

INTERACCIÓN DEL BIOCHAR Y LOS MICROORGANISMOS DEL SUELO.

MAIRA ALEJANDRA OSPINA CUELLAR

Código

363216232

UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA SECCIONAL GIRARDOT

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

PROGRAMA DE INGENIERIA AMBIENTAL

GIRARDOT

2022

INTERACCIÓN DEL BIOCHAR Y LOS MICROORGANISMOS DEL SUELO.

Estudiante

MAIRA ALEJANDRA OSPINA CUELLAR

Directora

MARIA ALDAYA RODRIGUEZ

Esp. En enseñanza de las ciencias naturales con énfasis en educación ambiental.

UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA SECCIONAL GIRARDOT

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

PROGRAMA DE INGENIERIA AMBIENTAL

GIRARDOT

2022

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	7
JUSTIFICACIÓN.....	9
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	10
OBJETIVOS.....	11
Objetivo general.	11
Objetivos específicos.....	11
METODOLOGÍA	11
Descripción del tema.....	11
Instrumentos para la recolección de datos.....	12
Método de análisis.....	12
MICROORGANISMOS EN SUELOS AGRÍCOLAS DE COLOMBIA	13
Bacterias presentes en suelos agrícolas de Colombia.	14
Hongos presentes en suelos agrícolas de Colombia.....	17
Virus presentes en suelos agrícolas de Colombia.	19
INTERACCIÓN DEL BIOCHAR CON LOS MICROORGANISMOS DEL SUELO.....	20
Interacción positiva del biochar con microorganismos del suelo.	22
<i>Aumento de la diversidad de microorganismos y cambio de la composición microbiana.</i>	23
<i>Modificación de la actividad química del metabolismo de los microorganismos.</i>	24

Interacción negativa del biochar con los microorganismos del suelo.....	27
Interacción neutra del biochar con los microorganismos del suelo.	29
ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO	29
Tendencia en publicaciones.	29
Principales investigadores / Scopus.	31
Principales actores a nivel mundial, centros de I D, Universidades.	31
Principales países donde se investiga.....	32
Publicaciones por área temática.	33
Análisis de palabras claves.....	34
CONCLUSIONES	35
RECOMENDACIONES	36
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	37
ANEXOS.....	45
Ecuaciones de búsqueda para la identificación de la interacción del biochar con los microorganismos del suelo	47

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Número de publicaciones sobre biochar y su interacción con microorganismos 2007-2022. (Scopus, 2021).	30
Figura 2 Principales investigadores del biochar e interacción con microorganismos. (Scopus , 2021).	31
Figura 3 Principales instituciones a nivel mundial en publicaciones de biochar e interacción de microorganismos. (Scopus , 2021).....	32
Figura 4 Principales países donde se investiga el biochar y la interacción con microorganismos. (Scopus, 2021).	33
Figura 5 Publicaciones por áreas temáticas (Scopus, 2021).	34
Figura 6 Análisis de palabras claves Elaboración propia datos tomados de Scopus.	35

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Principales familias/grupos funcionales de bacterias en suelos agrícolas de Colombia.	15
Tabla 2 Principales familias de hongos en suelos agrícolas de Colombia.	18
Tabla 3 Principales géneros de virus en suelos agrícolas de Colombia.	19

|

INTRODUCCIÓN

El suelo es un componente de vital importancia en el ambiente, está conformado por minerales, aire, agua, materia orgánica, además de organismos que interactúan en él; necesario y determinante en cuanto a estructura y funcionamiento de diferentes ciclos como del agua, y elementos los cuales son de gran importancia y necesarios para un equilibrio en el planeta (SIAC , s.f.).

Colombia posee 50,91 millones de hectáreas para uso agropecuario, de las cuales corresponden a actividades pecuarias 45 millones de hectáreas y 4,9 millones de hectáreas para actividades agrícolas; dentro de su variedad en actividades agrícolas se encuentran cultivos permanentes, cultivos transitorios y cultivos forestales, evidenciando esto una vocación agraria del país. Es de destacar que la intensificación en la producción de estas actividades ha presentado diferentes alteraciones en la funcionalidad del suelo y las unidades productivas (Torres et al., 2017).

Actualmente se presenta una variedad de tecnologías para contrarrestar dicha degradación y así recuperar la fertilidad del suelo, una de estas tecnologías es la aplicación de biochar (López Collado et al., 2016).

El biochar se define como biomasa que ha sido pirolizada en ausencia de oxígeno, el cual por sus propiedades existe evidencia científica de que su aplicación captura carbono de modo sostenible y a la vez mejora las funciones del suelo (Verheijen et al., 2010) . Son numerosos los trabajos que reportan resultados positivos en el uso del biochar luego de su aplicación en el suelo, generando mejoras en las propiedades físicas, químicas y biológicas, lo cual puede producir un aumento de la productividad de los cultivos (López Collado et al., 2016).

Por otra parte, se reportan estudios que evidencian el impacto que existe sobre los microorganismos del suelo como consecuencia del uso de este tipo de enmiendas. Anderson et al. (citados en Sánchez Reinoso et al, 2019) documentaron que la “aplicación de biochar promueve el crecimiento de bacterias

solubilizadoras de fosfato, lo cual altera el flujo de carbono en el suelo y aumenta la abundancia de aquellos microorganismos que pueden degradar compuestos más recalcitrantes de carbono. Además, evidencia científica expone que la estructura porosa del biochar proporciona hábitats para organismos y estos transforman los nutrientes disponibles en el suelo para ser empleados por las plantas (Sheng & Zhu, 2018).

De la misma manera estudios evidencian impactos positivos en el uso del biochar, como también existen estudios que reportan lo contrario, aunque en una menor proporción; uno de ellos en el cual se hizo uso de dos biocarbones en suelo australiano se evidencio un incremento en el contenido de carbono total, mas no un aumento en los nutrimentos extraíbles (López Collado et al., 2016).

Finalmente es necesario mencionar que a pesar de que son numerosos los trabajos sobre el biochar en invernadero a corto plazo, son pocos los estudios de campo durante varias temporadas o años, o a largo plazo (Wang et al., 2011).

JUSTIFICACIÓN

El biochar es una tecnología que ha demostrado beneficios en el suelo como el aumento de fertilidades y mejoras en sus propiedades físicas, químicas y biológicas, como también el secuestro de carbono (López et al., 2016). También ha demostrado que mejora la productividad de los cultivos, recuperando fertilidad del sistema edáfico lo cual ha permitido elevar rendimiento en los cultivos con tierras degradadas en un 25%, como también la disminución de CO₂, ofreciendo así beneficios económicos y ambientales (Aquiye & Vélez, 2019).

Esta es por tanto una tecnología que debe ser estudiada, ya que puede contribuir a la mitigación de los impactos generados por la actividad antrópica en los suelos, con un gran potencial para mitigar la degradación del suelo y aumentar el rendimiento de cultivos, y que también puede disminuir la dependencia que se tiene en la actualidad de fertilizantes químicos entre otras.

Además, y teniendo en cuenta que para 2030, la ONU estableció como meta del objetivo de desarrollo sostenible quince “luchar contra la desertificación, rehabilitar las tierras y los suelos degradados, incluidas las tierras afectadas por la desertificación, la sequía y las inundaciones, y procurar lograr un mundo con una degradación neutra del suelo” todos los trabajos, como el presente, que aporten a la generación de conocimiento sobre alternativas para la recuperación de suelos, además de comprender el comportamiento e interacción del biochar con los microorganismos presentes del suelo resultan de gran importancia para su respectiva ejecución en suelos agrícolas de Colombia.

Por otra parte, es necesario resaltar la importancia de la generación de un material de divulgación, ya que este tipo de productos son el puente que permiten hacer accesible el conocimiento científico, para que actores diferentes puedan integrarlo a su cultura.

Finalmente es importante resaltar que tecnologías emergentes como el biochar que ofrecen alternativas para la mitigación del cambio climático, la valorización de residuos agrícolas o la recuperación de los suelos deben ser temas prioritarios en el panorama investigativo de los ingenieros ambientales, ya que precisamente son los encargados de “diseñar y gestionar soluciones ambientales para mitigar impactos ambientales negativos y contribuir al desarrollo humano sustentable conducente al mejoramiento de la calidad de vida de las comunidades” (UDEEC, 2022).

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El suelo siendo un componente vital para nuestro planeta ha sido impactado negativamente a lo largo de la historia por diferentes factores que han propiciado la degradación de este. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2015) las principales amenazas para las funciones del suelo son la erosión del suelo, pérdida del COS, desequilibrio de nutrientes, acidificación del suelo, contaminación del suelo, anegamiento, compactación del suelo, sellado del suelo, salinización y pérdida de la biodiversidad del suelo.

Lo anteriormente mencionado conlleva a la respectiva degradación del suelo. Según el informe del Estado Mundial del Recurso Suelo el suelo en la mayor parte del mundo está en condición mala o muy mala y lo más alarmante es que el 33% de la tierra se encuentra en un estado de moderada a altamente degradada, producto de estas amenazas inminentes consideradas por la FAO. La degradación de este componente ambiental conlleva diversas consecuencias como la inseguridad alimentaria y nutricional, pobreza, la reducción de los servicios ecosistémicos y la aceleración del cambio climático.

Los suelos en Colombia no son la excepción a estas alteraciones, por tanto, se requiere de la implementación de tecnologías que sean amigables con el ambiente y que sean accesibles para su mitigación.

El biochar es una tecnología altamente atractiva por sus múltiples beneficios como la mejora de las condiciones físicas del suelo, recuperación de fertilidad, un mayor crecimiento en la productividad de cultivos y una buena interacción con los microorganismos siendo así una tecnología de gran potencial que podría ser implementada en el sector agrícola colombiano siendo esta una medida que podría traer impactos positivos en lo económico y ambiental.

Considerando que los suelos se definen no solo por sus características físicas (densidad, estructura, porosidad, etc.) y químicas (pH, materia orgánica, etc.), sino también por el componente biológico (microorganismos, meso y macro fauna) (Alarcón & Ferrera, 2001), se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿Qué impactos tiene la aplicación del biochar en los microorganismos del suelo?

OBJETIVOS

Objetivo general.

Estudiar la interacción del biochar y los microorganismos del suelo.

Objetivos específicos.

1. Identificar las principales familias y/o grupos funcionales de microorganismos descritos en suelos agrícolas de Colombia.
2. Evaluar los efectos del biochar sobre los microorganismos nativos
3. Análisis bibliométrico del panorama mundial sobre el biochar

METODOLOGÍA

Descripción del tema.

La presente monografía tiene como temática central la enmienda de tipo biochar y su interacción con los microorganismos del suelo como también sus efectos, desde un contexto nacional e internacional.

Instrumentos para la recolección de datos.

La búsqueda de información se realizó a través de tres plataformas o bases de datos, una de acceso libre y dos de acceso privado, Google Académico, Scopus, Science Direct, para la obtención de artículos, trabajos de grados, libros, publicaciones, revisiones, etc relacionados con el tema. Los documentos de interés se buscaron empleando los datos mostrados en Anexos; Ecuaciones de búsqueda para la identificación de microorganismos presentes en suelos agrícolas de Colombia y Ecuaciones de búsqueda para la identificación de la interacción del biochar con los microorganismos del suelo. Las búsquedas se realizaron combinando palabras clave mediante operadores booleanos tal y como se detalla en Anexos y se aplicaron los filtros en la obtención de información.

A partir de la aplicación de estas ecuaciones de búsqueda se obtuvo un total 1,200 documentos. Sin embargo, esta información fue revisada y atendiendo al criterio de sistematización de la información se seleccionaron 102 documentos.

Método de análisis.

Se realizó la sistematización de la información comprendida en un periodo de tiempo entre el año 2015 hasta la actualidad, mediante una herramienta tipo tabla de Excel con los siguientes contenidos; Tipo de publicación (Artículos científicos, artículos de revisión, trabajos de grado y libros), nombre del autor, año, área temática, palabras claves, país, idioma, nombre del artículo y abstract.

Lo que permitió relacionar los aspectos clave de cada documento, para luego el respectivo análisis e interpretación.

Adicionalmente la información obtenida se clasifico por medio del gestor bibliográfico de Scopus para realizar análisis bibliométricos en VOSviewer con las palabras claves.

MICROORGANISMOS EN SUELOS AGRÍCOLAS DE COLOMBIA

El suelo es un componente de vital importancia en el ambiente que está conformado por minerales, aire, agua, materia orgánica, además de organismos que interactúan en él. Este compartimento tiene un papel fundamental, en cuanto a estructura y funcionamiento, en ciclos como el del carbono, el cual es de gran importancia y necesario para un equilibrio en el ecosistema (SIAC , s.f.). El suelo es un lugar para el almacenado y transformación de numerosas sustancias, fuente de materias primas.

También es necesario destacar el rol de los suelos en la producción de alimentos, debido a que es de ellos donde las plantas absorben los nutrientes requeridos para su crecimiento, en el proceso de producción agrícola. La disponibilidad en los suelos de nutrientes para las plantas está directamente relacionada con los ciclos biogeoquímicos, y estos a su vez, están determinados por las interacciones entre el componente físico, químico y biológicos del mismo (ALARCÓN & FERRERA, 2001). Colombia posee 50,91 millones de hectáreas para uso agropecuario, de las cuales corresponden a actividades pecuarias 45 millones de hectáreas y 4,9 millones de hectáreas para actividades agrícolas; dentro de su variedad en actividades agrícolas se encuentran cultivos permanentes, cultivos transitorios y cultivos forestales, evidenciando esto una vocación agraria del país (Torres et al., 2017).

El suelo además de ser un componente vital para el desarrollo de la vida, también es una reserva de biodiversidad, ya que tanto en su superficie como en su interior habita un enorme número de organismos. La biocenosis edáfica está compuesta por lo que se conoce como microflora (arqueas,

bacterias y hongos) además de los que propiamente se conoce como edafofauna, que habitualmente se clasifica en función de su tamaño en microfauna (nemátodos, protozoos y rotíferos), mesofauna (ácaros del suelo, colémbolos, proturos, dipluros entre otros) y macrofauna (lombrices de tierra, moluscos, cochinillas, milpiés, ciempiés, arácnidos e insectos (Cabrera Dávila et al., 2017)

Es de resaltar que los servicios ecosistémicos que nos brinda el suelo obedecen en cierta parte a las comunidades de organismos presentes en el mismo (Burbano , 2016), ya que estos, intervienen en numerosos procesos del suelo (Masin et al., 2017).

A continuación, se presentan tres grupos de microorganismos de interés para el agro colombiano

Bacterias presentes en suelos agrícolas de Colombia.

Entre los organismos presentes en el suelo se encuentran las bacterias, las cuales pueden ser heterotróficas, autotróficas, como también bacterias que fijan el nitrógeno y otras que consumen dicho nitrógeno, es de resaltar que las propiedades físico químicas del suelo dependen de la abundancia de estas bacterias (Calvo, 2011). Las bacterias presentes en el suelo desempeñan un rol de gran importancia en la descomposición de material orgánico el cual conlleva a la liberación de nutrientes que será tomado por las plantas (Crespo, 2013), de igual forma desarrollan un papel fundamental en el ciclo biogeoquímico del carbono y el nitrógeno lo que conlleva a una mayor abundancia y diversidad presente en suelo (Ramírez & Rojas , 2020).

Familia <i>Enterobacteriaceae</i>	(Carroll et al., 2016)
Familia <i>Pseudomonadaceae</i>	(Pinzón , 2019)
Familia <i>Moraxellaceae</i>	(Cutíño et al., 2018)
Familia <i>Erwiniaceae</i>	(Viteri et al., 2015)
Familia Bacillaceae Genero Bacillus Familia Mycobacteriaceae Microbacterium Familia Moraxellaceae Genero Acinetobacter	(Cubillos et al., 2017)
Celulolíticos Amilolíticos Proteolíticos Solubilizadores de fosfatos Libres fijadores de nitrógeno	(Beltran et al, 2017)
Bacterias solubilizadoras de fosfato (BSF)	(Afanador et al., 2020)
Bacterias diazotróficas Familia Xanthomonadaceae Genero Stenotrophomonas Familia Bacillaceae Genero Bacillus Familia Alcaligenaceae Genero Achromobacter Familia Rhizobiaceae Genero Rhizobium	(Gaviria et al, 2018)

Familia Enterobacteriaceae	
Genero Enterobacter	

Tal y como se muestra en la Tabla 3 los estudios sobre las comunidades bacterianas en suelos no siempre se realizan en base a la taxonomía, en otras ocasiones las bacterias se clasifican tomando en cuenta el grupo funcional al que pertenecen. Este tipo de caracterización es importante ya que se relaciona con el papel que cumplen los microorganismos en el suelo. Como se mostrará más abajo, especialmente para el nitrógeno este tipo de caracterización puede ser de utilidad, ya que la interacción del biochar con los microorganismos que intervienen en el ciclo del nitrógeno, puede afectar el mismo. Y así mismo podría ser para otros ciclos biogeoquímicos.

Del mismo modo la mayoría de los trabajos recogidos en la Tabla 3 reconocen la existencia de una comunidad bacteriana, más o menos diversa. Considerando esta realidad, es lógico pensar que la medición del impacto del uso de enmiendas como el biochar sobre los suelos se realizara considerando los cambios estructurales y funcionales que este pudiera ocasionar en la microbiota.

Hongos presentes en suelos agrícolas de Colombia.

Los hongos son un reino conformado por una variedad de organismos eucariotas del reino Fungí los cuales entablan diversas relaciones beneficiosas como la simbiosis, la cual permite el crecimiento de las plantas como también diferentes relaciones con los animales (Ruiz , 2008). Dentro de las funciones que cumplen los hongos en el suelo se encuentran procesos de descomposición el cual genera un suministro de nutrientes al suelo lo que contribuye a una mejora en la estructura física del suelo (Ludwig & Magalhães de Abreu, s.f) como también se encargan de procesos de mineralización y reciclaje de nutrientes de las plantas.

A continuación, la recopilación de las principales familias de hongos que han reportado en suelos agrícolas de Colombia a través de múltiples estudios e investigaciones enfocados en la identificación y caracterización de microorganismos presentes en el suelo.

Tabla 2. Principales familias de hongos en suelos agrícolas de Colombia.

Principales Familias de hongos	Reporte
<i>Familia Diversisporaceae</i>	(Lozano, 2015)
<i>Familia Acaulosporaceae:</i>	
<i>Familia Glomeraceae</i>	
<i>Familia Acaulosporaceae</i>	
<i>Familia Pacisporaceae</i>	
<i>Familia Trichocomaceae</i>	(Álvarez, 2013)
<i>Familia Bionectriáceas</i>	
<i>Familia Shaeropsidaceae</i>	
<i>Familia Nectriaceae</i>	
Familia Hypocraceae Familia Saccharomycetaceae Familia Amphisphariaceae Familia Mortierellaceae Familia Leptosphaeriaceae Familia Trichosporanaceae	(Instituto Humboldt, 2016)

Familia Cordycipitaceae	
Familia Myxotrichaceae	
Familia Dothioraceae	
Familia Glomeraceae	
Familia Mucoraceae	
Familia Sporomiaceae	
Familia Sordariaceae	

Fuente: Propia

Virus presentes en suelos agrícolas de Colombia.

Los virus se componen de DNA, RNA y proteínas, como también pueden contener lípidos y glúcidos, además de esto es un agente infeccioso muy pequeño el cual se replica a partir de una célula viva (NEGRONI & GONZÁLEZ, 2009). Los virus presentan una capsula de envoltura de proteínas, la cual se denomina cápside, que tiene como función principal el proteger su material genético, la cual está envuelta en una membrana celular (Alarcón et al., 2018)

A continuación, la recopilación de los principales virus que han reportado en suelos agrícolas de Colombia a través de múltiples estudios e investigaciones enfocados en la identificación y caracterización de microorganismos presentes en el suelo.

Tabla 3. Principales géneros de virus en suelos agrícolas de Colombia.

Virus	<i>Genero</i>	Reporte
--------------	---------------	----------------

Potato Leafroll Virus (PLRV)	Polerovirus	Gil et al., 2011
Potato Virus (PVS)	Potyvirus	(García et al., 2016)
Tomato Spotted wilt Virus (TSWV)	Tospovirus	Perea et al., 2010
Potato Virus Y (PVY)	Potyvirus	(Guzmán et al., 2010)
Tobacco mosaic virus (TMV)	Tobamovirus	Gómez et al., 1997; De la Rotta et al.; 2016
Potato Virus X (PVX)	Potexvirus	(García et al., 2016)
Soybean mosaic virus (SMV)		(Ocampo et al., 2013)
Passiflora ringspot virus	Candidate Potyvirus	(Camelo,2010)
)Potato mop top virus (PMTV)	Pomovirus	(Garcia, 2012)

Fuente: Propia

INTERACCIÓN DEL BIOCHAR CON LOS MICROORGANISMOS DEL SUELO

El suelo es el hábitat de múltiples seres vivos, entre los cuales se pueden encontrar una gran cantidad de organismos como bacterias, hongos, protozoarios y nematodos, la mesofauna (ej. ácaros, colémbolos) y la más reconocida macrofauna (ej. lombrices y termitas), los cuales son fundamentales para el desarrollo de la vida en el planeta (Asociación Vida Sana). Los organismos del suelo actúan como agentes primarios para la conducción del ciclo de los nutrientes, la regulación de la dinámica de la materia orgánica del suelo, el secuestro del carbono en el suelo y las emisiones gases invernaderos, modificando la estructura física del suelo y el almacenamiento de agua, aumentando la cantidad y disponibilidad de nutrientes para la vegetación y aumentando la salud de la planta (FAO, 2021),

demostrando así el papel fundamental e importancia de los microorganismos del suelo en su interacción con el mismo.

Es importante mencionar que hay diversos factores que condicionarán la distribución y presencia de dichos microorganismos en el suelo. Por una parte, encontramos aspectos del componente abiótico del suelo, como el tipo del suelo, ph, materia orgánica o la humedad, que serán determinados en un contexto espacio tiempo, ya que podrán modificarse por acción de la vegetación presente o variaciones climáticas dadas por los cambios estacionales. Además, son responsables de la presencia de microorganismos en el suelo las interacciones biológicas de los mismos, ya que estos no se encuentran aislados y establecerán diferentes relaciones con el resto de la vida del suelo.

Por su parte el biochar es un carbón vegetal que se obtiene a partir de biomasa pirolizada a temperaturas relativamente elevadas (entre 400 y 750°C) en ambientes carentes de oxígeno (González et al. 2020). Puede obtenerse de diferentes tipos de biomasa, como desechos de agricultura, industria alimenticia, residuos forestales, como también desechos orgánicos, lo cual se impone como una alternativa para la gestión de los residuos (Amin et al., 2016). Además, se plantea como una tecnología altamente atractiva por sus beneficios en las propiedades físicas químicas y biológicas del suelo.

Está ampliamente estudiado que la *terra preta* Amazónica, suelo oscuro y fértil originado a manos de los indígenas quienes empleaban el biochar, tiene poblaciones de microorganismos más diversas y de mayor tamaño (Gul et al., 2015).

El biochar no solo puede mejorar las propiedades físico-químicas de los suelos, también puede generar un impacto positivo en la biota de los mismos. Este material se ha mostrado como un portador de microbios benéficos en el ecosistema del suelo, mejorando las propiedades del suelo, la alteración de la dinámica nutricional, la eliminación de contaminantes y estimulación de la diversidad microbiana en el suelo (Abhijeet et al., 2020). Además de los impactos positivos ya mencionados, el biochar puede

servir de refugio frente a microorganismos patógenos (Ajena, 2018). Así como también, las partículas de biocarbón de menor tamaño, pueden ser benéficas en la reducción de efectos producto de metales pesados, teniendo un mayor rendimiento de los cultivos como la calidad del suelo, luego de su aplicación (Zeeshan et al.,2020).

El efecto del biochar sobre la actividad microbiana puede darse de forma tanto directa como indirecta. De forma directa el biochar provee de refugio a microorganismos en su estructura porosa, nutre los microorganismos del suelo con los iones y nutrientes adsorbidos en él y/o puede desencadenar efectos tóxicos debido a varios compuestos. De forma indirecta, la adición de biochar puede resultar en la modificación de los hábitats modificando las propiedades del suelo necesarias para el crecimiento microbiano (como pH, aireación entre otras), el biochar puede inducir cambios en la actividad enzimática que puede afectar los ciclos biogeoquímicos en los cuales intervienen microorganismos, interrumpe la comunicación intra e interespecífica microbiana , y favorece la sorción de contaminantes del suelo, reduciendo la biodisponibilidad y toxicidad para los microorganismos (Zhu et al., 2017). Es por ello de gran importancia la recopilación de los efectos obtenidos a partir de la interacción de los microorganismos presentes en el suelo y el biochar, esto con el fin de comprender toda interacción y efecto de esta tecnología prometedora.

Interacción positiva del biochar con microorganismos del suelo.

A continuación, se resumen los efectos positivos que se han medido en las comunidades microbianas en la interacción con el biochar. Estos efectos pueden agruparse en dos tipos, los que aumentan la diversidad y los que afectan la actividad química de los microorganismos.

Aumento de la diversidad de microorganismos y cambio de la composición microbiana.

El uso de biochar según algunos estudios en su interacción con los microorganismos se observa el incremento de abundancia de microorganismos (Ullah et al , 2021) como las actinobacterias lo cual podría deberse por la capacidad de los microorganismos para el uso de estos sustratos complejos y persistentes, además, las actinobacterias por su menor tamaño son protegidas dentro de los poros del biochar (Berger , 2019). Como también se evidencio la abundancia de bacterias Gram negativas y Gram positivas, esto en condiciones específicas de biochar y suelos de siembra directa y bajo laboreo intenso (Berger , 2019), de igual forma el aumento de bacterias nitrificantes (Abujabhah et al., 2017) generando así una diversidad bacteriana en el suelo (Duan et al., 2021).

Según Montenegro (2013) el tratamiento de suelos con biochar aumenta la abundancia de hongos, evidenciando así un incremento significativo de estos microorganismos.

Como también el trabajo desarrollado por Henreaux (2012) microorganismos como *Rhizobium* sp y *Trichoderma* spp. obtuvieron efectos positivos donde los microorganismos hicieron uso de ciertas sustancias producidas en la obtención del biochar como fuente de energía. Igualmente (Hammerschmiedt., 2021) afirman que la aplicación de biochar en conjunto con sustancias húmicas estimulan el crecimiento y actividad microbiana creando una competencia de la microflora por los nutrientes con las plantas.

Además, la combinación de biochar con rizobacterias promotoras del crecimiento de las plantas (PGPR) en cultivos de tomate mejoran la estructura de la comunidad microbiana del suelo, siendo esto efectos beneficiosos para el crecimiento y desarrollo de las plantas (Wang et al., 2021). Asimismo, evidencia científica nos indica que al mejorar la capacidad metabólica de los metanogenos conlleva a que el biochar proporcione una transferencia directa de electrones en bacterias fermentativas y metanógenas (Junting et al., 2019).

De igual manera, (Niroshika et al 2022), nos indican que los filos bacterianos como Firmicutes, Proteobacteria, Actinobacteria, Dictyoglomi y Gemmatimonadetes se ven beneficiadas con la suplementación de biocarbón haciendo que la diversidad de estas aumente significativamente, como también la adición de biocarbón presentó un aumento proporcional de abundancia microbiana donde la comunidad más dominada fue la de bacterias gramnegativas (Gomez et al., 2013). Como también Paz et al. (2014) nos indica que las actividades enzimáticas del suelo y el crecimiento de las plantas mejoran positivamente debido a la interacción del biochar y las lombrices.

Modificación de la actividad química del metabolismo de los microorganismos.

Las partículas de biochar poseen nutrientes e iones adsorbidos sobre su superficie (principalmente en el interior de los microporos y mesoporos, y en menor medida en su superficie). Pueden poseer N, P, K, Mg, Mn, Na, Ca, Cu, Zn, Co, Si, Mo, Cr, Ni y otros elementos trazas, que varían en función de la materia prima utilizada para la producción de biochar y las condiciones de ~~la~~ pirólisis. Sin embargo, todos los tipos de biochar constituyen una fuente importante de C orgánico. Además, el biochar posee grupos funcionales (COOH, OH, ROH, etc.), capaces de interactuar con las moléculas orgánicas y nutrientes lo cual facilita su disponibilidad para las plantas, lo que podría permitir la retención de ciertos elementos durante más tiempo en el suelo, debido a su liberación lenta y, por lo tanto, ser menos susceptibles a la lixiviación. Por lo anterior, el biochar puede ser fuente de nutrientes para los microorganismos, estimulando su crecimiento (González-Marquetti et al, 2020).

Otra propiedad importante del biochar que puede favorecer la presencia de microorganismos en los suelos es la alta superficie específica dada por la gran cantidad de poros que caracteriza a este material. Esta característica física no solo confiere más lugares para que los microorganismos puedan colonizar o emplear como refugio, también mejora el hábitat favoreciendo la aireación, contenido de agua y

nutrientes (Jatay et al., 2020). Trabajos como el de Palasooriya et al., (2019) dan cuenta del aumento en la capacidad de retención hídrica de los suelos con el incremento de la superficie específica y porosidad del biochar, lo que se traduce en una mayor capacidad de retención del agua que podrán emplear los microorganismos. Además, fomentar la fijación de microorganismo en material protectores macroporosos puede ser un aporte para desarrollar los suficientes microorganismos capaces de estimular las capacidades para el crecimiento vegetal como la secreción de fitohormonas, solubilización de fosfatos, humificación, control de plagas o nitrificación. El biochar es considerado un material poroso que tiene características que lo hacen potencial material portador de microorganismos, que son; buena porosidad, alta capacidad de retención hídrica, capacidad buffer pH, estable, estéril o fácilmente esterilizable, económico, apropiado para diversas especies de bacterias y hongos, vida útil de al menos 3 meses y capaz de asegurar la adhesión microbiana (Wong & Oghonnaya, 2021)

La cantidad de poros y superficie específica aumenta con la temperatura de pirólisis (Suliman et al., 2017) por lo que se favorecería el efecto de colonización para microorganismos, sin embargo, la colonización microbiana no solo depende de esta propiedad, también depende del contenido de C lábil que, por el contrario, aumenta a menores temperaturas de pirólisis.

En su trabajo, (Luo et al., 2013), verificaron que la fracción C lábil de biochar estaba altamente asociado con la respiración microbiana y sucesión comunitaria en diferentes suelos, y por tanto el aumento del carbono de biomasa microbiana del suelo dependerá en gran parte de la fracción orgánica extractable del biochar. Lo que lleva a pensar que la interacción de formas no vivas y vivas del C , puede favorecerse en las condiciones particulares que se generan en la “charsphera”. Posteriormente, Li et al. (2019) relacionarían el aumento de la actividad microbiana en suelo tratado con la fracción orgánica extractable del biochar y la mayor acumulación de carbono en biomasa, con una disminución de carbono

orgánico total en el suelo debido a que las fracciones extractables acuosas y orgánicas del biochar presentan presencia dominante de C lábil que es fácilmente empleable por los microorganismos y devuelto de nuevo a la atmosfera en un tiempo de residencia breve por los mismos.

La respiración es un indicador de actividad microbiana la cual refleja la actividad biológica aerobia y heterotrófica, en donde el flujo de CO₂ representa como medida integrada la respiración de microorganismos, la fauna del suelo y la mineralización del carbono. Según (Avalo , 2017) el biochar estimula la respiración de los microorganismos, lo cual se debe al tipo de pirolisis con el que es obtenido el biochar el cual aporta grandes cantidades de carbono, de modo que es usado por los microorganismos como fuente de energía. De igual forma (Inostroza, s.f) reporta que el tratamiento de suelos con biochar aumentan la actividad respiratoria y conjuntamente al aumentar el tiempo de exposición se presenta la acumulación de actividad respiratoria, en donde se evidencia la correlación positiva de carbono total en el tratamiento. De igual forma (Ruiz , 2019) concluye que el biochar ayuda a la respiración microbiana presente del suelo beneficiando el intercambio gaseoso y la oxigenación.

Otro punto es que la actividad metabólica de los microorganismos en el suelo influye en los ciclos biogeoquímicos. Tian y colaboradores en el 2016 advirtieron como la adición de biochar de madera de pino en el suelo de un arrozal resultó en aumento de la actividad metabólica, particularmente la utilización de aminoácidos y amins debido a un aumento en la actividad de las enzimas proteolíticas (l-leucina aminopeptidasa). Estos resultados indican que los microorganismos comienzan a extraer N del material orgánico del suelo (MOS) para compensar las altas relaciones C: N después de la aplicación de BC, que en consecuencia aceleran el ciclo de N estable.

De igual manera el biochar puede afectar la presencia de microorganismos en suelos ya que como consecuencia de su adición se genera un aumento del pH del suelo, debido a que el biochar tiende a ser alcalino, se genera un incremento del mismo a la par de la temperatura de pirolisis. Y en general, el

crecimiento de los microorganismos del suelo, el cambio en las comunidades y funciones son altamente sensibles a cambios en el pH (Dai et al, 2021). Como lo evidencia la investigación de (Xu et al., 2016) en el cual adicionaron biochar obtenido a partir de paja de maíz, incrementó el pH del suelo y de la conductividad eléctrica, y hubo una disminución de la lixiviación de N, aspectos que condicionaron cambios en la composición de la comunidad bacteriana.

Interacción negativa del biochar con los microorganismos del suelo.

Pese a que, como se venía evidenciando anteriormente, el biochar ha demostrado impactos positivos de su uso a través de diferentes estudios, el biocarbón en su aplicación al suelo también puede presentar efectos negativos ya que en su integración al suelo se reduce significativamente la especiación efectiva de Zn y Cd, esto en suelos contaminados por metales pesados (Mingyue et al, 2021)

En la aplicación de biochar al suelo como método de tratamiento para aumentar la productividad de cultivos, se ha constatado una disminución en su abundancia y ejemplo de ello son los microorganismos solubilizadores de fosfato que se vieron afectados por el tratamiento con biochar en el trabajo de (MONTENEGRO, 2013). De igual forma se evidencia una disminución de la relación bacterias/hongos, debido al incremento de biomasa fúngica en el tratamiento, producto del crecimiento de estas poblaciones (Berger, 2019). Según (Hale et al., 2021) la combinación de compost y biochar en enmiendas del suelo tiene como resultado la reducción de abundancia relativa de bacterias nitrificantes y arqueas, afectando en gran medida la actividad microbiana del suelo, también el uso de biochar prístino que es producido a partir de rastrojo de maíz altera la composición bacteriana promoviendo el crecimiento de taxones bacterianos, pero a la misma vez suprimiendo a otras especies (Yu et al., 2021).

Este efecto negativo puede deberse a diferentes aspectos relacionados con el biochar. En el trabajo de Li et al (2019), la fracción sólida remanente después de extraer las fracciones acuosa y orgánica, resulta en un efecto negativo en la riqueza y diversidad fúngica del suelo. Esto puede deberse a que el pequeño tamaño de los poros del biochar pueda inducir la falta de nutrientes para los hongos, bien adsorbiendo el agua y los nutrientes en pequeños poros no accesibles para los hongos, o bien aumentando la competencia entre bacterias y hongos por el aumento de bacterias. Y tal y como señalaban (Gul et al, 2015) esa fracción de poros difícilmente accesible para los microorganismos, resulta en una inhibición de estos.

Podemos incluir dentro de los efectos y mecanismos del biochar en su interacción con los microorganismos que ciertos compuestos orgánicos reactivos en el biochar pueden estimular toxicidad a los microorganismos presentes (Xiaomin & Baoliang, 2017). En algunos casos estos compuestos se pueden dar durante la producción del biochar como el benceno, el etileno o compuestos fenólicos, tal y como demuestra el análisis de compuestos orgánicos volátiles de Spokas et al., los cuales conferirían al biochar la propiedad de actuar como antimicrobiano. (González & Rodríguez, 2020) Para aplicaciones agrícolas este efecto inhibitorio puede ser incluso positivo ya que permitiría la supresión/disminución de plagas que afectan los cultivos. Además, el biochar podría adsorber diversos compuestos involucrados en los procesos infectivos o inhibidores del crecimiento vegetal (Graber & Elad en Gonzalez et al., 2020).

Finalmente otro factor que puede determinar una interacción negativa entre el biochar y los microorganismos del suelo es la edad (aging) del biochar, ya que, a pesar de lo mencionado en apartados anteriores, y según lo mencionan Dai et al (2021), genera un efecto negativo en la colonización de la estructura porosa del biochar por los microorganismos, presumiblemente debido al colapso de la misma

través del tiempo y-a que los nutrientes adsorbidos pueden ser consumidos en mayor parte por los microorganismos

Interacción neutra del biochar con los microorganismos del suelo.

También hay autores que no reportan cambios en la comunidad microbiana. Tal es el caso de Ahmad et al (2016), que en las muestras donde emplearon biochar pirolizado a altas temperaturas (700°C), no registraron alteraciones en la abundancia de microorganismos (Bacterias gram positivas y negativas, hongos, actinomicetos y hongos micorrícicos arbusculares). Los autores lo atribuyen a que el biochar preparado a mayores temperaturas es más estable, por lo que habrá una menor proporción de carbono disponible como recurso para los microorganismos.

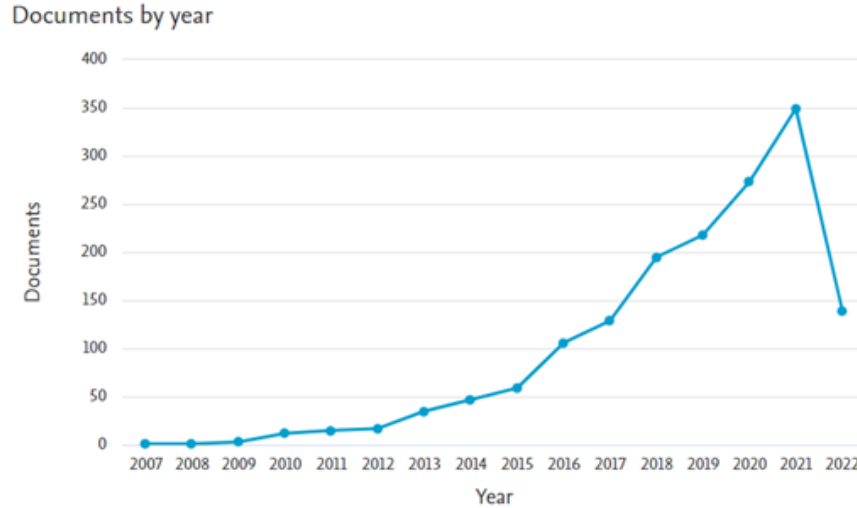
En el caso de (Tian et al., 2016) la adición de biochar no afectó la diversidad de la comunidad microbiana, medida a través del índice de Shannon-Wiener (Ahmad et al., 2016).

ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO

Tendencia en publicaciones.

En la respectiva exploración de publicaciones a partir de ecuaciones de búsqueda en bases de datos como Scopus se permite evidenciar la tendencia de crecimiento en publicaciones de biochar y microorganismos, especialmente en los últimos cinco años, en diferentes áreas temáticas a nivel internacional con un total de 1422 publicaciones en el periodo comprendido entre 2007 y 2022.

Figura 1 Número de publicaciones sobre biochar y su interacción con microorganismos 2007-2022. (Scopus, 2021).

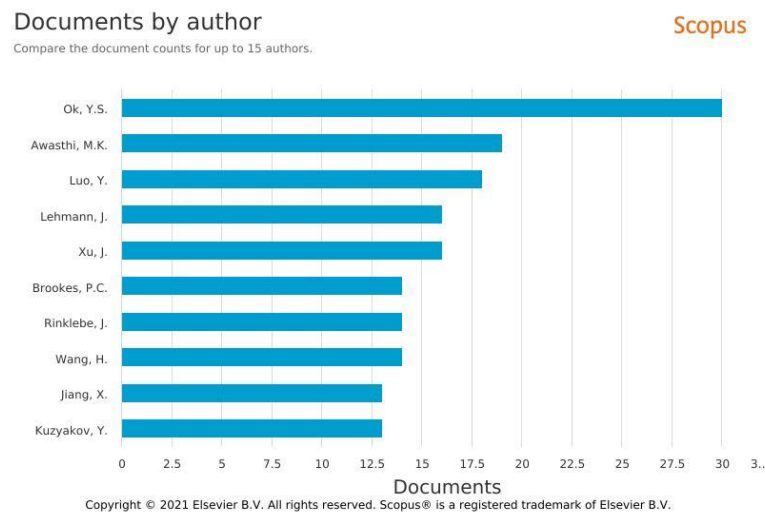


El siglo XX tuvo lugar un crecimiento nunca antes visto de la población y de la economía, y una revolución en agricultura, relacionada principalmente con el uso de insumos agrícolas y la mecanización de los sistemas de producción intensificándolos (FAO, 2015). No es de extrañar, relacionado con las consecuencias que se conocen de estas formas de producción, por tanto, que se hayan incrementado los estudios en formas de agricultura sostenible, a lo cual apuntarían las enmiendas orgánicas para los suelos como el biochar. En la figura anterior puede observarse como a partir del año 2016 aumentan de forma significativa la cantidad de publicaciones realizadas en torno al biochar y los microorganismos. Tal vez pueda deberse que la Asamblea General de las Naciones Unidas, declaró al 2015 como el Año Internacional del Suelo. Colocando este recurso en la mira, y desencadenando diversas acciones, entre las cuales se encontrarían las investigaciones científicas y sus consecuentes publicaciones.

Principales investigadores / Scopus.

En la figura 2 se evidencian los investigadores con mayor número de publicaciones en el área, en donde se destaca autores como Ok, Yong Sik con un total de 30 publicaciones, además se destacan autores procedentes de Corea del Sur, China y Estados Unidos.

Figura 2 Principales investigadores del biochar e interacción con microorganismos. (Scopus , 2021).



Principales actores a nivel mundial, centros de I D, Universidades.

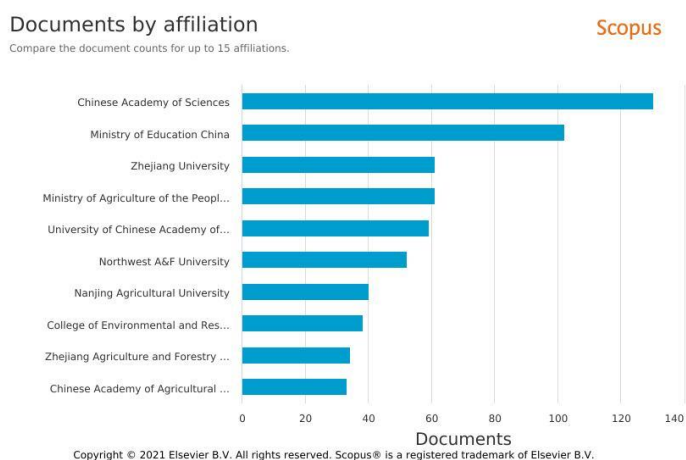
El presente análisis evidencia las primeras diez instituciones con más publicaciones en donde se destaca la Academia China de Ciencias con 130 publicaciones y el Ministerio de Educación de China con 102 publicaciones, siendo el continente con más aportes científicos en el área.

En la actualidad China figura como la segunda potencia científica mundial según un estudio realizado por Royal Society una academia científica independiente del Reino Unido la cual destaca la trayectoria

de crecimiento que ha tenido china a lo largo de los años, además según el Ministerio de ciencia de china la inversión en investigación y desarrollo fue de 1,76 millones de yuanes, cifra bastante considerable en el sector y demuestra el compromiso y competitividad que tiene este país con la comunidad científica internacional.

Según un boletín publicado por el Ministerio de Ambiente de china evidencia que el 16% de suelos analizados se encuentran contaminados, lo cual genera la necesidad de recuperación de estos y surge el interés de nuevas tecnologías.

Figura 3 Principales instituciones a nivel mundial en publicaciones de biochar e interacción de microorganismos. (Scopus, 2021).

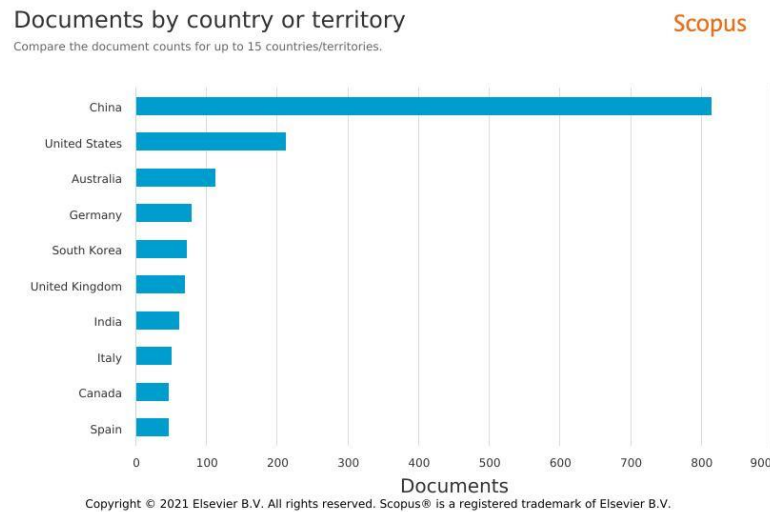


Principales países donde se investiga.

En la figura número 4 se evidencia la distribución geográfica de países con mayor número de publicaciones científicas, donde se destacan principalmente China con un total de 814 publicaciones, seguido de ello Estados Unidos con 211 y Australia 112 publicaciones.

Mientras que a nivel latinoamericano quien encabeza estas investigaciones y trabajos desarrollados es Brasil con un total de 26 publicaciones.

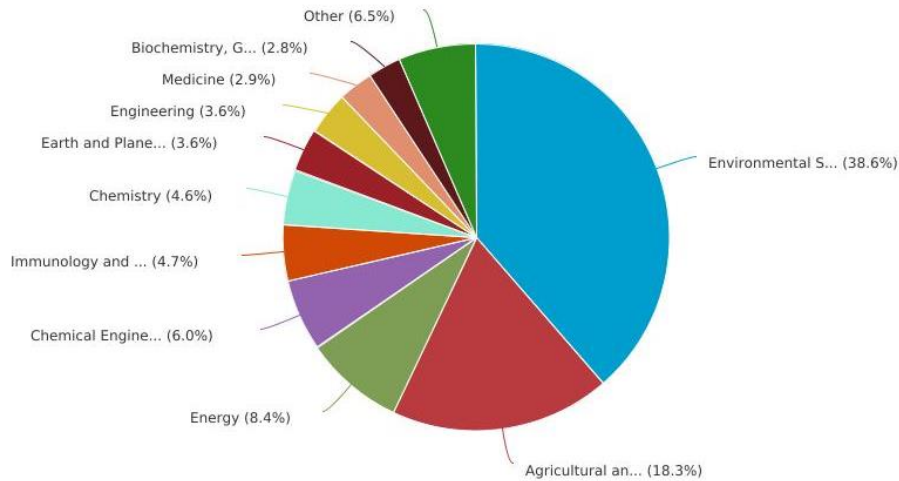
Figura 4 Principales países donde se investiga el biochar y la interacción con microorganismos. (Scopus, 2021).



Publicaciones por área temática.

En la Figura número 5 se evidencia la distribución de publicaciones por áreas temáticas en donde las ciencias medioambientales resaltan con 973 publicaciones y las ciencias agrícolas y biológicas con 462 publicaciones.

Figura 5 Publicaciones por áreas temáticas (Scopus, 2021).



Copyright © 2021 Elsevier B.V. All rights reserved. Scopus® is a registered trademark of Elsevier B.V.

Análisis de palabras claves

En la Figura 6 se puede evidenciar que las palabras claves son “biochar, bacterias y comunidad microbiana”, siendo así las palabras que más consideraron en los artículos. Los microorganismos del suelo están conformados por bacterias, hongos, protozoos y nematodos, sin embargo, se logra evidenciar dentro de las palabras claves que las bacterias son en grupo de microorganismos con mayor relevancia en los diferentes estudios, tal vez debido a su papel en el suelo. El restante número de palabras nos indican los múltiples efectos producto de las interacciones del suelo tanto física, química y biológica con el biochar y los microorganismos

El biochar es una tecnología prometedora, según las investigaciones son muchos los beneficios que aporta al suelo, como el aumento de fertilidad, crecimiento microbiológico, secuestro de carbono, de igual forma se plantea como un gran potencial para disminuir la dependencia de fertilizantes químicos y ejecutar una transición a fertilizantes orgánicos; sin embargo también se presentan efectos negativos en su uso, como la pérdida de fertilidad, disminución y muerte de microorganismos; por esto es necesario más investigación para profundizar su respectiva interacción con los componentes físico, químicos y biológicos para así ser ejecutada en suelos agrícolas de Colombia.

Los efectos del biochar varían en función de diferentes factores, como lo son las características de la materia prima pirolizada o la fuente de obtención y su condición, en conjunto del método de pirolisis, de igual forma factores como la condición del suelo y factores espaciales generan gran variabilidad de respuestas que hacen imposible una predicción exacta de efectos del biochar con la comunidad microbiana y las propiedades físicas, químicas de los suelos. Esto hace que se requiera una vez más investigación a largo plazo, investigación con diferentes tipos de biochar y diferentes métodos de pirolisis, para comprender su interacción en diferentes escenarios.

Según el análisis bibliométrico la concentración geográfica de publicaciones científicas se da en mayor medida en países desarrollados como China, Estados Unidos y Australia, mientras que a nivel latinoamericano destaca Brasil. Colombia a pesar de tener gran potencial agrícola no destaca en a nivel investigativo en la materia. Como es lógico, China líder, destacan instituciones como la Academia china de ciencias y Ministerio de Educación en China por sus grandes aportes científicos demostrando así grandes resultados el continente asiático en el uso de biochar y su interacción de microorganismos.

RECOMENDACIONES

Colombia es un país con gran potencial agronómico, por ello es necesario que, desde las diversas instituciones y la Universidad de Cundinamarca, se lideren iniciativas que permitan contextualizar a las condiciones particulares que aquí se dan, la aplicación del biochar como enmienda y los impactos de la misma. Y este estudio no solo debe hacerse desde tomando en consideración los suelos y sus propiedades, también las comunidades de microorganismos que allí habitan.

Para la Universidad de Cundinamarca son fundamentales las alianzas con otras instituciones para permitir la mejora de las capacidades investigativas, y de esta forma poder entrar en el contexto internacional en materia investigación sobre el biochar.

Es importante considerar que los efectos del biochar son dependientes de numerosos actores, por lo cual se recomienda realizar estudios de caso puntuales de los cuales partir para poder inducir tendencias generales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALARCÓN, A., & FERRERA, R. (2001). La microbiología del suelo en la agricultura sostenible. *Ciencia Ergo Sum*, 175-176.
- Amin, F., Yan , H., Yanfeng , H., Ruihong , Z., Guangqing, L., & Chang Chen, C. (2016). Biochar applications and modern. *Política ambiental de técnica limpia*.
- Cutiño Jiménez, A., Barrera Roca, L., Puente López, V., & Peña Cutiño, H. A. (2018). Marcadores moleculares de tipo inserción en bacterias de las familias Moraxellaceae y Helicobacteraceae (phylum Proteobacteria). *MEDISAN*, 40-41.
- Frioni, L. (2005). *Microbiología: básica, ambiental y agrícola*. Montevideo -URUGUAY: Editorial de la Facultad de Agronomía, Montevideo.
- González Marquetti, I., G. Rodríguez, M., Delgado Oramas, B. P., & Schmidt, H.-P. (2020). Biochar y su contribución a la nutrición, crecimiento y defensa de las plantas. *Revista de Protección Vegetal*, Vol. 35, No. 2,, 6-8.

- Guzmán, M., Román, V., Franco, L., & Rodríguez, P. (2010). Presencia de cuatro virus en algunas accesiones de la Colección Central Colombiana de papa mantenida en campo. *Agronomía Colombiana*.
- Henreaux, J. (2012). Efecto del biocarbón combinado con fertilizantes orgánicos y microorganismos benéficos sobre el desarrollo, productividad y resistencia de las plantas, Turrialba, Costa Rica. 6-7.
- MONTENEGRO, D. (2013). EVALUACIÓN DE LA APLICACIÓN DE BIOCHAR EN UN CULTIVO DE *Physalis peruviana* L. 23-24.
- NEGRONI, M., & GONZÁLEZ, M. (2009). *GENERALIDADES DE MICROBIOLOGÍA*. Buenos Aires- Argentina : Panamericana.
- Pírez, M., & Mota, M. (2006). Morfología y estructura bacteriana. 23-24.
- Stackebrandt, E., Cummins, C., & Johnson, J. (2006). *Familia Propionibacteriaceae: El género Propionibacterium*. New York .
- Zeeshan, M., Wiqar, A., Fida, H., Waqas, A., Muhammad, N., Masood, S., & Ibrar, A. (2020). Phytostabilization of the heavy metals in the soil with biochar applications, the impact on chlorophyll, carotene, soil fertility and tomato crop yield. *Journal of Cleaner Production*.
- Abhijeet, P., Jyotiprakash, R., & Balasubramanian, P. (2020). Biochar amendments and its impact on soil biota for sustainable. 287-305.
- Abujabhah, I., Doyle, R., Bound, S., & Bowman, J. (2017). Assessment of bacterial community composition, methanotrophic and nitrogen-cycling bacteria in three soils with different biochar application rates. *Remediation and Management of Contaminated or Degraded Lands*.
- Ahmad, M., Ok, Y., Kim, B., Ahn, J., Lee, Y., Zhang, M., . . . Lee, S. (2016). Impact of soybean stover- and pine needle-derived biochars on Pb and As mobility, microbial community, and carbon stability in a contaminated agricultural soil. *Journal of Environmental Management*, 131-139.
- Ajena, L. (2018). Effects of biochar application on beneficial soil organism review. *International Journal of Research Studies in Science, Engineering and Technology*. 5(5), 9–18.
- Alarcón, A., & Ferrera, R. (2001). La microbiología del suelo en la agricultura sostenible. *redalyc*, 175-183.
- Alarcón, D., Ojeda, R., & Ojeda, R. (2018). Virus: pequeños gigantes que dominan el planeta.
- Álvarez, C., Osorio, N., & Marín, M. (2013). IDENTIFICACIÓN MOLECULAR DE MICROORGANISMOS ASOCIADOS A LA RIZOSFERA DE PLANTAS DE VAINILLA EN COLOMBIA. *Acta Biológica Colombiana*.
- Aquije Ramos, C., & Vélez Azañero, A. (2019). OPTIMIZACIÓN DE LA AGRICULTURA SOSTENIBLE MEDIANTE.
- Asociación Vida Sana. (s.f.). Microorganismos del suelo y biofertilización. *Microorganismos del suelo y biofertilización*.
- Avalo, R. (2017). Effects of the Application to the Soil of Biochar obtained from Various Types of Wood. 19-22.
- Benavides López de Mesa, J. L., Quintero, G. M., & Ostos Ortiz, O. L. (2006). Aislamiento e identificación de diez cepas bacterianas desnitrificantes a partir de un suelo agrícola contaminado con abonos

nitrogenados proveniente de una finca productora de cebolla en la Laguna de Tota, Boyacá, Colombia. 52-53.

- Berger, M. G. (2019). Impacto de la aplicación de biochar sobre comunidades microbianas en suelo agrícola sujeto a diferentes niveles de fertilización nitrogenada. 43-46.
- Burbano, H. (2016). El suelo y su relación con los servicios ecosistémicos. *REVISTA DE CIENCIAS AGRÍCOLAS*, 119-120.
- Calvo, S. (2011). Bacterias simbióticas fijadoras de nitrógeno.
- Carroll, K., Morse, S., Mietzner, T., & Miller, S. (2016). *Microbiología médica*. NTERAMERICANA EDITORES, S.A. .
- Craig, R., Condrón, L., Clough, T., Mark, F., Stewart, A., Hill, R., & Sherlock, R. (2011). Biochar induced soil microbial community change: Implications for biogeochemical cycling of carbon, nitrogen and phosphorus. *Pedobiologia*, 309-320.
- Crespo, G. (2013). Funciones de los organismos del suelo en el ecosistema. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, vol. 47, núm. 4, 332-333.
- Cuevas Moreno, J. A. (2016). LOS HONGOS: HÉROES Y VILLANOS. *Revista digital universitaria*, 3-4.
- Duan, Y., Zhang, L., Yang, J., Zhang, Z., Awasthi, M., & Li, H. (2021). Insight to bacteria community response of organic management in apple orchard-bagasse fertilizer combined with biochar. *Science of the Total Environment*.
- FAO. (22 de Abril de 2021). *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura*. Obtenido de Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura: <http://www.fao.org/soils-portal/soil-biodiversity/es/#:~:text=Los%20organismos%20del%20suelo%20act%C3%BAan,y%20el%20almacenamiento%20de%20agua%2C>
- García, D., Olarte, M., Gutiérrez, P., & Marín, M. (2016). Detección serológica y molecular del Potato virus X (PVX) en tubérculos-semilla de papa (*Solanum tuberosum* L. y *Solanum phureja* Juz. & Bukasov) en Antioquia, Colombia. *Rev. Colomb. Biotecnol. Vol. XVIII*.
- García Bastidas, N. (2012). Detección y cuantificación de *spongospora subterranea* f. sp. *subterranea* y su virus asociado potato mop top virus (pmtv) en cultivos de papa de Colombia, mediante pcr en tiempo real.
- Gomez, J., Deneff, K., Stewart, C., Zheng, J., & Contrufo, M. (2013). Biochar addition rate influences soil microbial abundance and activity in temperate soils. *European Journal of soil science*, 5-6.
- González Marquetti, I., & G Rodríguez, M. (2020). Biochar and its contribution to plant nutrition, growth. *Revista de Protección Vegetal*, Vol. 35, No. 2, 2.
- Gul, S., Whalen, J., Thomas, B., Sachdeva, V., & Deng, H. (2015). Physico-chemical properties and microbial responses in biochar-amended soils: mechanisms and future directions. *Agriculture, Ecosystems & Environment*,. 46-59.

- Hale , L., Curtis , D., Azeem , M., Montgomery , J., Crowley , D., & McGiffen , M. (2021). Influence of compost and biochar on soil biological properties under turfgrass supplied deficit irrigation. *Applied Soil Ecology* Volume 168.
- Hammerschmidt, T., Holatko, J., & Pecina, V. (2021). Assessing the potential of biochar aged by humic substances to enhance plant growth and soil biological activity. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*.
- Higaki , S., Kitagawa , T., Kagoura , M., Morohashi , M., & Yamagishi , T. (2000). Characterization of Peptostreptococcus species in skin infections. *J Int Med Res*.
- Inostroza, C., Diez, M., & Gallardo, F. (s.f). EFECTO DE LA INCORPORACIÓN DE CARBÓN VEGETAL Y PAJA DE TRIGO SOBRE LA ACTIVIDAD BIOLÓGICA DE CONSUELO SERIE FREIRE, ORDEN ANDISOL, REGIÓN DE LA ARAUCANÍA, CHILE. 3-4.
- Instituto Humboldt. (2016). Biodiversidad de grupos funcionales de microorganismos asociados a suelos bajo cultivo de papa, ganadería y páramo en el Parque Nacional Natural de Los Nevados, Colombia. En E. Torres Rojas, & L. Avellaneda Torres, *Biota Colombiana* (págs. 79-80).
- Jatay, H., Singh, S., Rajput, V., Parihar , M., Mahawer , S., Singhal , R., & Sukirtee, S. (2020).). Importance of Biochar in Agriculture and Its Consequence. In A. A. Abdelhafez, & M. H. H. Abbas (Eds.). *Environmental Safety*.
- Johannes , L., & Stephen, J. (2021). *Biochar: Environmental Management Second Edition*.
- Johannes, L., & Stephen , J. (2009). *Biochar: Enviromental Management*.
- Junting, P., Junyi, M., Limei, Z., & Hongbin, L. (2019). Enhanced methane production and syntrophic connection between microorganisms during semi-continuous anaerobic digestion of chicken manure by adding biochar. *Journal of Cleaner production* .
- Laetitia, H., Didier, L., Agnès, R., Henri, R., Wanpen, W., & Lambert, B. (2019). Impact of biochar application dose on soil microbial communities associated with rubber trees in North East Thailand. *Science of The Total Environment*, 970-979.
- Lehmann, J., Kern, D., Glaser , B., & Woods, W. (2004). *Amazonian Dark Earths*.
- Lehmann, J., Rillig, M., Thies, J., Masiello, C., Hockaday, W., & Crowley, D. (2011). Biochar effects on soil biota – A review. *Soil Biology and Biochemistry*.
- Li, Y., Yang, Y., Shen, F., Tian, D., Zeng, Y., Zhang, Y., & Deng, S. (2019). Partitioning biochar properties to elucidate their contributions to bacterial and fungal community composition of purple soil. *Science of the Total Environment*, 1333-1341.
- Lizarazo, L., & Torres, M. (2006). Evaluación de grupos funcionales (ciclo del C,N,P) y actividad de la fosfatasa ácida en dos suelos agr´ricolas del departamento de Boyacá (Colombia). *Agronomia Colombiana*, 323-324.
- López Collado, J., Campo Alves, J., Valtierra Pacheco , E., Etchevers Barra, J., Escalante Rebolledo, A., Pérez Lopez , G., & Hidalgo Moreno , C. (2016). Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo. *Terra latinoamericana* , 367-382.

- Lozano, J., Montoya, J., & ARMBRECHT. (2015). Hongos formadores de micorrizas arbusculares y su efecto sobre la estructura de los suelos en fincas con manejos agroecológicos e intensivos. *Acta Agronómica*.
- Ludwig H, P., & Magalhães de Abreu, L. (s.f). Hongos del suelo saprófitos y patógenos de plantas. *Manual de biología de suelos tropicales*, 243-244.
- Luo, Y., Durenkamn, M., De Nobili, M., Lin, Q., Devonshire, B., & Brookes, P. (2013). Microbial biomass growth, following incorporation of biochars produced at 350 °C or 700 °C, in a silty-clay loam soil of high and low pH. *Soil Biology and Biochemistry*. 513-523.
- M. USECHE, Y., VALENCIA, H., & PEREZ, H. (2004). Caracterización de bacterias y hongos solubilizadores de fosfato bajo tres usos de suelo en el Sur del Trapecio Amazónico. *Acta Biológica Colombiana*.
- Mingyue, L., Jiachao, Z., Xiao, Y., Yaoyu, Z., Lihua, Z., Yuan, Y., . . . Qingyun, Y. (2021). Responses of ammonia-oxidizing microorganisms to biochar and compost amendments of heavy metals-polluted soil. *Journal of Environmental Sciences*, 263-272.
- Moratto, C., Martinez, L. J., Valencia, H., & Sánchez, J. (2005). Efecto del uso del suelo sobre hongos solubilizadores de fosfato y bacterias diazotróficas en el páramo de Guerrero (Cundinamarca). *Agronomía Colombiana*.
- Niroshika, K., Kyung, M., Deshani, A., Zhang, M., Hou, D., Oleszczuk, P., . . . Sik, Y. (2022). Biochar alters chemical and microbial properties of microplastic-contaminated soil. *Environmental Research*, 3-5.
- Olsen, L. (2014). *The Prokaryotes*. Springer .
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura FAO. (2015). *Estado Mundial del Reurso Suelo (EMRS)-Informe Técnico*. Roma: FAO.
- Palasooriya, K., Wong, J., Hashimoto, Y., Huang, L., Rinklebe, J., Chang, S., . . . Ok, Y. (2019). Response of microbial communities to biochar-amended soils: a critical review. *Biochar*. 1,3-22.
- Paz, J., Shenglei, F., Méndez, A., & Gásco, G. (2014). Interactive effects of biochar and the earthworm *Pontoscolex corethurus* on plant productivity and soil enzyme activities. 483-494.
- Pinzón, A. (2019). *Pseudomonas*. *Acta Medica Colombiana*, 52.
- Pinzón Junca, A. (2019). *Pseudomonas*. *Acta Médica Colombiana Vol. 44 N°1*, (pág. 51). Bogotá D,C .
- Qingming, Z., Sizhu, L., Muhammad, S., Yasir, A., & Jiabaihui, X. (2021). Biochar and earthworms synergistically improve soil structure, microbial abundance, activities and pyraclostrobin degradation. *Applied soil Ecology* .
- Ramírez, D., & Rojas, N. (2020). Influencia de la comunidad bacteriana en los ciclos biogeoquímicos del carbono y el nitrógeno en el ecosistema de manglar. *Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca*.
- Ruiz, E. (2019). Efecto del uso combinado de biochar y fertilizantes sobre la estabilización del carbono orgánico en suelos agrícolas semiáridos. 7-8.
- Ruiz, J. (2008). *Viaje al asombroso mundo de los hongos*. Mexico.

- Sánchez Reinoso, A., Ávila Pedraza , E., & Restrepo Díaz , H. (2019). Uso de biocarbón en la agricultura . *ACTA BIOLÓGICA COLOMBIANA* , 327-338.
- Scopus . (2021). *Scopus*. Obtenido de Scopus : <https://www-scopus-com.ucundinamarca.basesdedatosezproxy.com/term/analyzer.uri?sid=4ceb2cccff462b0fa621b3c5eed8cd78&origin=resultslist&src=s&s=TITLE-ABS-KEY%28biochar+and+microorganisms%29&sort=plf-f&sdt=b&sot=b&sl=41&count=1422&analyzeResults=Analyze+res>
- Scopus . (2021). *Scopus* . Obtenido de Scopus : <https://www-scopus-com.ucundinamarca.basesdedatosezproxy.com/term/analyzer.uri?sid=4ceb2cccff462b0fa621b3c5eed8cd78&origin=resultslist&src=s&s=TITLE-ABS-KEY%28biochar+and+microorganisms%29&sort=plf-f&sdt=b&sot=b&sl=41&count=1422&analyzeResults=Analyze+res>
- Scopus. (2021). *Scopus*. Obtenido de Scopus: <https://www-scopus-com.ucundinamarca.basesdedatosezproxy.com/term/analyzer.uri?sid=4ceb2cccff462b0fa621b3c5eed8cd78&origin=resultslist&src=s&s=TITLE-ABS-KEY%28biochar+and+microorganisms%29&sort=plf-f&sdt=b&sot=b&sl=41&count=1422&analyzeResults=Analyze+res>
- Scopus. (2021). *Scopus*. Obtenido de Scopus : <https://www-scopus-com.ucundinamarca.basesdedatosezproxy.com/term/analyzer.uri?sid=4ceb2cccff462b0fa621b3c5eed8cd78&origin=resultslist&src=s&s=TITLE-ABS-KEY%28biochar+and+microorganisms%29&sort=plf-f&sdt=b&sot=b&sl=41&count=1422&analyzeResults=Analyze+res>
- Scopus. (2021). *Scopus*. Obtenido de Scopus: <https://www-scopus-com.ucundinamarca.basesdedatosezproxy.com/term/analyzer.uri?sid=4ceb2cccff462b0fa621b3c5eed8cd78&origin=resultslist&src=s&s=TITLE-ABS-KEY%28biochar+and+microorganisms%29&sort=plf-f&sdt=b&sot=b&sl=41&count=1422&analyzeResults=Analyze+res>
- Sheng , Y., & Zhu , L. (2018). Biochar alters microbial community and carbon sequestration potential across different soil pH. *Science of The Total Environment*, 1391-1399.
- SIAC . (s.f.). *Sistema de Información Ambiental de Colombia*. Obtenido de Sistema de Información Ambiental de Colombia: <http://www.siac.gov.co/sueloscolombia>
- Suliman , W., Harsh , J., Abu-Lail , N., Fortuna , A., Dallmeyer , I., & Garcia , M. (2017). The role of biochar porosity and surface functionality in augmenting hydrologic properties of a sandy soil. *Science of the total Environment*, 139-147.
- Tian , j., Wang, J., Dippold , M., Gao, Y., Blagodatskaya, E., & Kuzyakov, Y. (2016). Biochar affects soil organic matter cycling and microbial functions but does not alter microbial community structure in a paddy soil. *Science of The Total Environment*, 89-97.
- Torres , J., Gutierrez, J., & Beltran , H. (2017). Compactación, Una de las causas más comunes de la degradación del suelo. *REVISTA DE LA FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS*, 18-22.
- Ullah Haider, F., Coulter, J., Alam Cheema, S., Farooq, M., Wu, J., Zhang, R., . . . Liqn, C. (2021). Co-application of biochar and microorganisms improves soybean performance and remediate cadmium-contaminated soil. *Ecotoxicology and Enviromental Safety*.

- Vallejo , M., Bonilla C, C., & Castilla, L. (2007). Evaluación de la asociación de bacterias fijadoras de nitrógeno - líneas interespecífica de arroz- nitrógeno en Typic haplustalf. Ibagué Colombia. *Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal* .
- Verheijen, F., Jeffery, S., Bastos , A., Van der velde , M., & Diafas , I. (2010). Biochar Application to Soils. 4-166.
- Viteri , P., Castillo, D., & Viteri , S. (2015). Capacidad y diversidad de bacterias celulolíticas aisladas de tres hábitats tropicales en Boyacá, Colombia. *Biodiversidad y Servicios Ecosistémicos*, 363-364.
- Wang , J., Shi , L., Zhai, L., Zhang , H., Wang , S., Zou, J., & Shen , Z. (2011). Analysis of the long-term effectiveness of biochar immobilization remediation on heavy metal contaminated soil and the potential environmental factors weakening the remediation effect: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*.
- Wang, Y., Li, W., Du, B., & Li, H. (2021). Effect of biochar applied with plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) on soil microbial community composition and nitrogen utilization in tomato. *Pedosphere* Volume 31, Issue 6, 872 - 881.
- Wong , J., & Oghonnaya, U. (2021).). Biochar porosity: a nature-based dependent parameter to deliver microorganisms to soils for land restoration. *Environmental Science and Pollution Research*, 46894-46909.
- Xiaomin, Z., & Baoliang, C. (2017). Effects and mechanisms of biochar-microbe interactions in soil improvement and pollution remediation: A review. *Environmental Pollution*, 98-115.
- Xu, N., Tan G, Wang , H., & Gai, X. (2016). Effect of biochar additions to soil on nitrogen leaching, microbial biomass and bacterial community structure. 74; 1-8.
- Xu, N., Tan, G., Wang , H., & Gai, X. (2016). Effect of biochar additions to soil on nitrogen leaching, microbial biomass and bacterial community structure. 74: 1-8.
- Xu, N., Tan, G., Wang, H., & Gai, X. (2016). Effect of biochar additions to soil on nitrogen leaching, microbial biomass and bacterial community structure. 74: 1-8.
- Yu , M., Su , W., Huang , L., Parikh , S., Tang , C., Dahlgren , R., & Xu , J. (2021). Bacterial community structure and putative nitrogen-cycling functional traits along a charosphere gradient under waterlogged conditions. *Soil Biology and Biochemistry* Volume 162.
- Zhu, X., Chen, B., Zhu , L., & Xing, B. (2017). Effects and mechanisms of biochar-microbe interactions in soil improvement and pollution remediation: A review. *Environmental Pollution* , 277,98-115.

Gul, S., Whalen, J.K., Thomas, B.W., Sachdeva, V., Deng, H. (2015). Physico-chemical properties and microbial responses in biochar-amended soils: mechanisms and future directions. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 206, 46–59. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.03.015>

Li, Y., Yang, Y., Shen, F., Tian D., Zeng, Y., Zhang, Y., Deng, S (2019). Partitioning biochar properties to elucidate their contributions to bacterial and fungal community composition of purple soil. *Science of the Total Environment*, 648, 1333–1341. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.222>

ANEXOS

Ecuaciones de búsqueda para la identificación de microorganismos presentes en suelos agrícolas de Colombia.

Nombre base de dato y/o entidad	Ecuación de búsqueda	Filtro Rango de años
Google académico	Microorganismos and suelo and Colombia	2015-2022
Google académico	Microorganismos and agrícola and Colombia	2015-2022
Google académico	Microorganismos and agrícola or Colombia	2015-2022
Google académico	Microorganismos or agrícola and Colombia	2015-2022
Google académico	identificación and microorganismos and suelo and Colombia	2015-2022
Google académico	Identificación and microorganismos and suelo or Colombia	2015-2022
Google académico	Identificación or microorganismos and suelo and Colombia	2015-2022
Google académico	Identificación and microorganismos and agrícola and Colombia	2015-2022
Google académico	Identificación and microorganismos and agrícola or Colombia	2015-2022
Google académico	Identificación and bacterias and Colombia	2015-2022
Google académico	Identificación or bacterias and Colombia	2015-2022
Google académico	Bacterias and suelo and Colombia	2015-2022

Google académico	Bacterias and suelo or Colombia	2015-2022
Google académico	Bacterias or suelo and Colombia	2015-2022
Google académico	Suelo and bacterias or Colombia	2015-2022
Google académico	Suelo or bacterias and Colombia	2015-2022
Google académico	Bacterias or agrícola and Colombia	2015-2022
Google académico	Bacterias and agrícola or Colombia	2015-2022
Google académico	Bacterias and agrícola and Colombia	2015-2022
Google académico	Bacterias and agrícola and Colombia	2015-2022
Google académico	Identificación and hongos and Colombia	2015-2022
Google académico	Identificación or hongos and Colombia	2015-2022
Google académico	Hongos and suelo and Colombia	2015-2022
Google académico	Hongos and suelo or Colombia	2015-2022
Google académico	Hongos or suelo and Colombia	2015-2022
Google académico	Suelo and hongos or Colombia	2015-2022
Google académico	Suelo or hongos and Colombia	2015-2022
Google académico	Hongos or agrícola and Colombia	2015-2022
Google académico	Hongos and agrícola or Colombia	2015-2022

Google académico	Hongos and agrícola and Colombia	2015-2022
Google académico	Hongos and agrícola and Colombia	2015-2022
Google académico	Identificación and virus and Colombia	2015-2022
Google académico	Identificación or virus and Colombia	2015-2022
Google académico	Virus and suelo and Colombia	2015-2022
Google académico	Virus and suelo or Colombia	2015-2022
Google académico	Virus or suelo and Colombia	2015-2022
Google académico	Suelo and virus or Colombia	2015-2022
Google académico	Suelo or virus and Colombia	2015-2022
Google académico	Virus or agrícola and Colombia	2015-2022
Google académico	Virus and agrícola or Colombia	2015-2022
Google académico	Virus and agrícola and Colombia	2015-2022
Google académico	Virus and agrícola and Colombia	2015-2022

Ecuaciones de búsqueda para la identificación de la interacción del biochar con los microorganismos del suelo

Nombre base de dato y/o entidad	Ecuación de búsqueda	Filtro Rango de años
Scopus – ScienceDirec	Biochar and microorganisms	2015-2022
Scopus – ScienceDirec	Biochar or microorganisms	2015-2022
Scopus– ScienceDirec	Biochar and effects and microorganisms	2015-2022
Scopus – ScienceDirec	Biochar or interaction and microorganisms and soil	2015-2022
Scopus– ScienceDirec	Biochar and interaction and microorganisms	2015-2022
Scopus– ScienceDirec	Biochar and microorganisms and soil	2015-2022
Scopus– ScienceDirec	Biochar or microorganisms and soil	2015-2022
Scopus– ScienceDirec	Biochar and bacterium and soil	2015-2022
Scopus– ScienceDirec	Biochar or bacterium and soil	2015-2022
Scopus– ScienceDirec	Biochar and effects and bacterium	2015-2022
Scopus– ScienceDirec	Biochar or effects and bacterium	2015-2022
Scopus– ScienceDirec	Biochar and effects and bacterium and soil	2015-2022
Scopus– ScienceDirec	Biochar or interaction and bacterium	2015-2022
Scopus– ScienceDirec	Biochar and interaction and bacterium	2015-2022
Scopus– ScienceDirec	Biochar and interaction and bacterium and soil	2015-2022
Scopus– ScienceDirec	Biochar or interaction and bacterium and soil	2015-2022

Scopus– ScienceDirec	Biochar and fungus and soil	2015-2022
Scopus– ScienceDirec	Biochar or fungus and soil	2015-2022
Scopus– ScienceDirec	Biochar and effects and fungus	2015-2022
Scopus– ScienceDirec	Biochar or effects and fungus	2015-2022
Scopus– ScienceDirec	Biochar and effects and fungus and soil	2015-2022
Scopus– ScienceDirec	Biochar or interaction and fungus	2015-2022
Scopus– ScienceDirec	Biochar and interaction and fungus	2015-2022
Scopus– ScienceDirec	Biochar and interaction and fungus and soil	2015-2022
Scopus– ScienceDirec	Biochar or interaction and fungus and soil	2015-2022
Scopus– ScienceDirec	Biochar and virus and soil	2015-2022
Scopus– ScienceDirec	Biochar or virus and soil	2015-2022
Scopus– ScienceDirec	Biochar and effects and virus	2015-2022
Scopus– ScienceDirec	Biochar or effects and virus	2015-2022
Scopus– ScienceDirec	Biochar and effects and virus and soil	2015-2022
Scopus– ScienceDirec	Biochar or interaction and virus	2015-2022
Scopus– ScienceDirec	Biochar and interaction and virus	2015-2022
Scopus– ScienceDirec	Biochar and interaction and virus and soil	2015-2022

Scopus– ScienceDirec	Biochar or interaction and virus and soil	2015-2022
----------------------	---	-----------