

Evolución y Tendencias en la Investigación sobre Biocarbón: Un Análisis Bibliométrico Evolution and Trends in Biochar Research: A Bibliometric Analysis

Jahaziel Saucedo-Ibarra¹ , Alejandra Sahagún-García^{1†} , Venancio Cuevas-Reyes³ ,
Diana Ayala-Montejo² , Julio Baca-del Moral¹ y Joel Pérez-Nieto¹

¹ Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Fitotecnia. Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo. 56230 Texcoco, Estado de México, México; (J.S.I.), (A.S.G.), (J.B.M.), (J.P.N.).

² El Colegio de la Frontera Sur. Carretera a Reforma, km 15.5 s/n Ra, Guineo 2da. Sección. 86280 Villahermosa, Tabasco, México; (D.A.M.).

³ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Carretera Los Reyes-Texcoco km 13.5, Coatlinchán. 56250 Texcoco, Estado de México, México; (V.C.R.).

[†] Autora para correspondencia: asahagung@chapingo.mx

RESUMEN

Se requieren tecnologías sostenibles como el biocarbón para mejorar la salud del suelo, mitigar emisiones de gases de efecto invernadero e incrementar el carbono orgánico del suelo y la productividad. Globalmente hay abundantes investigaciones sobre biocarbón, pero son escasas en México, por lo que se requiere identificar tendencias científicas internacionales para aplicación local. El objetivo del estudio consistió en analizar la evolución temporal y las tendencias actuales en la investigación científica sobre biocarbón, en especial su elaboración, aplicación y aportes a la sostenibilidad a nivel global mediante un enfoque bibliométrico de 2007 a 2022. Se realizó una búsqueda en Scopus sobre elaboración, aplicación y sostenibilidad de este material, filtrando por tipo de documento, área temática y etapa de publicación. Se analizaron 1932 documentos mediante indicadores bibliométricos con bibliometrix y VOSviewer. Se encontró un aumento exponencial de investigaciones sobre biocarbón desde 2007. Destacan China y Estados Unidos como los países más productivos. Las revistas con mayor cantidad de artículos fueron *Agronomy* y *Biomass and Bioenergy*. Las afiliaciones con más publicaciones fueron la Universidad Agrícola de Nanjing y la Northwest A&F University de China. Entre las tendencias recientes en investigación sobresalen tópicos como captura de carbono, metano, óxido nitroso y metales pesados. El análisis de redes de palabras clave identificó tres grupos temáticos: características y beneficios del biocarbón en suelo, secuestro de gases de efecto invernadero y aspectos sobre su producción. Se requieren investigaciones en campo que permitan evaluar efectos positivos y posibles negativos del biocarbón, para determinar su aplicabilidad en la agricultura considerando aspectos económicos, ambientales y sociales.

Palabras clave: agricultura sostenible, bibliometrix, carbono orgánico, salud del suelo.

SUMMARY

Sustainable technologies such as biochar are required to improve soil health, mitigate greenhouse gas emissions, increase soil organic carbon and productivity. Globally, there is abundant research on biochar, however it is scarce in Mexico, hence, it is necessary to identify international scientific trends for local application. The aim of our study was to analyze the temporal evolution and current trends in scientific research on biochar, especially its development, application and contributions to sustainability at a global level through a bibliometric approach from 2007 to 2022.



Cita recomendada:

Saucedo-Ibarra, J., Sahagún-García, A., Cuevas-Reyes, V., Ayala-Montejo, D., Baca-del Moral, J., & Pérez-Nieto, J. (2025). Evolución y Tendencias en la Investigación sobre Biocarbón: Un Análisis Bibliométrico. *Terra Latinoamericana*, 43, 1-12. e2147. <https://doi.org/10.28940/terra.v43i.2147>

Recibido: 31 de octubre de 2024.
Aceptado: 24 de febrero de 2025.
Revisión: Volumen 43.
Agosto de 2025.

Editor de Sección:
Dr. Paul Misael Garza López

Editor Técnico:
Dr. Gerardo Cruz Flores



Copyright: © 2025 by the authors.
Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC ND) License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

A Scopus search was conducted on biochar development, application and sustainability, filtering by document type, subject area and stage of publication. A total of 1932 documents were analyzed using bibliometric indicators with bibliometrix and VOSviewer. An exponential increase in biochar research since 2007 was found. China and the United States stand out as the most productive countries. The journals with the highest number of articles were *Agronomy* and *Biomass and Bioenergy*. The affiliations with the most publications were Nanjing Agricultural University and Northwest A&F University in China. Recent research trends include topics such as carbon sequestration, methane, nitrous oxide and heavy metals. The keyword network analysis identified three thematic groups: characteristics and benefits of biochar in soil, sequestration of greenhouse gases and aspects of biochar production. Field research is needed to evaluate the positive and possible negative effects of biochar in order to determine its applicability in agriculture, taking into account economic, environmental and social aspects.

Index words: *sustainable agriculture, bibliometrix, organic carbon, soil health.*

INTRODUCCIÓN

El discurso prevaleciente sobre el futuro de la agricultura afirma que la producción de alimentos debe aumentar drásticamente, incluso duplicarse hacia 2050 para satisfacer la creciente demanda (Hunter, Smith, Schipanski, Atwood y Mortensen, 2017). Por tal razón se requiere con urgencia una revolución alimentaria mundial basada en un nuevo paradigma para el desarrollo agrícola. Sin este cambio, es poco probable que el mundo logre el objetivo doble de alimentar a la humanidad y vivir dentro de los límites de los procesos biofísicos que definen el espacio operativo seguro para mantener un sistema terrestre resiliente (Steffen *et al.* 2015)

En este sentido, la degradación del suelo debido a la actividad agrícola intensiva y las condiciones climáticas cambiantes ponen en peligro la seguridad alimentaria. Por ello, se requiere el desarrollo de tecnologías novedosas y sostenibles que mejoren la salud y resiliencia del suelo (Gisladdottir y Stocking, 2005; Novak *et al.*, 2016). La aplicación de biocarbón a los suelos tiene efectos en numerosas características físicas como la porosidad, la textura, la profundidad, la estructura, el área superficial, la distribución del tamaño de las partículas y la densidad aparente, lo cual tiene una influencia positiva en la disponibilidad de agua y la aireación en las zonas de raíces que sustentan el crecimiento de las plantas (Chan, Van-Zwieten, Meszaros, Downie y Joseph, 2008; Burrell, Zehetner, Rampazzo, Wimmer y Soja, 2016).

El metano (CH_4), el óxido nitroso (N_2O) y el dióxido de carbono (CO_2) son los tres principales gases de efecto invernadero (GEI) emitidos por los suelos agrícolas. El biocarbón tiene un gran potencial en la mitigación de las emisiones de GEI de los suelos agrícolas y, por lo tanto, en la mitigación del calentamiento global (Mukherjee y Lal, 2013). A diferencia de los materiales orgánicos no pirolizados, como los residuos vegetales y los abonos verdes, el biocarbón es resistente a la descomposición microbiana debido a su estructura química de carbono aromática recalcitrante, que aumenta el contenido de carbono orgánico del suelo (COS) al persistir en el suelo durante 100 a 1000 años (Matušík, Hnátková y Kočí, 2020).

El aumento en el costo de los insumos, principalmente el de los fertilizantes que representan entre el 40 y 50% de los costos totales, ha hecho que el proceso de producción de la agricultura campesina en México atraviese desde hace algunas décadas una situación complicada (Martínez-Reyes *et al.*, 2018). Aunque gran parte del desarrollo de las tecnologías para el cultivo de maíz durante la Revolución Verde se realizaron en México, los rendimientos de este cereal en el país, se han mantenido rezagados respecto a otros países (Cadet-Díaz y Guerrero-Escobar, 2018). Por ello, es necesario promover el uso y la implementación de insumos que sean producto de una economía circular y que promuevan eficazmente el incremento en productividad. Al respecto, se han hecho algunos trabajos sobre la aplicación de biocarbón en maíz en México con resultados prometedores (Mondragón-Sánchez, Medina-Orozco, Sánchez-Duque y Núñez, 2021).

Los trabajos sobre biocarbón a nivel mundial son abundantes (Ahmed, Vanga y Raghavan, 2018). En México, se han realizado algunos trabajos, pero aún falta información que permita identificar el impacto potencial en la producción y salud del suelo, por lo que se requiere investigar las tendencias científicas globales sobre este tema para aplicarlas a nivel local. Por ello, este trabajo tiene como objetivo analizar la evolución temporal y las

tendencias actuales en la investigación científica sobre biocarbón, en especial su elaboración, aplicación y aportes a la sostenibilidad mediante un enfoque bibliométrico. La hipótesis que se plantea es que la investigación sobre biocarbón ha experimentado un aumento significativo en las últimas décadas, reflejando un creciente interés en esta tecnología como solución sostenible en la agricultura, que se refleja en la existencia de un grupo selecto de autores e instituciones que lideran la investigación sobre biocarbón.

DESARROLLO DEL TEMA

Recopilación de Información

Se realizó una búsqueda bibliométrica durante la segunda semana de diciembre de 2023 en la que se utilizó la base de datos de Scopus, con palabras clave en inglés, enfocada en título, resumen y palabras clave del autor, relacionadas con la elaboración, aplicación y sostenibilidad del biocarbón. El código utilizado fue TITLE-ABS-KEY ("biochar" elaboration OR "biochar" application OR "biochar" sustainability OR "biochar" production) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA, "AGRI")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, "ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE, "re")) AND (LIMIT-TO (PUBSTAGE, "final")) AND (LIMIT-TO (SRCTYPE, "j")). Se aplicaron filtros a la búsqueda para limitarla a artículos científicos y de revisión en el área de ciencias en agricultura y biología publicados.

Análisis de Datos

En primer lugar, se determinaron los indicadores bibliométricos para el análisis de los datos (Cuadro 1). Después, se realizó un análisis clúster utilizando el software VOSviewer (Van Eck y Waltman, 2023), con la técnica bibliométrica de co-ocurrencias. Esta técnica es una de las opciones de análisis con las que cuenta este software, en la que se identifica la frecuencia con la que dos o más términos aparecen juntos en los documentos explorados (Van Eck y Waltman, 2023).

Posteriormente, se utilizaron todas las palabras clave como unidad de análisis y se aplicó un conteo total de las mismas. El número mínimo de ocurrencias de una palabra clave para ser tomada en cuenta en el análisis fue de 60, esto para permitir una clara visualización de las palabras en el mapa. De la lista de 46 palabras clave que resultaron, se descartaron cuidadosamente palabras que no estuvieran en concordancia con este estudio, tales como nombres de países y sustantivos considerados irrelevantes. También se realizó un análisis con VOSviewer para determinar los países con mayor productividad de artículos sobre el tema de biocarbón (Figura 1). Para ello, se empleó la citación por países dentro de la interfaz y se tomaron en cuenta países con 30 o más publicaciones.

Finalmente, se analizó la base de datos de Scopus en bibliometrix (Aria y Cuccurullo, 2017), el cual es una herramienta del paquete estadístico R v. 4.3.0 (R Core Team, 2023). Este software se utilizó para obtener estadísticos descriptivos e información básica sobre el conjunto de datos como número de publicaciones y tipo, países, autores, las principales afiliaciones y revistas, así como las relaciones entre ellos de manera gráfica.

DISCUSIÓN

A partir de la búsqueda en Scopus se encontraron 1932 documentos, de los cuales se presentan los estadísticos descriptivos en el Cuadro 2. Se encontraron artículos y revisiones en nueve idiomas: chino, inglés, francés, alemán, húngaro, coreano, persa, portugués y español.

Cuadro 1. Indicadores analizados.
Table 1. Analyzed indicators.

Indicador	Descripción
Número de documentos	Número de artículos científicos y de revisión en Scopus
Idioma	Idioma de la publicación
Número de publicaciones por año	Número de artículos publicados en el período de un año
Número de publicaciones por países	Número de artículos y revisiones dentro del período de un año

Cuadro 2. Descripción general de los artículos analizados.
Table 2. General description of the analyzed papers.

Característica	Resultado
Período de documentos	2007 a 2022
Artículos científicos	1753
Revisiones	179
Fuentes (revistas)	379
Autores	6670
Co-autores por documento	5.57
Idiomas	9

Producción de Artículos sobre Biocarbón por Países, Autores, Revistas y Universidades

En cuanto a la producción anual total, se puede observar un incremento en forma exponencial en la publicación de artículos y revisiones sobre esta temática (Figura 1). Es de especial interés que los primeros artículos sobre el biocarbón son relativamente recientes (alrededor de 2007), por lo que es relevante la atención que le ha dado la comunidad científica a este material en tan corto tiempo. En México se registran 8 publicaciones para el mismo periodo, en años recientes (2015 a 2021).

El hecho de que los primeros artículos se hayan publicado alrededor de 2007 indica que el biocarbón es un área emergente en la ciencia agrícola. Esto supone una oportunidad para incentivar su investigación y muestra la necesidad de validar estas investigaciones en estudios de campo para evaluar su viabilidad a gran escala.

Aunque en México, el número de publicaciones es limitado, algunos estudios recientes, como el de Mondragón-Sánchez *et al.* (2021), muestra resultados prometedores en la aplicación del biocarbón en el cultivo de maíz, lo que abre la puerta a su implementación en otros cultivos de la agricultura mexicana.

También se analizó el origen de los artículos por países. Los 15 países con mayor producción de trabajos relacionados con el biocarbón se pueden observar en la Figura 2, entre ellos destacan China y Estados Unidos como líderes en publicaciones sobre esta temática. Esto es consistente con el estudio de Pérez-Cabrera *et al.* (2021), quienes también observan que estos países han sido pioneros en la investigación sobre los beneficios del biocarbón en la agricultura y su rol en la mitigación del cambio climático. Se destaca que, además de liderar la producción de artículos sobre biocarbón, China también sobresale por su elevada colaboración internacional, lo que pone de manifiesto su cooperación global a este campo de investigación.

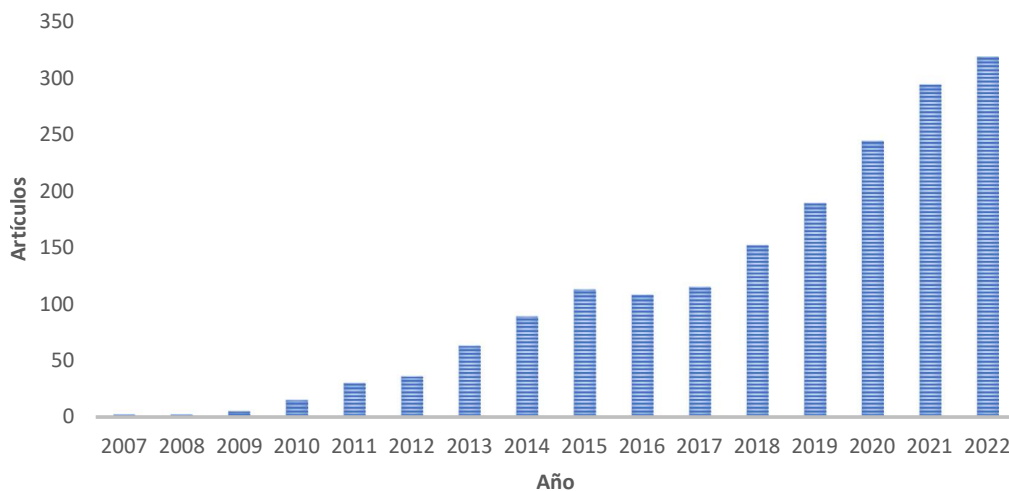


Figura 1. Producción anual de trabajos sobre biocarbón a nivel global durante el periodo 2007-2022.
Figure 1. Annual production of biochar papers globally during the period 2007-2022.

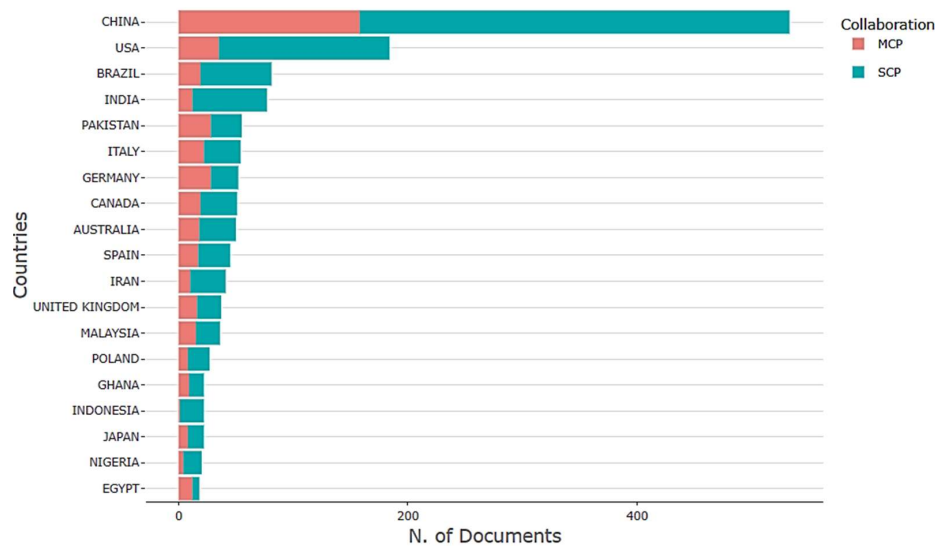


Figura 2. Productividad de trabajos sobre la producción, aplicación y sostenibilidad en biocarbón por países. SCP = publicación de un solo país; MCP = publicación de varios países.
Figure 2. Productivity of works on biochar production, application and sustainability by country. SCP = single-country publication; MCP = multi-country publication.

Lo anterior indica que México, al igual que otros países con una producción limitada de investigaciones, podría beneficiarse de las colaboraciones internacionales y transferir tecnología con base en los estudios realizados en estos países líderes. La transferencia de estos conocimientos podría facilitar la implementación de prácticas agrícolas más sostenibles a nivel local, especialmente en las zonas rurales donde la producción agrícola es la principal fuente de ingresos para los campesinos.

Con la finalidad de observar la interacción entre los 10 autores más productivos del mundo, las 10 palabras clave más utilizadas y los 10 países con mayor cantidad de trabajos sobre la elaboración, aplicación y sostenibilidad del biocarbón, se elaboró un diagrama de Sankey (en el que se destaca la métrica con base en autores). En la Figura 3 se presenta este análisis y se puede observar que los 10 autores representados son de origen chino. Esto indica el alto grado de interés que esa nación le otorga a la investigación sobre el uso de bioinsumos agrícolas como el biocarbón. Sin embargo, también muestra que es un campo de interés global, pues hay contribuciones significativas de otras naciones como Estados Unidos, Australia, Alemania e India.

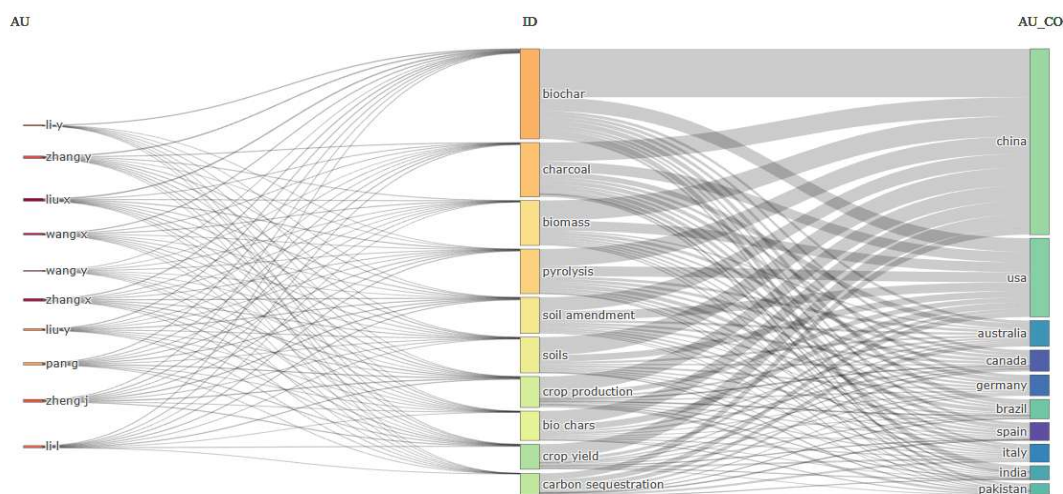


Figura 3. Relación entre los diez principales autores, palabras clave y países en trabajos sobre la elaboración, aplicación y sostenibilidad del uso de biocarbón. AU = autores; ID = palabras clave; AU_CO = países.
Figure 3. List of the top ten authors, keywords and countries in papers on the development, application and sustainability of biochar. AU = authors; ID = keywords; AU_CO = countries.

La posibilidad de la colaboración estrecha en esta área, abre la posibilidad de replicar la investigación en otros países. Al aplicar un enfoque en la adopción de biocarbón a nivel rural, la colaboración internacional puede facilitar la formación de capacidades locales y permitir a los agricultores acceder a tecnologías y conocimientos que ya han mostrado resultados positivos en otros contextos. En este sentido, los investigadores en otros países pueden aprender de los éxitos y fracasos de China, como líder en esta área, y adaptarlos a sus propias necesidades. La posibilidad de colaboración internacional queda reflejada por la conexión entre los autores chinos y los países que también están haciendo contribuciones, lo que indica un intercambio de conocimientos y experiencias.

Se identificaron las revistas con mayor cantidad de aportaciones sobre la temática bajo análisis (Figura 4). En este sentido, destacan dos revistas en particular, *Agronomy* y *Biomass and Bioenergy*, las cuales suman 204 artículos. Ambas revistas son de acceso abierto. El factor de impacto de estas revistas es de 3.3 y 5.8 respectivamente, lo que las posiciona como fuentes relevantes y de creciente influencia en el campo del biocarbón. En el caso de la revista *Biochar*, la cual aparece en la tercera posición en número de artículos para el mismo periodo de tiempo, nació como una revista especializada que aborda la temática relacionada con el biocarbón y va de la mano con la tendencia de investigación de este material a nivel global. Con un factor de impacto de 13.1, *Biochar* se destaca como una de las publicaciones más prestigiosas en este ámbito, lo que refuerza la importancia de los artículos publicados en ella para el avance científico en la aplicación y sostenibilidad del biocarbón.

Es relevante destacar que todas estas revistas son de acceso abierto, lo que favorece la difusión global del conocimiento, esto permite que investigadores de todo el mundo accedan sin restricciones a las últimas investigaciones sobre biocarbón. Este acceso libre puede contribuir a una mayor colaboración internacional y acelerar los avances en la ciencia aplicada en este campo de estudio.

Las afiliaciones de los autores o universidades, que están detrás de las investigaciones en esta temática, son principalmente de origen chino. La Universidad Agrícola de Nanjing es la afiliación con mayor número de artículos publicados, seguida por la también china Northwest A&F University (Figura 5). Este enfoque académico que se centra en ciertos países hace ver la necesidad de identificar las mejores fuentes y colaborar con instituciones de vanguardia. Para los investigadores y profesionales en otras naciones, como México, este resultado revela que es importante fortalecer las relaciones con estas instituciones a través de intercambios académicos y proyectos conjuntos. Esto podría facilitar el acceso a las últimas investigaciones sobre biocarbón, además de promover la implementación de prácticas y tecnologías avanzadas en el contexto agrícola nacional.

Evolución y Tendencias de Investigación sobre Biocarbón

Pérez-Cabrera *et al.* (2021) señalan en un estudio previo sobre el estado del arte del biocarbón que “la mayoría de los estudios han reportado efectos positivos en el crecimiento y rendimiento de los cultivos agrícolas, y que es necesario incrementar las investigaciones de biocarbón elaborado con biomasa vegetal y materiales orgánicos de disponibilidad local”. Sin embargo, no se abordan tendencias futuras de investigación sobre el tema.

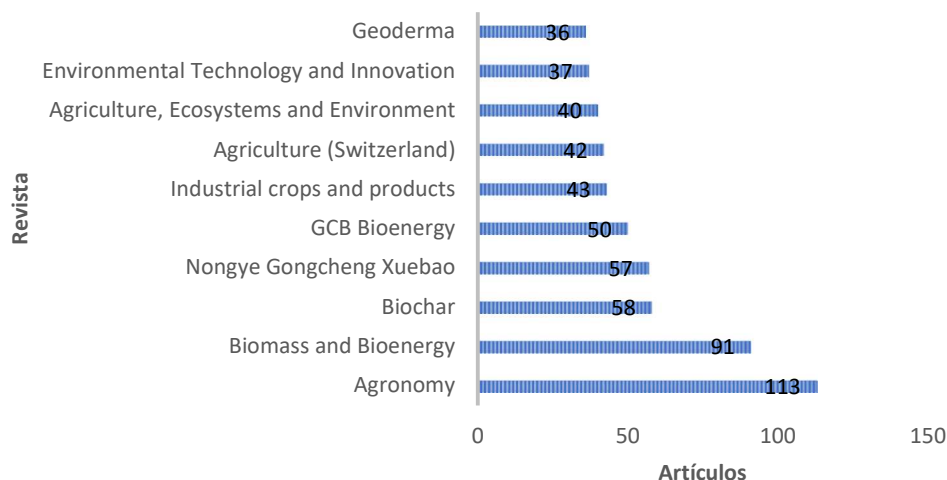


Figura 4. Las diez principales revistas que publicaron sobre la elaboración, aplicación y sostenibilidad del biocarbón.

Figure 4. Top ten journals that have published papers on biochar development, application and sustainability.

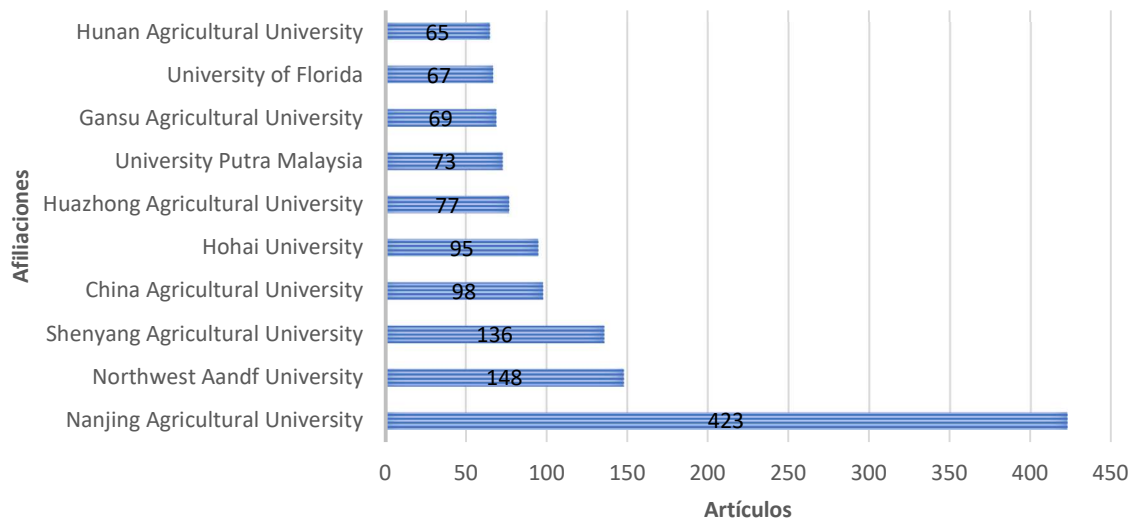


Figura 5. Las diez principales afiliaciones de los autores que han escrito trabajos sobre el tema tratado, por número de documentos publicados.

Figure 5. Top ten affiliations of authors who have written papers on the subject, by number of papers published.

La Figura 6 muestra un gráfico con las palabras clave más frecuentemente usadas junto con "biocarbón" en los últimos cinco años, la cual puede servir como guía a los investigadores relacionados con esta temática. Entre las más recientes están: "cadmio", "digestión anaeróbica", "metales pesados" y "propiedades fisicoquímicas".

El análisis de tendencias de frecuencia en las palabras clave señala un incremento en el número de líneas emergentes de investigación, debido a la búsqueda de soluciones sostenibles ante la creciente preocupación por el ambiente.

La tendencia en el uso de la palabra clave "propiedades fisicoquímicas" muestra un enfoque hacia la optimización de este material, especialmente para aplicaciones en los sectores ambiental y agrícola, en los últimos años (Qi *et al.*, 2024). Se están investigando las propiedades físico-químicas del biocarbón, las cuales dependen del tipo de biomasa y la temperatura de pirólisis, que influyen en su contenido de carbono, superficie específica y capacidad de adsorción (Jindo, Mizumoto, Sawada, Sanchez y Sonoki, 2014; Mukome, Zhang, Silva, Six y Parikh, 2013). Además, su estructura porosa (Pituello *et al.*, 2015; Sajjadi, Chen y Egiebor, 2019) y composición química, que incluye grupos funcionales como carboxilos y carbonilos, son esenciales para su capacidad de adsorber nutrientes y contaminantes (Li, Xi, Ding, Han y Wang, 2020), y pueden alterarse por factores ambientales que afectan su eficiencia en aplicaciones agrícolas y ambientales (Sorrenti, Masiello, Dugan y Toselli, 2016).

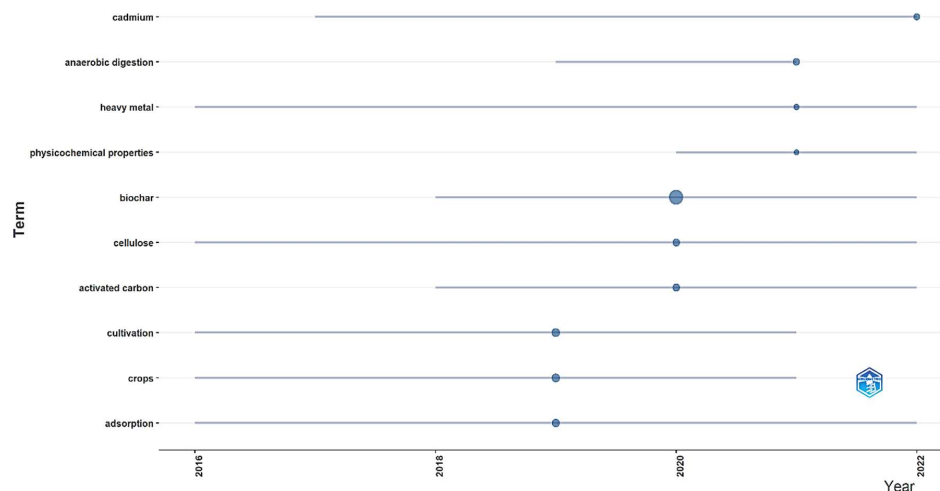


Figura 6. Tendencias de frecuencia en las palabras clave sobre el biocarbón, su elaboración, aplicación y sostenibilidad de 2018 a 2023.

Figure 6. Frequency trends in keywords about biochar, its development, application and sustainability from 2018 to 2023.

Asimismo, las palabras clave “cadmio” y “metales pesados” manifiestan el interés en las propiedades del biocarbón para remediar suelos contaminados, pues su capacidad para adsorber metales pesados se demuestra en trabajos recientes (Lv *et al.*, 2024; Chen *et al.*, 2020). Diversos estudios han explorado cómo el biocarbón puede ser modificado y utilizado para la adsorción de cadmio en soluciones acuosas (Cui *et al.*, 2016; Yuan *et al.*, 2021). Estas investigaciones también exploran la remediación de suelos y aguas contaminadas con cadmio mediante biocarbón modificado. Se está investigando el uso de biocarbón en la remediación de suelos contaminados con metales pesados, ya que puede inmovilizar metales como Pb, Cu y Zn, al reducir su biodisponibilidad y absorción por las plantas (Chen *et al.*, 2018). El biocarbón aumenta el pH del suelo, modifica las fracciones de metales (Zhang *et al.*, 2017) y mejora la adsorción mediante mecanismos químicos como complejación y precipitación (Li, Yu, Liu y Yu, 2021), con su eficiencia influenciada por factores como las propiedades del suelo y el tipo de biocarbón (Yuan *et al.*, 2020).

Además, la palabra clave “digestión anaeróbica” refleja el uso emergente del biocarbón para mejorar la producción de biogás (Hu, Stenchly, Gwenzi, Wachendorf y Kaetzl, 2023). Se ha mostrado que su adición puede aumentar la producción de metano y mejorar la eficiencia del proceso al facilitar la transferencia de electrones (Qiu, Deng, Wang, Davaritouchee y Yao, 2019; Yang, Chen y Wen, 2021). Además, el biocarbón favorece la colonización microbiana, mejora la viabilidad celular y estabiliza el proceso de digestión anaeróbica (Cui *et al.*, 2021; Qi *et al.*, 2021). Esto sugiere que, además de la investigación para mejorar el rendimiento agrícola con el uso de biocarbón, la tendencia de los futuros trabajos debe centrarse en determinar cómo el uso de este material influye en el tratamiento de residuos y la mitigación de contaminantes.

En el análisis con VOSviewer se identificaron tres clústeres: el primero (color rojo) tuvo 15 elementos que incluye al biocarbón como palabra más importante, relacionado con palabras sobre los beneficios de este material en el suelo. El segundo clúster (color verde) las palabras clave relacionadas con los beneficios del biocarbón para la reducción de los gases efecto invernadero, como el secuestro de carbono, metano y óxido nitroso. El tercero (color azul) incorpora palabras relacionadas con la producción y elaboración del biocarbón, desde biomasa, materias primas y la pirólisis (Figura 7).

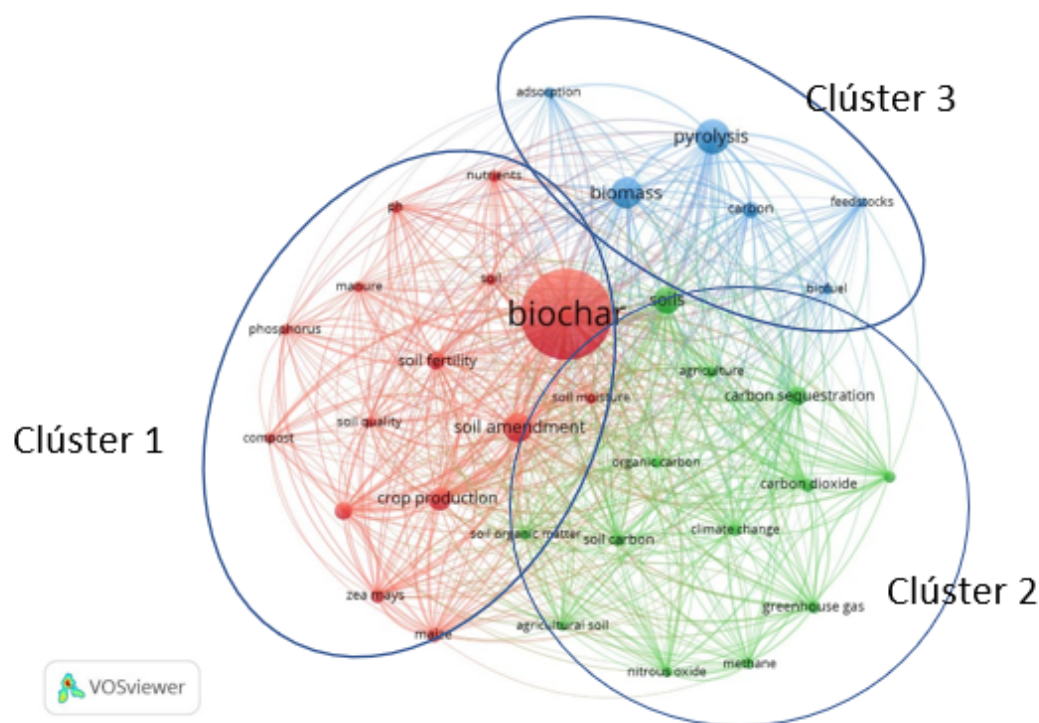


Figura 7. Mapa de la red de co-ocurrencias con 34 términos seleccionados a partir de documentos sobre la elaboración, aplicación y sostenibilidad del biocarbón. VOSviewer (Van Eck y Waltman, 2023).
Figure 7. Co-occurrence network map with 34 terms selected from documents on biochar development, application and sustainability. VOSviewer (Van Eck y Waltman, 2023).

Beneficios del Biocarbón en el Suelo

En lo que respecta al primer clúster (color rojo), Lehmann *et al.* (2011) señalaron los efectos positivos del biocarbón en la biota del suelo, creando un entorno favorable para los organismos. Además, algunos autores señalan que el biocarbón tiene el potencial para rehabilitar suelos agrícolas de baja productividad, promover el secuestro de carbono a largo plazo y reducir la lixiviación de nutrientes, reduciendo así la dependencia de los fertilizantes sintéticos (Lévesque, Oelbermann y Ziadi, 2022).

Por otro lado, Xu, Yang, Ge y Zhou (2022) encontraron que el biocarbón combinado con nitrógeno incide positivamente en las comunidades microbianas de la rizosfera, lo que mejora el crecimiento de las plantas. Además, se ha observado que el biocarbón mejora el contenido de humedad del suelo, la densidad aparente, la disponibilidad de nitrógeno y la disponibilidad de nutrientes esenciales (Kandel, Dahal y Mahatara, 2021). Sin embargo, los beneficios de esta enmienda se ven influidos por factores como la materia prima, las condiciones de pirólisis, las dosis de aplicación y las propiedades del suelo, lo que demuestra la complejidad de las interacciones entre el biocarbón y el suelo (Blanco-Canqui, 2020).

Efecto del Biocarbón en la Reducción de los GEI

En cuanto al segundo clúster (color verde), el biocarbón desempeña un papel importante en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero a través de diversos mecanismos. Esta reducción se atribuye a su capacidad para secuestrar carbono y mejorar la fertilidad del suelo, reduciendo así la liberación de gases de efecto invernadero a la atmósfera (Qi *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2020).

Además, diversos estudios han demostrado que las enmiendas con biocarbón pueden reducir las emisiones totales de gases de efecto invernadero, en particular de óxido nitroso (N_2O), al mejorar las propiedades físicas y químicas del suelo y reducir la intensidad de las emisiones de gases de efecto invernadero por unidad de rendimiento del cultivo (Keith, Singh y Singh, 2011; Kammann, Rondon y Schmidt 2017). Asimismo, se ha demostrado que la aplicación de biocarbón reduce la volatilización de amoníaco, lo que contribuye a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero de los sistemas agrícolas (Schmidt, Hagemann, Draper y Kammann, 2019).

Aunque el biocarbón ha ganado interés por sus beneficios tanto agronómicos como ambientales, aún existen varias áreas que requieren mayor investigación para optimizar su uso y comprender a fondo sus efectos. Se necesita más estudio sobre su papel en la remediación ambiental, particularmente en lo que respecta a la captura de carbono y la mejora de la fertilidad del suelo, así como los posibles riesgos, como la liberación de metales pesados y compuestos orgánicos peligrosos. También es importante investigar cómo interactúa el biocarbón con los microorganismos del suelo y cómo esto influye en la fertilidad (Luo *et al.*, 2022; Wang y Wang, 2019). Otro tema controvertido es el impacto del biocarbón en el ciclo del nitrógeno, por lo que se requieren estudios más prolongados para evaluar su efecto (Ahmad, Mosa, Zhan y Gao, 2021). Finalmente, es necesario avanzar en la caracterización molecular del biocarbón, para facilitar su modelado computacional y entender mejor sus propiedades químicas y físicas (Wood, Mašek y Erastova, 2024).

Métodos para Elaborar Biocarbón

En lo relacionado con el tercer clúster (color azul), el biocarbón se puede producir utilizando diversos métodos que influyen en sus propiedades y capacidades. Las técnicas termoquímicas más comunes para la producción de biocarbón son la pirólisis, la carbonización hidrotérmica, la gasificación, la carbonización flash y la torrefacción (Yaashikaa, Kumar, Varjani y Saravanan, 2020). La pirólisis es uno de los métodos más utilizados y consiste en calentar la materia prima en ausencia de oxígeno, lo que da lugar a su carbonización. La temperatura de pirólisis tiene un efecto significativo en las propiedades del biocarbón, como la estabilidad, el contenido de carbono y sus grupos funcionales (Ronsse, Van-Hecke, Dickinson y Prins, 2012).

El método de la pirólisis lenta y la carbonización hidrotérmica, son técnicas de conversión termoquímica eficientes para producir biocarbón con altos rendimientos de carbono (Praveen, Jegan, Bhagavathi, Gokulan y Bulgariu, 2022). Las tecnologías de producción de biocarbón incluyen la fosa de suelo tradicional, los hornos de tambor cerrados y los hornos de tambor abiertos (Anika *et al.*, 2022). Recientemente, se han empleado tecnologías innovadoras como la pirólisis por microondas y los reactores de calentador rotativo que ofrecen enfoques eficientes para la producción de biocarbón, permitiendo el procesamiento de diferentes materias primas y la creación de biocarbón con propiedades adaptadas (Yaashikaa *et al.*, 2020).

Las tendencias actuales y perspectivas del biocarbón se encuentran enfocadas principalmente a la identificación de los beneficios en la parte de la sostenibilidad de los recursos naturales y efectos positivos ante el cambio climático. Estos resultados soportan el continuo trabajo de buscar métodos para su elaboración mediante diversas formas de producción. Es importante diversificar la investigación para hacer el biocarbón un insumo para un pequeño productor, buscar mecanismos que permitan el uso y la adopción de esta tecnología y evaluar ese proceso de transferencia de tecnología, toda vez que se tienen documentados los beneficios. Entonces resta promover la utilización masiva de este insumo que permita en el mediano y largo plazo, mejorar la salud del suelo y la productividad de los cultivos.

CONCLUSIONES

Existe una tendencia exponencial en la producción de trabajos relacionados con el biocarbón que tuvo un inicio alrededor de 2005, cuando la comunidad científica comenzó a mostrar un mayor interés hacia la lista de beneficios que se le atribuyen. A partir de entonces los beneficios del biocarbón han sido estudiados y comprobados principalmente en laboratorio y a escalas pequeñas en macetas en invernaderos.

Durante este periodo se han producido un número reducido de investigaciones sobre la aplicación de biocarbón en campo, que permita a los productores comprobar la veracidad de los efectos benéficos que se le atribuyen, así como los posibles efectos negativos que se pudieran derivar de su aplicación. Por lo que se recomienda tomar un enfoque sistémico en los próximos trabajos sobre este material que incluya los elementos económicos, ambientales y sociales, para evaluar su aplicabilidad en las unidades de producción rural.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

La base de datos analizada en el presente estudio está disponible del autor correspondiente a solicitud razonable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

FINANCIACIÓN

Este trabajo se financió por el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) a través de la beca otorgada al primer autor.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: J.S.I. y A.S.G. Metodología: V.C.R., D.A.M. y J.P.N. Software: D.A.M. Validación: J.B.M. Investigación: J.S.I. Curación de datos: J.S.I. Escritura, preparación del borrador original, J.S.I.; escritura: revisión y edición, A.S.G., V.C.R., D.A.M. y J.P.N.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por la beca de posgrado del primer autor. Agradecemos también el apoyo institucional y a nuestros colegas por sus valiosos comentarios y sugerencias.

LITERATURA CITADA

- Ahmad, Z., Mosa, A., Zhan, L., & Gao, B. (2021). Biochar modulates mineral nitrogen dynamics in soil and terrestrial ecosystems: A critical review. *Chemosphere*, 278, 130378. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130378>
- Ahmed, A. S., Vanga, S., & Raghavan, V. (2018). Global bibliometric analysis of the research in biochar. *Journal of Agricultural & Food Information*, 19(3), 228-236. <https://doi.org/10.1080/10496505.2017.1403328>
- Anika, N., Mahardika, M., Panjaitan, J. R. H., Achmad, F., Bindar, Y., Azizah, I. N., ... & Ramadhani, D. A. (2022). Effect of production technique on corn cob biochar quality. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1038, 1-8. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1038/1/012007>
- Aria, M., & Cuccurullo, C. (2017). bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, 11(4), 959-975. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>
- Blanco-Canqui, H. (2020). Does biochar improve all soil ecosystem services? *GCB Bioenergy*, 13, 291-304. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12783>
- Burrell, L. D., Zehetner, F., Rampazzo, N., Wimmer, B., & Soja, G. (2016). Long-term effects of biochar on soil physical properties. *Geoderma*, 282, 96-102. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.07.019>
- Cadet-Díaz, S., & Guerrero-Escobar, S. (2018). Factores que determinan los rendimientos de la producción de maíz en México: evidencia del censo agropecuario 2007. *Agricultura, sociedad y desarrollo*, 15(3), 311-337.
- Chan, K. Y., Van-Zwieten, L., Meszaros, I., Downie, A., & Joseph, S. (2008). Using poultry litter biochars as soil amendments. *Soil Research*, 46(5), 437-444. <https://doi.org/10.1071/SR08036>
- Chen, D., Liu, X., Bian, R., Cheng, K., Zhang, X., Zheng, J., ... & Li, L. (2018). Effects of biochar on availability and plant uptake of heavy metals - A meta-analysis. *Journal of Environmental Management*, 222, 76-85. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.05.004>
- Chen, D., Wang, X., Wang, X., Feng, K., Su, J., & Dong, J. (2020). The mechanism of cadmium sorption by sulphur-modified wheat straw biochar and its application cadmium-contaminated soil. *Science of The Total Environment*, 714, 136550. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136550>
- Cui, X., Fang, S., Yao, Y., Li, T., Ni, Q., Yang, X., & He, Z. (2016). Potential mechanisms of cadmium removal from aqueous solution by Canna indica derived biochar. *Science of the Total Environment*, 562, 517-525. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.248>
- Cui, Y., Mao, F., Zhang, J., He, Y., Tong, Y., & Peng, Y. H. (2021). Biochar enhanced high-solid mesophilic anaerobic digestion of food waste: Cell viability and methanogenic pathways. *Chemosphere*, 272, 129863. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129863>
- Gisladdottir, G. y Stocking, M. (2005). Land degradation control and its global environmental benefits. *Land Degradation & Development*, 16, 99-112. <https://doi.org/10.1002/ldr.687>
- Hu, J., Stenchly, K., Gwenzi, W., Wachendorf, M., & Kaetzl, K. (2023). Critical evaluation of biochar effects on methane production and process stability in anaerobic digestion. *Frontiers in Energy Research*, 11, 1-13. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1205818>
- Hunter, M. C., Smith, R. G., Schipanski, M. E., Atwood, L. W., & Mortensen, D. A. (2017). Agriculture in 2050: recalibrating targets for sustainable intensification. *BioScience*, 67(4), 386-391. <https://doi.org/10.1093/biosci/bix010>
- Jindo, K., Mizumoto, H., Sawada, Y., Sanchez-Monedero, M. A., & Sonoki, T. (2014). Physical and chemical characterization of biochars derived from different agricultural residues. *Biogeosciences*, 11(23), 6613-6621. <https://doi.org/10.5194/BG-11-6613-2014>
- Kammann, C., Rondon, M., & Schmidt, H. (2017). Biochar as a tool to reduce the agricultural greenhouse-gas burden. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 25(4), 1-9. <https://doi.org/10.3846/16486897.2017.1319375>
- Kandel, A., Dahal, S., & Mahatara, S. (2021). A review on biochar as a potential soil fertility enhancer to agriculture. *Archives of Agriculture and Environmental Science*, 6(1), 108-113. <https://doi.org/10.26832/24566632.2021.0601014>
- Keith, A., Singh, B., & Singh, B. P. (2011). Interactive priming of biochar and labile organic matter mineralization in a smectite-rich soil. *Environmental Science & Technology*, 45(22), 9611-9618. <https://doi.org/10.1021/es202186j>
- Lehmann, J., Rillig, M. C., Thies, J. E., Masiello, C. A., Hockaday, W. C., & Crowley, D. E. (2011). Biochar effects on soil biota - a review. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(9), 1812-1836. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.04.022>
- Lévesque, V., Oelbermann, M., & Ziadi, N. (2022). Biochar in temperate soils: opportunities and challenges. *Canadian Journal of Soil Science*, 102(1), 1-26. <https://doi.org/10.1139/cjss-2021-0047>
- Li, Y., Xing, B., Ding, Y., Han, X., & Wang, S. (2020). A critical review of the production and advanced utilization of biochar via selective pyrolysis of lignocellulosic biomass. *Bioresour Technol*, 312, 123614. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123614>
- Li, Y., Yu, H., Liu, L., & Yu, H. (2021). Application of co-pyrolysis biochar for the adsorption and immobilization of heavy metals in contaminated environmental substrates. *Journal of Hazardous Materials*, 420, 126655. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126655>
- Luo, Z., Yao, B., Yang, X., Wang, L., Xu, Z., Yan, X., ... & Zhou, Y. (2022). Novel insights into the adsorption of organic contaminants by biochar: a review. *Chemosphere*, 287, 132113. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132113>
- Lv, C., Yang, S., Chen, Y., Xu, L., Wang, A., Zhang, Z., ... & Quan, L. (2024). Biochar derived from tobacco waste significantly reduces the accumulations of cadmium and copper in edible parts of two vegetables: an in-situ field study. *Environmental Science and Pollution Research*, 31, 7533-7542. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-31536-y>
- Martínez-Reyes, L., Aguilar-Jiménez, C. E., Carcaño-Montiel, M. G., Galdámez-Galdámez, J., Gutiérrez-Martínez, A., Morales Cabrera, J. A., ... & Gómez-Padilla, E. (2018). Biofertilización y fertilización química en maíz (*Zea mays* L.) en Villaflores, Chiapas, México. *Siembra*, 5(1), 026-037. <https://doi.org/10.29166/siembra.v5i1.1425>
- Matušík, J., Hnátková, T., & Kočí, V. (2020). Life cycle assessment of biochar-to-soil systems: A review. *Journal of Cleaner Production*, 259, 120998. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120998>
- Mondragón-Sánchez, A., Medina-Orozco, L. E., Sánchez-Duque, A., & Núñez-Oregel, V. (2021). Efecto de la aplicación de biocarbón en el rendimiento de maíz en Michoacán, México. *Terra Latinoamericana*, 39, 1-7. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.896>
- Mukherjee, A., & Lal, R. (2013). Biochar impacts on soil physical properties and greenhouse gas emissions. *Agronomy*, 3(2), 313-339. <https://doi.org/10.3390/agronomy3020313>
- Mukome, F. N., Zhang, X., Silva, L. C., Six, J., & Parikh, S. J. (2013). Use of chemical and physical characteristics to investigate trends in biochar feedstocks. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61(9), 2196-2204. <https://doi.org/10.1021/jf3049142>
- Novak, J., Ro, K., Ok, Y. S., Sigua, G., Spokas, K., Uchimiya, S., & Bolan, N. (2016). Biochars multifunctional role as a novel technology in the agricultural, environmental, and industrial sectors. *Chemosphere*, 142, 1-3. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.06.066>
- 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>

- Pituello, C., Francioso, O., Simonetti, G., Pisi, A., Torreggiani, A., Berti, A., & Morari, F. (2015). Characterization of chemical-physical, structural and morphological properties of biochars from biowastes produced at different temperatures. *Journal of Soils and Sediments*, 15, 792-804. <https://doi.org/10.1007/s11368-014-0964-7>
- Praveen, S., Jegan, J., Bhagavathi-Pushpa, T., Gokulan, R., & Bulgariu, L. (2022). Biochar for removal of dyes in contaminated water: an overview. *Biochar*, 4(1), 1-16. <https://doi.org/10.1007/s42773-022-00131-8>
- Qi, L., Niu, H., Zhou, P., Jia, R., & Gao, M. (2018). Effects of biochar on the net greenhouse gas emissions under continuous flooding and water-saving irrigation conditions in paddy soils. *Sustainability*, 10(5), 1-17. <https://doi.org/10.3390/su10051403>
- Qi, Q., Sun, C., Cristhian, C., Zhang, T., Zhang, J., Tian, H., ... & Tong, Y. W. (2021). Enhancement of methanogenic performance by gasification biochar on anaerobic digestion. *Bioresource Technology*, 330, 124993. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124993>
- Qi, S., Degen, A., Wang, W., Huang, M., Li, D., Luo, B., ... & Shang, Z. (2024). Systemic review for the use of biochar to mitigate soil degradation. *GCB Bioenergy*, 16(6), 1-28. <https://doi.org/10.1111/gcbb.13147>
- Qiu, L., Deng, Y. F., Wang, F., Davaritouchae, M., & Yao, Y. Q. (2019). A review on biochar-mediated anaerobic digestion with enhanced methane recovery. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 115, 109373. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109373>
- R Core Team (2023). *R: A language and environment for statistical computing*. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing.
- Ronsse, F., Van-Hecke, S., Dickinson, D., & Prins, W. J. G. B. (2013). Production and characterization of slow pyrolysis biochar: influence of feedstock type and pyrolysis conditions. *GCB Bioenergy*, 5(2), 104-115. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12018>
- Sajjadi, B., Chen, W. Y., & Egiebor, N. O. (2019). A comprehensive review on physical activation of biochar for energy and environmental applications. *Reviews in Chemical Engineering*, 35(6), 735-776. <https://doi.org/10.1515/revce-2017-0113>
- Schmidt, H. P., Hagemann, N., Draper, K., & Kammann, C. (2019). The use of biochar in animal feeding. *PeerJ*, 7, 1-54. <https://doi.org/10.7717/peerj.7373>
- Sorrenti, G., Masiello, C. A., Dugan, B., & Toselli, M. (2016). Biochar physico-chemical properties as affected by environmental exposure. *Science of the Total Environment*, 563-564, 237-246. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.245>
- Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. M., ... & Sörlin, S. (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, 347, 1-11. <https://doi.org/10.1126/science.1259855>
- Van Eck, N. J., & Waltman, L. (2023). *VOSviewer User's Guide, Versión 1.6.21*. Leiden, Países Bajos: Universidad de Leiden.
- Wang, H., Ren, T., Yang, H., Feng, Y., Feng, H., Liu, G., ... & Shi, H. (2020). Research and application of biochar in soil CO₂ emission, fertility, and microorganisms: a sustainable solution to solve china's agricultural straw burning problem. *Sustainability*, 12(5), 1-17. <https://doi.org/10.3390/su12051922>
- Wang, J., & Wang, S. (2019). Preparation, modification and environmental application of biochar: A review. *Journal of Cleaner Production*, 227, 1002-1022. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.04.282>
- Wood, R., Mašek, O., & Erastova, V. (2024). Developing a molecular-level understanding of biochar materials using public characterization data. *Cell Reports Physical Science*, 5(7), 1-26. <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2024.102036>
- Xu, Y., Yang, N., Ge, X., & Zhou, B. (2022). Biochar combined with nitrogen alters rhizosphere soil nutrients and microbial communities, and promotes growth of moso bamboo seedlings. *Forests*, 13(7), 1-11. <https://doi.org/10.3390/f13071043>
- Yaashikaa, P. R., Kumar, P. S., Varjani, S., & Saravanan, A. J. B. R. (2020). A critical review on the biochar production techniques, characterization, stability and applications for circular bioeconomy. *Biotechnology Reports*, 28, e00570. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2020.e00570>
- Yang, S., Chen, Z., & Wen, Q. (2021). Impacts of biochar on anaerobic digestion of swine manure: Methanogenesis and antibiotic resistance genes dissemination. *Bioresource Technology*, 324, 124679. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124679>
- Yuan, C., Gao, B., Peng, Y., Gao, X., Fan, B., & Chen, Q. (2021). A meta-analysis of heavy metal bioavailability response to biochar aging: Importance of soil and biochar properties. *Science of the Total Environment*, 756, 144058. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144058>
- Yuan, S., Hong, M., Li, H., Ye, Z., Gong, H., Zhang, J., Huang, Q., & Tan, Z. (2020). Contributions and mechanisms of components in modified biochar to adsorb cadmium in aqueous solution. *Science of the Total Environment*, 733, 139320. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139320>
- Zhang, R. H., Li, Z. G., Liu, X. D., Wang, B. C., Zhou, G. L., Huang, X. X., ... & Brooks, M. (2017). Immobilization and bioavailability of heavy metals in greenhouse soils amended with rice straw-derived biochar. *Ecological Engineering*, 98, 183-188. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLENG.2016.10.057>