate on granadilla (*Passiflora ligularis* Juss.) growth parameters. *Agronomía Colombiana*, 40(1), 22-28.
<https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v40n1.98112>
- Purkaystha, J., Prasher, S., Afzal, M. T., Nzediegwu, C., & Dhiman, J. (2022). Wheat straw biochar amendment significantly reduces nutrient leaching and increases green pepper yield in a less fertile soil. *Environmental Technology & Innovation*, 28, 102655.
<https://doi.org/10.1016/J.ETI.2022.102655>
- Rathnayake, D., Schmidt, H. P., Leifeld, J., Mayer, J., Epper, C. A., Bucheli, T. D., & Hagemann, N. (2023). Biochar from animal manure: A critical assessment on technical feasibility, economic viability, and ecological impact. *GCB Bioenergy*, 15(9), 10781104.
<https://doi.org/10.1111/GCBB.13082>
- Rijk, I., Ekblad, A., Dahlin, A. S., Enell, A., Larsson, M., Leroy, P., Kleja, D. B., Tiberg, C., Hallin, S., & Jones, C. (2024). Biochar and peat amendments affect nitrogen retention, microbial capacity and nitrogen cycling microbial communities in a metal and polycyclic aromatic hydrocarbon contaminated urban soil. *Science of The Total Environment*, 936, 173454.
<https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2024.173454>
- Saharudin, D. M., Jeswani, H. K., & Azapagic, A. (2024). Biochar from agricultural wastes: Environmental sustainability, economic viability and the potential as a negative emissions technology in Malaysia. *Science of The Total Environment*, 919, 170266.
<https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2024.170266>

- Samaniego, J., Schmidt, K.-U., Carlino, H., Caratori, L., Carlino, M., Gogorza, A., Rodríguez, A., Gabriel, V., Amábile, V., Harrison, N., Hassan, A., & Thompson, M. (2020). *Current understanding of the potential impact of carbon dioxide removal approaches on the Sustainable Development Goals in selected countries in Latin America and the Caribbean*. ECLAC.
- Sánchez-Reinoso, A. D., Ávila-Pedraza, E. A., Restrepo-Díaz, H., Sánchez-Reinoso, A. D., Ávila-Pedraza, E. A., & Restrepo-Díaz, H. (2020). Use of biochar in agriculture. *Acta Biológica Colombiana*, 25(2), 327-338.
<https://doi.org/10.15446/ABC.V25N2.79466>
- Sharma, P., Abrol, V., Nazir, J., Samnotra, R. K., Gupta, S. K., Anand, S., Biswas, J. K., Shukla, S., & Kumar, M. (2025). Optimizing soil properties, water use efficiency, and crop yield through biochar and organic manure integration in organic soil. *Journal of Environmental Management*, 373, 123673.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123673>
- Singh Yadav, S. P., Bhandari, S., Bhatta, D., Poudel, A., Bhattarai, S., Yadav, P., Ghimire, N., Paudel, P., Paudel, P., Shrestha, J., & Oli, B. (2023). Biochar application: A sustainable approach to improve soil health. *Journal of Agriculture and Food Research*, 11, 100498.
<https://doi.org/10.1016/J.JAFR.2023.100498>
- Si, Y., Ma, Y., Chen, H., Ge, F., Ma, H., Gao, R., Yin, Y., & Merder, J. (2024). Biochar mediates nitrogen investment strategy involved in Chinese fir growth as revealed by molecular information on soil dissolved organic matter. *Geoderma*, 443, 116822.
<https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2024.116822>
- Tan, M. (2023). Conversion of agricultural biomass into valuable biochar and their competence on soil fertility enrichment. *Environmental Research*, 234, 116596.
<https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2023.116596>
- Urra Ibáñez de Sendadiano, J. (2020). *Beneficios y riesgos de la aplicación de enmiendas orgánicas sobre la salud de suelos agrícolas*.
<http://addi.ehu.es/handle/10810/50205>
- Xu, W., Xie, X., Li, Q., Yang, X., Ren, J., Shi, Y., Liu, D., Shaheen, S. M., & Rinklebe, J. (2024). Biochar co-pyrolyzed from peanut shells and maize straw improved soil biochemical properties, rice yield, and reduced cadmium mobilization and accumulation by rice: Biogeochemical investigations. *Journal of Hazardous Materials*, 466, 133486.
<https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2024.133486>
- Xu, Z., Lin, Y., Lin, Y., Yang, D., & Zheng, H. (2021). Adsorption behaviors of paper mill sludge biochar to remove Cu, Zn and As in wastewater. *Environmental Technology & Innovation*, 23, 101616.
<https://doi.org/10.1016/J.ETI.2021.101616>

Zang, Y., Wang, M., Shohag, M. J. I., Lu, L., He, T., Liao, C., Zhang, Z., Chen, J., You, X., Zhao, Y., Wei, Y., & Tian, S. (2023). Biochar performance for preventing cadmium and arsenic accumulation, and the health risks associated with mustard (*Brassica juncea*) grown in co-contaminated soils. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 263, 115216.

<https://doi.org/10.1016/J.ECOENV.2023.115216>

Zhang, M., Zhang, L., Riaz, M., Xia, H., & Jiang, C. (2021). Biochar amendment improved fruit quality and soil properties and microbial communities at different depths in citrus production. *Journal of Cleaner Production*, 292, 126062.

<https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.126062>

Zhang, X., Zhao, B., Liu, H., Zhao, Y., & Li, L. (2022). Effects of pyrolysis temperature on biochar's characteristics and speciation and environmental risks of heavy metals in sewage sludge biochars. *Environmental Technology & Innovation*, 26, 102288.

<https://doi.org/10.1016/J.ETI.2022.102288>

