



FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**Aplicación Integrada de Biocarbón con Microorganismos y
Nutrientes Vegetales para la Remediación de Metales Traza en
Suelos Agrícolas: Revisión sistemática**

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
Ingeniero Ambiental

AUTORES:

Gabulle Gamarra, Ronaldo Stefano (orcid.org/0000-0002-9069-6923)

Ramirez Bardales, Marcos Daniel (orcid.org/0000-0001-7663-9925)

ASESOR:

Dr. Espinoza Farfan, Eduardo Ronald (orcid.org/0000-0003-4418-7009)

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Tratamiento y Gestión de los Residuos

LÍNEA DE RESPONSABILIDAD SOCIAL UNIVERSITARIA:

Desarrollo sostenible y adaptación al cambio climático

LIMA – PERÚ

2022

DEDICATORIA

A nuestras familias, especialmente a nuestros padres y madres por habernos forjado como personas de bien con valores únicos; muchos de nuestros logros se los debemos a ustedes. Nos han educado con disciplina y esfuerzo, debido a ello, nos motivaron constantemente para alcanzar nuestros anhelos y metas. Nada de esto hubiera sido posible sin ustedes.

AGRADECIMIENTO

Agradecer en primer lugar a Dios, por bendecirnos con buena salud y cuidar cada uno de nuestros pasos. A nuestros padres agradecerles por todo su esfuerzo y apoyo hacia nosotros durante este proceso. Por último, agradecer al Dr. Yimi Tom Lozano Sulca por su asesoramiento en el logro de la culminación de nuestra tesis.

Índice de contenidos

Carátula	i
Dedicatoria.....	ii
Agradecimiento.....	iii
Índice de contenidos	iv
Índice de tablas.....	v
Índice de gráficos y figuras.....	vi
Resumen.....	vii
Abstract.....	viii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. MARCO TEÓRICO	4
III. METODOLOGÍA	14
3.1. Tipo y diseño de investigación	14
3.2. Categoría, subcategoría y matriz de categorización.....	14
3.3. Escenario de estudio	14
3.4. Participantes	15
3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	15
3.6. Procedimiento	15
3.7. Rigor científico	17
3.8. Método de análisis de información	17
3.9. Aspectos éticos.....	18
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	19
V. CONCLUSIONES	30
VI. RECOMENDACIONES.....	31
REFERENCIAS	
ANEXOS	

Índice de tablas

<i>Tabla 1. Efectos de la aplicación del biocarbón</i>	19
<i>Tabla 2. Efectos de la aplicación del biocarbón y microorganismos</i>	25
<i>Tabla 3. Efectos de la aplicación del biocarbón y nutrientes</i>	27

Índice de gráficos

<i>Gráfico 1. Procedimiento de selección de artículos</i> -----	16
---	----

Índice de figuras

<i>Figura 1. Descripción general de la exposición de los seres humanos a los elementos traza a través de las vías de ingestión, absorción dérmica e inhalación</i> -----	10
<i>Figura 2. Aplicación de biocarbón al suelo contaminado con metales traza</i> -----	11
<i>Figura 3. Aplicación del biocarbón al suelo contaminado por múltiples metales</i> -----	12

Resumen

El presente trabajo tuvo como objetivo de estudio determinar cuáles son los efectos del biocarbón y la integración con microorganismos y nutrientes vegetales para la remediación de metales traza en suelos agrícolas. La metodología aplicada fue básica de diseño sistemático; donde se seleccionaron 31 estudios.

Los resultados mostraron que los efectos de la aplicación del biocarbón genera la regulación del desarrollo de antioxidantes bajo estrés; debido a que influye en la permeabilidad de las células, la absorción de metales y la captación en la planta al interactuar con las propiedades eléctricas de las actividades de la enzima y la membrana. Los efectos de la aplicación integrada de biocarbón y microorganismos es más exitosa ya que la modificación del biocarbón cambia el entorno microbiano, afecta activa o indirectamente los procesos metabólicos y varía la densidad y abundancia de los microorganismos del suelo. Los efectos de la aplicación integrada de biocarbón y nutrientes también ayuda al igual que la adición de microorganismos a reducir la gravedad de los metales traza en el suelo al restringir su absorción, ya que estos micronutrientes son transportados por el mismo canal de transporte en la membrana plasmática de las células de la raíz.

Palabras clave: biochar, remediación, suelo, microorganismos, nutrientes.

Abstract

The objective of this study was to determine the effects of biochar and its integration with microorganisms and plant nutrients for the remediation of trace metals in agricultural soils. The methodology applied was a basic systematic design; 31 studies were selected.

The results showed that the effects of biochar application generates the regulation of antioxidant development under stress; because it influences cell permeability, metal uptake and uptake in the plant by interacting with the electrical properties of enzyme and membrane activities. The effects of integrated application of biochar and microorganisms is more successful as biochar modification changes the microbial environment, actively or indirectly affects metabolic processes and varies the density and abundance of soil microorganisms. The effects of the integrated application of biochar and nutrients also helps as well as the addition of microorganisms to reduce the severity of trace metals in the soil by restricting their uptake, as these micronutrients are transported through the same transport channel in the plasma membrane of root cells.

Keywords: biochar, remediation, soil, microorganisms, nutrients.

I. INTRODUCCIÓN

La contaminación del suelo por elementos tóxicos (TEs) se encuentra considerado como un problema que trasciende en la mayoría de países causando preocupación en los seres humanos, por los dañando en la salud ingresando por las fuentes alimentarias; ya que, los TEs se encuentran presentes en el suelo de diversas maneras ya sea ingresando por acciones antropogénicas o naturales (Antoniadis V. et al., 2019, p.1).

Hay dos fuentes de ET, entre los elementos tóxicos se conocen dos formas de generación; antropogénica y natural, es decir, las naturales se encuentran compuestas por emisiones volcánicas, transporte de polvo y la meteorización de rocas que presentan una gran cantidad de metales (Chen X. et al., 2020, p.2). También están las generadas por prácticas mineras, el uso de productos químicos, el generado por el proceso de combustibles fósiles, así como los aparatos eléctricos o electrónicos. (Kong F. et al., 2021, p.1).

Dichos componentes presentes en el suelo son los considerados metales traza (MT); dentro de los cuales se puede señalar al Zn, Pb, Cr, Cd, Ni y Cu (Ali Amjad et al., 2021, p.1). Además, la presencia de TM en el medio ambiente marca una huella específica debido a su naturaleza no biodegradable (Brtnicky M. et al., 2020, p.3).

Estos contaminantes se encuentran considerados como uno de los mayores problemas a tratar con respecto a su presencia en las tierras agrícolas, pudiendo señalar entre los tantos a Australia, América, Europa y países asiáticos (Ahmad Munir et al., 2019, p.1). Encontrándose MTs como el ion Cd, Pb y Ni que al unirse a los grupos sulfhidrido (-SH), en los aminoácidos y proteínas generan toxicidad para las plantas, donde como consecuencia se genera la obstrucción de la actividad fisiológica de la planta y la muerte de la estructura de la enzima. (Abbas T. et al., 2018, p.4).

Como consecuencia la contaminación por MT en el suelo de las tierras de cultivo no solo afectará negativamente al ecosistema del suelo, sino que también dañará potencialmente la salud humana (Wang Juan et al., 2019, p.2). Ello debido a que, al ingresar los MT a la capa superior del suelo, ingresan a los cuerpos por inhalación, ingestión y contacto dérmico afectando de manera negativa la salud humana (Khan Shamshad et al., 2021, p.1).

Por tales motivos se tiene la necesidad de encontrar tecnologías enfocadas en la sostenibilidad y que sean viablemente aplicables; con el fin de sumar en la acción de recuperar suelos a gran escala a nivel mundial (Alipour Mohammadreza et al., 2021, p.1). Ante lo cual, una de las principales estrategias que viene siendo valorada es el proceso de estabilización, consiguiéndose con la adición de cal, cenizas volantes de carbón, cemento y otros materiales adsorbentes para garantizar la seguridad a largo plazo de los contaminantes presentes en el terreno (Shen Z. et al., 2018, p.2).

Ante la realidad problemática presentada a nivel mundial se elaboró la siguiente pregunta: ¿Cuáles son los efectos del biocarbón y la integración con microorganismos y nutrientes vegetales para la remediación de metales traza en suelos agrícolas?

Así mismo se elaboraron los siguientes problemas específicos:

PE1: ¿Cuáles son los efectos de la aplicación del biocarbón en la remediación de suelos expuestas bajo estrés por metales traza?

PE2: ¿Cuáles son los efectos de la aplicación integrada de biocarbón y microorganismos en la remediación de suelos expuestos a metales traza?

PE3: ¿Cuáles son los efectos de la aplicación integrada de biocarbón y nutrientes en la remediación de suelos expuestos a metales traza?

Además, se elaboró el siguiente objetivo de estudio: Determinar cuáles son los efectos del biocarbón y la integración con microorganismos y nutrientes vegetales para la remediación de metales traza en suelos agrícolas.

Para resolver dicho objetivo se plantearon los siguientes objetivos específicos:

OE1: Clasificar cuáles son los efectos de la aplicación del biocarbón en la remediación de suelos expuestas bajo estrés por metales traza

OE2: Definir cuáles son los efectos de la aplicación integrada de biocarbón y microorganismos en la remediación de suelos expuestos a metales traza

OE3: Definir cuáles son los efectos de la aplicación integrada de biocarbón y nutrientes en la remediación de suelos expuestos a metales traza

Este estudio busca cubrir diversos enfoques mediante la aplicación del biocarbón para limpiar el suelo contaminado, buscando la reducción o consiguiendo el control de los peligros que se generan por la contaminación del suelo. Para lo cual se realizará una revisión sistemática de diversas literaturas actuales a nivel mundial, presentando una justificación teórica.

Así mismo, es debido señalar que el fin con el que se elabora el presente estudio es el de ampliar los conocimientos de los lectores acerca de la aplicación del biocarbón mediante la integración de otras enmiendas; siendo dirigido este trabajo a las personas interesadas en la mejora de la producción agrícola.

II. MARCO TEÓRICO

Mediante la búsqueda de desarrollar el problema de estudio sobre los efectos del biocarbón y la integración con microorganismos y nutrientes vegetales para el tratamiento de eliminación de Mts en suelos agrícolas se realizó la búsqueda de diversos estudios a nivel mundial aplicando el biocarbón con microorganismos y nutrientes vegetales; por lo cual se muestra a continuación los antecedentes más resaltantes:

Xia Hao et al., (2019, p.1); tuvo como objetivo investigar el efecto del biocarbón en las propiedades fisicoquímicas del suelo y explorar el efecto del biocarbón en la sustitución del fertilizante potásico en suelos ácidos. Por lo tanto, en su estudio metodológico llevó a cabo un experimento colocando dos tipos de suelo en una maceta; siendo el suelo A un suelo rojo y suelo B un suelo amarillo-marrón. En primera instancia, el suelo ácido con biocarbón impidió considerablemente que las plantas crezcan, además inhibió que se acumule biomasa en la col, y la presencia de biochar ayudó a los parámetros de crecimiento y a la acumulación del contenido de nutrientes en las partes de la planta. Biochar sustituyó completamente el fertilizante potásico en suelo rojo y hasta un 20 % del fertilizante potásico en suelo amarillo-marrón. Biochar aumentó el pH en 1.3⁺ en suelo rojo y suelo amarillo-marrón de 2694.71, 538.29 mg kg⁻¹ a 1170.58, 412.82 mg kg⁻¹ respectivamente. El contenido de Al en la hoja se redujo de 3879.6 a 614.65 µg g⁻¹ en suelo rojo. En total, se puede llegar a la conclusión que el suelo enmendado con biocarbón podría aumentar el estado nutricional y mejorar la productividad del repollo al aliviar la toxicidad del aluminio del suelo y sustituir el fertilizante potásico a corto plazo.

Younis Uzma et al., (2016, p.2); tiene como objetivo estudiar el papel del biocarbón de palo de algodón para la absorción de Cd así como fotosintéticas, fisiológicas y bioquímicas de espinaca (*Spinacia oleracea*) en cultivos presentes con Cd; a su vez el suelo presenta una concentración de 0, 25, 50, 75 y 100 mg Cd kg⁻¹. Los resultados mostraron que al presentar una concentración alta de Cd generó que el crecimiento disminuya, también afectó el pigmento, las características de intercambio de gases y los contenidos de aminoácidos y proteínas en plántulas de espinaca de 52 días de edad. La aplicación de BC incrementó y ayudó con los efectos tóxicos del Cd en las plantas de espinaca.

Abbas Tahir et al., (2018, p.1); realizó un estudio de cultivo de suelo para estudiar la aplicación del BC en trigo (*Triticum aestivum*L.) crecimiento, biomasa y reducción de la absorción de Cd y Na cosechados en un suelo con características salinas contaminado con Cd. Es así como la salinidad de la tierra redujo que las plantas crezcan, así también la biomasa, el rendimiento y la producción de los granos, el contenido de clorofila y los parámetros de intercambio de gases y generó daños oxidativos en las plantaciones a diferencia del estrés por Cd solamente. El estrés salino incrementó la absorción de Cd y Na y disminuyó la absorción de potasio (K) y zinc (Zn) por parte de las plantas. El Cd extraíble con AB-DTPA y la conductividad eléctrica del suelo (ECe) incrementaron por estrés salino a diferencia de un suelo sin estrés por NaCl. Por ello, la aplicación de biocarbón ayudó a que crezcan las plantas y redujo la absorción de Cd y Na, a excepción de las plantas que se les aplicó una concentración mayor de BC y estrés salino (5,0 % de BC + 50 mM de NaCl).

Ur Rehman M. et al., (2020, p.1); en su estudio abordó los efectos a largo plazo de las enmiendas orgánicas en suelos contaminados mediante el estudio de sus efectos residuales en la tercera cosecha (trigo) en la secuencia. Inicialmente seis enmiendas orgánicas a saber biocarbón de cáscara de arroz (RHB), de paja de trigo (WSB), de algodón (CSB), estiércol de aves (PM), lodo de prensa (PrMd) y estiércol de granja (FM) se aplicaron una vez a una tasa del 2% en Cd (50 mg kg^{-1}) suelo contaminado con rotación trigo-arroz. Después de la cosecha de trigo y arroz, se volvió a cultivar trigo (Var. Galaxy) en las mismas macetas. Los resultados revelaron que las plantas cultivadas bajo estrés por Cd (sin ninguna enmienda) contienen más tejido (raíz, brote y grano) y Cd extraíble AB-DTPA del suelo. El suelo enmendado con RHB ha mostrado el Cd extraíble AB-DTPA más bajo (69% más bajo que el control). De manera similar, la aplicación de RHB ha reducido significativamente las concentraciones de Cd en raíces, brotes y granos de trigo en comparación con el control y otras enmiendas. Los resultados han confirmado la efectividad de los contenidos residuales de RHB como una enmienda activa para la restricción de Cd en un grupo de suelo no biodisponible y un mejor crecimiento y rendimiento del trigo.

Ali Shafaqat et al., (2018, p.1); realizó un estudio para explorar el papel del biocarbón en el manejo de la toxicidad de Cr en *Brassica rapa* L. Tres niveles de biocarbón (0, 1 y 2 %) junto con los tres niveles de Cr (0, 100 y 500 μM) se utilizaron en el experimento seguido de un diseño completamente al azar. El estrés Cr en *B. rapa* las

plantas redujeron la fotosíntesis e indujeron el daño oxidativo que resultó en la reducción del crecimiento de las plantas. La aplicación de biochar redujo notablemente los impactos negativos de Cr en los atributos fisicoquímicos de las plantas bajo estrés de Cr y mejoró significativamente la producción de biomasa. La aplicación de biocarbón también redujo las concentraciones de Cr en las plantas, lo que podría ser eficaz para reducir su entrada en la cadena alimentaria. Donde, se concluye que la aplicación de biocarbón en suelos contaminados con Cr podría ser una buena práctica para manejar el estrés por Cr en las plantas.

Sehrish Adiba K. et al., (2019, p.1); en su estudio investigó el efecto del biocarbón de la basura avícola (PLB) en la biodisponibilidad de Cr y su acumulación en espinacas cultivadas en suelo contaminado con Cr. Los datos mostraron una disminución significativa en la concentración de Cr biodisponible (extracción con DTPA) con una concentración creciente de biocarbón, especialmente a una tasa de aplicación del 5 % en el suelo. Con la aplicación de 3% y 5% de PLB, la concentración de Cr en los brotes significativamente ($P < 0.05$) disminuyó en un 32% y 49%, respectivamente, sobre el control. Los resultados mostraron que PLB mejoró significativamente el crecimiento de la planta y la biomasa sobre el control. Bajo estrés con Cr, la adición de PLB aumentó las actividades de catalasa y superóxido dismutasa mientras disminuyó las concentraciones de malondialdehído y peróxido de hidrógeno en comparación con el control.

Turan Veysel et al., (2018, p.2); en su trabajo de investigación demuestra la reducción de la toxicidad del níquel (Ni) y la mejora de la biodisponibilidad del zinc (Zn) de las semillas de girasol con la aplicación de biocarbón (BC) y quitosano (CH) en suelos contaminados con Ni. El pH del suelo del experimento se ajustó a un valor de 6,5 antes de su uso en un experimento de invernadero. El suelo contaminado con Ni acidificado se modificó con Zn (4 mg kg^{-1} de suelo), mientras que BC y CH, solos [1 % cada uno (p/p)] y en combinación [0,5 % cada uno (p/p)], se utilizaron como agentes inmovilizadores de Ni. Se encontraron concentraciones significativamente más altas de Zn en semillas que recibieron ZnSO₄tratos. Sin embargo, estos resultados fueron más pronunciados en el tratamiento (Zn+CH+BC) donde se aplicaron juntos Zn, CH y BC. El tratamiento Zn+CH+BC mejoró los parámetros de calidad de la semilla, las relaciones molares de fitato/minerales, aumentó el peso de la semilla (por maceta) hasta en un 75 %, Fe en un 41 %, Zn en un 42 % en la semilla,

mientras que redujo la concentración de Ni hasta en un 17 % en la semilla, sobre control.

Shahbaz Ali K. et al., (2018, p.1); en su estudio presumió que la aplicación de biocarbón miscanthus (BC) y zeolita catiónica (ZE) en diversas proporciones en un suelo contaminado con Ni puede inmovilizar eficientemente el Ni y reducir su biodisponibilidad para el girasol (*Helianthus annuus* L.) y el maíz (*Zea mays* L.). Para lo cual, un suelo contaminado con efluentes de galvanoplastia se modificó con BC y ZE, como tratamientos únicos (2% p/p) y sus combinaciones de varias proporciones (BC, ZE, BC25%ZE75%, BC50%ZE50% y BC75%ZE25%) para la inmovilización de Ni en el suelo. Además, los efectos asociados de estos tratamientos sobre el Ni residual y extraíble con DTPA del suelo; concentraciones de Ni en brotes, raíces y granos; Se investigaron el crecimiento, la fisiología, la bioquímica y los mecanismos de defensa antioxidante del girasol y el maíz. Los resultados revelaron que el tratamiento BC50%ZE50% redujo eficientemente el Ni extraíble con DTPA en el suelo, las concentraciones de Ni en brotes, raíces y granos, al tiempo que mejoró los parámetros selectivos de ambas plantas. Curiosamente, el tratamiento BC75%ZE25% incrementó significativamente la biomasa, el rendimiento de grano, la fisiología, la bioquímica y la maquinaria de defensa antioxidante, al tiempo que disminuyó el estrés oxidativo del Ni tanto en girasol como en maíz, en comparación con el resto de los tratamientos.

Kiran Boda R. et al., (2019, p.1); mediante su trabajo realizaron experimentos en macetas para evaluar la eficacia del biocarbón de *Prosopis* y la ceniza de cáscara de arroz para el crecimiento de las plantas y la mitigación de la translocación de Pb en *Ricinus communis*. En primer lugar, se llevó a cabo la caracterización fisicoquímica, donde se utilizó el peso seco de las enmiendas. Las plántulas de *R.communis* se cultivaron en 0, 400 y 800 mg/kg Pb de suelo enriquecido modificado con biocarbón de *Prosopis juliflora* (PJB) y ceniza de cáscara de arroz (RHA) al 0, 2,5 % y 5 % (p/p) del suelo en un periodo de 60 días. Donde, la adición de biocarbón y la enmienda de ceniza de cáscara de arroz al suelo incrementó el nivel de tolerancia al Pb en *R.communis*. También, la modificación con biocarbón incrementó cuatro parámetros de crecimiento de la especie (altura, diámetro de la hoja, nudos y número de hojas), proteína (72 %) y contenido de clorofila (38–52 %), al igual que RHA en menor medida (aumento de 10 a 31% en clorofila y 77% de

contenido de proteína) en comparación con las plantas no enmendadas. Concluyendo que, el uso del suelo de RHA presentó una mayor reducción en la acumulación de Pb en la raíz, el brote y la hoja a diferencia del PJB, ya que, el tratamiento con PJB al 5 % redujo la acumulación de Pb en las raíces en un 59 %, mientras que RHA redujo la concentración de Pb en las raíces en un 87 %.

Turan Veysel, (2020, p.1); realizó un estudio en el que tiene como objetivo inmovilizar y disminuir de manera eficiente el Pb; donde incorporó fosfato dicálcico (DCP), polvo de cáscara de huevo (ESP) y biocarbón (BH) en diversas proporciones en un suelo afectado por Pb. Donde, para inmovilizar el plomo se presenta un suelo a utilizar bajo una concentración de Pb de 600 mg/kg que se le adicionó, posterior a ello se modificó con DCP, ESP y BH, bajo una concentración del 2%. Entre los objetivos se buscó observar los efectos de la adición sobre los tratamientos de Pb en las raíces y brotes de la espinaca; para ello, se observó la interacción de los tratamientos utilizados. Los resultados indicaron que con el tratamiento de DCPA 1% más BH al 1% se consiguió la extracción más alta, con un porcentaje de 66% para los brotes, 53% para las raíces y del 53% y la mayor reducción de Pb del 58% con el tratamiento de DTPA. Pero también, con el tratamiento DCP a 1% más BH a 1% se presentaron eficientes resultados, siendo el peso seco mostrado con este tratamiento, clorofila-a (Chl-a), clorofila-b (Chl-b) y contenido relativo de agua (RWC) en la zona aérea de la espinaca y en la raíz con porcentajes de 92 %, 121 %, 60 %, 65 % y 30 % a diferencia del tratamiento de control.

Ante los antecedentes mostrados, se describe la problemática del estudio mencionando a los metales traza; ya que, el elemento traza (TE) puede tener efectos tóxicos para las plantas y los humanos; por lo tanto, los países y organizaciones imponen límites máximos de regulación permisibles de sus concentraciones en los suelos (Sawut Rukeya et al., 2018, p.3).

Ante ello, las tierras cultivables, fuentes y bases de cosechas de productos alimentarios, así como actividades agrícolas (Moller Hanne et al., 2022, p.2). Con la creciente industrialización y crecimiento poblacional el incremento de los metales traza (MT) afecta cada vez a mayores áreas agrícolas, ingresando mediante la sedimentación atmosférica, regadío y otras vías; y es que, los metales traza se encuentran en las aguas residuales utilizadas para su riego (Li Kuangjia et al., 2018, p.1).

El nombre de elementos traza (ET) se les da colectivamente a los elementos químicos que se encuentran en concentraciones relativamente pequeñas en el suelo (con la excepción de Fe y Mn, que generalmente tienen contenidos totales relativamente altos) (Zeng Siyane t al., 2019, p.2). Dichos elementos pueden ser potencialmente dañinos para los organismos del medio ambiente si están presentes en altas concentraciones en el suelo (Haider Fasih U. et al., 2021, p.3).

Algunos de esos elementos también se denominan a menudo "metales pesados" debido a su densidad superior a 5 g cm^{-3} y su naturaleza metálica, y normalmente incluyen Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Pb, Sn, V y Zn (Wu wei et al., 2018, p.2). Algunos metaloides (por ejemplo, As, Sb) y los no metales (por ejemplo, Se), que tienen una densidad atómica baja, también pueden ser dañinos; de ahí la necesidad de un nombre colectivo para todos los TE (James R. et al., 2020, p.2).

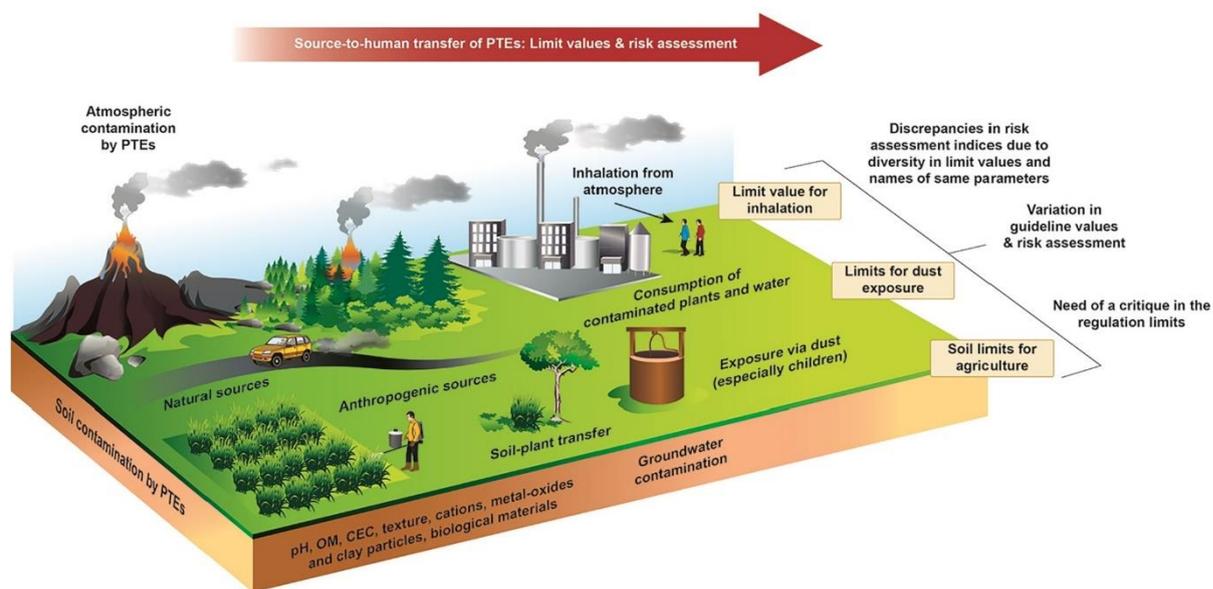
La aparición de TE en el medio ambiente puede derivarse de procesos geogénicos, así como de aportes antropogénicos (Bilal Muhammad et al., 2019, p.2). Sin embargo, está bien establecido que los ET se acumulan en su mayoría en el suelo debido a las actividades industriales, mineras y agrícolas, así como a la disposición de desechos de fuentes comunales (Pourret O. y Bollinger J., 2017, p.2).

Se ha informado que varios MT, como Mo, Cu, Zn, Ni, Mn, Co, Se y Cr, tienen funciones metabólicas esenciales en los organismos vivos (Liu Guannan et al., 2018, p.2). Sin embargo, estos elementos y aquellos que no tienen una función biológica esencial (p. ej., Zr, Sb, As, Pb, Hg y Cd) pueden influir negativamente en los rasgos bioquimiomorfológicos de microbios, plantas, animales y seres humanos más allá de su nivel crítico de exposición en medios ambientales (Rinklebe J. et al., 2019, p.4).

La presencia de trazas de metales en la fase sólida es parcialmente el resultado de la adsorción a los componentes del suelo, un proceso dictado por el pH, la concentración de metales y otras propiedades del suelo y la solución (Suliman W. et al., 2016, p.1).

Como consecuencia existe la exposición de los seres humanos a TE por las vías de ingestión, absorción dérmica e inhalación de partículas de suelo transportadas por el aire, como se observa en la figura 1.

Figura N°1: Descripción general de la exposición de los seres humanos a los elementos traza a través de las vías de ingestión, absorción dérmica e inhalación



Fuente: Extraído de Antoniadis Vasileios et al., 2019

La disponibilidad de los ET abarca las características del suelo y de la planta que afectan los mecanismos que operan tanto en el exterior (exudados de raíces) como en el interior del cuerpo de la planta (gobernado por procedimientos selectivos de absorción y translocación).

Por tal motivo la seguridad alimentaria y la evaluación de riesgos para la salud de los TE han recibido una atención considerable en todo el mundo debido a su naturaleza tóxica y su posible transferencia en la cadena alimentaria humana (Antoniadis V. et al., 2017, p.3).

Entre los efectos; los metales traza presentes en los alimentos pueden tener un significado nutricional o toxicológico y, en el caso de ciertos metales, por ejemplo, el cobre y el zinc, ambos (Rehaman Rabia A. et al., 2018, p.3). Además, algunos MTs al ser unidos con algunos iones metálicos forman una alta toxicidad que llevan a las plantas a presentar problemas en la inhibición de la actividad fisiológica y eliminación en la estructura de la enzima (Adress M. et al., 2016, p.2).

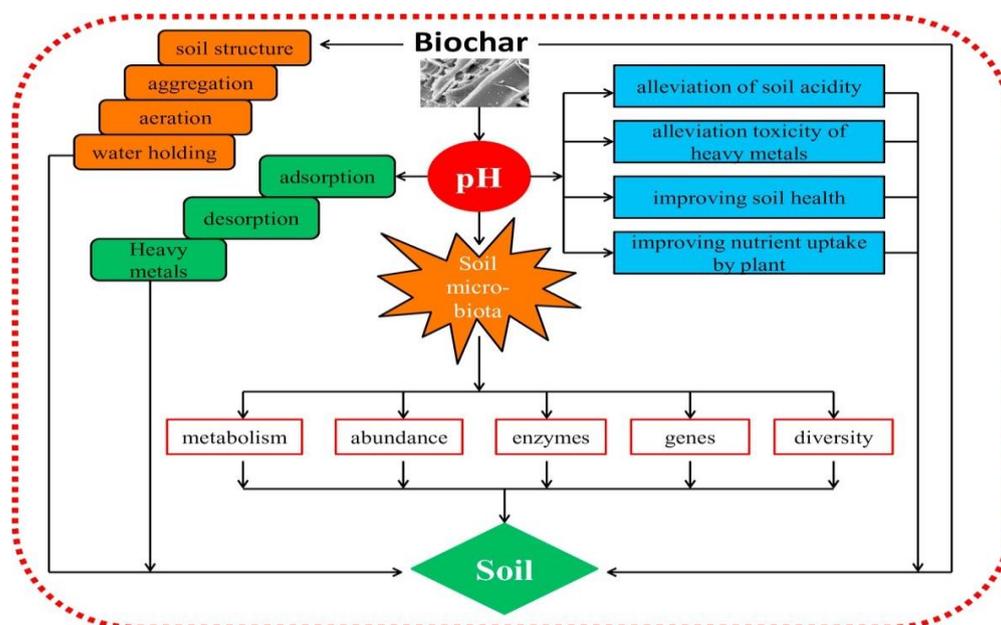
A causa de ello, muchas plantas desarrollan una característica específica ocasionada por el estrés metálico, donde la generación de especies de oxígeno reactivo (ROS) y/o radicales de iones de hidroxilo se forman (Zhang Fengge et al., 2019, p.2).

Y es que, la naturaleza terca de estos contaminantes daña la vida del ser humano, la flora y el medio ambiente (Kapoor Dhriti S., 2015, p.2). Por lo tanto, se ha vuelto una importancia global encontrar o desarrollar un método de remediación de suelos contaminados, con la finalidad de conseguir que el ecosistema se mantenga saludable, así como el recurso suelo (Al Zawahreh K. et al., 2022, p.5).

Siendo, la principal forma de remediar del suelo el uso y aplicación de biochar (El naggar A. et al., 2019, p.1). Ya que, no solamente ayuda al desarrollo y productividad de las plantas, sino que, brinda protección de estas hacia cualquier daño que pueda generarse por la falta de agua, sequía y salinidad (Shaaban M. et al., 2018, p.2).

Demostrando el mecanismo y aplicación del biocarbón en un sueño agrícola contaminado metales traza mediante el diagrama presente en la figura 2.

Figura N°2: Aplicación de biocarbón al suelo contaminado con metales traza



Fuente: Extraído de Shaaban Muhammad et al., 2018

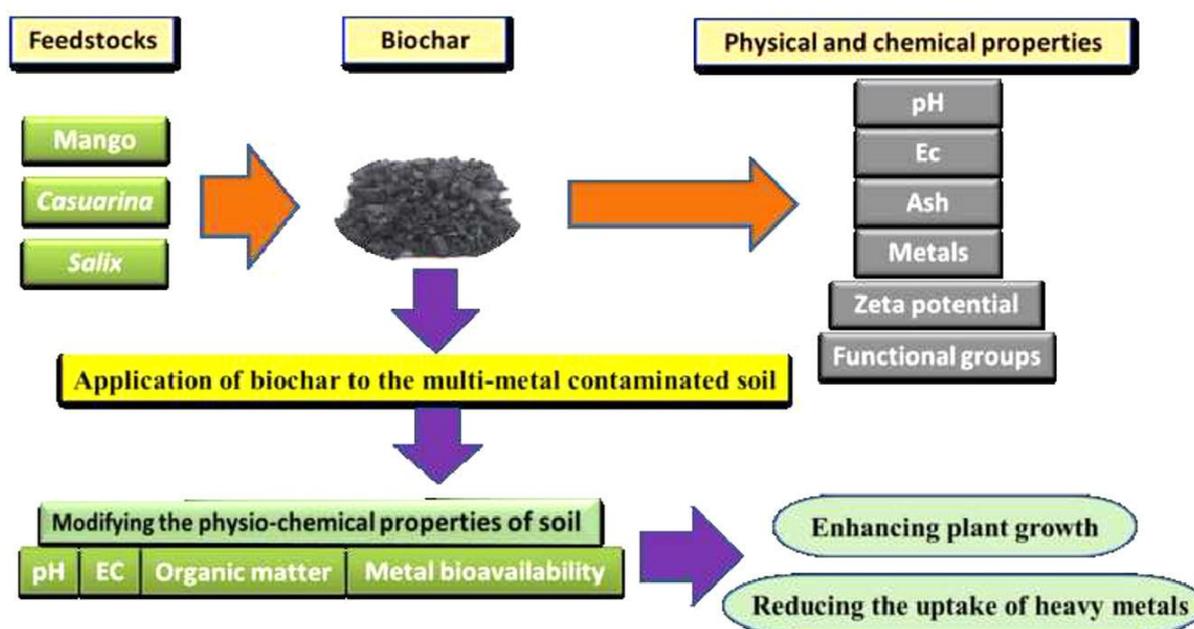
Y es que se ha recalcado que el uso del biocarbón brinda un enfoque rentable y menos perjudicial para el medio ambiente a diferencia de otras aplicaciones.

Siendo el biocarbón un producto generado a base de materia orgánica progenerado por un proceso térmico mediante el proceso de la pirólisis que somete a la biomasa pudiendo ser mediante presencia o ausencia de O₂, siendo ello llamado proceso anaeróbico o aeróbico (Gonzaga Maria I. et al., 2017, p.1). La pirólisis de la biomasa produce proporciones variables de CO₂, gases combustibles (H₂, CO, CH₄), aceites

volátiles, vapores alquitranados y un residuo sólido rico en carbono (biochar) (Tripathi Manoj et al., 2016, p.4).

Así lo confirma el estudio de Ibrahim Ehab A. et al., (2022, p.1); donde todas las aplicaciones de biochar incrementaron considerablemente el pH del suelo, la materia orgánica y la CE a diferencia de un suelo no tratado y como se observa en la figura 3 el biocarbón tiene un gran potencial como enmienda del suelo para aumentar la inmovilización de metales pesados, reducir la disponibilidad y la absorción de metales pesados por parte de las plantas y mejorar el crecimiento de las plantas en los suelos agrícolas.

Figura N°3: Aplicación del biocarbón al suelo contaminado por múltiples metales



Fuente: Extraído de Ibrahim Ehab A. et al., 2022

Además, una característica común del biocarbón es que su composición principal es a base de carbono orgánico aromático estable que no puede regresar fácilmente a la atmósfera; por la cual es considerado como un enfoque menos perjudicial al de otros tratamientos (Sun Xue et al., 2018, p.2).

El biocarbón proporciona oportunidades para almacenar carbono (C) en el suelo durante períodos mucho más largos en comparación con la biomasa no pirolizada (Shen Y. y Zhu L., 2018, p.3). La aplicación de biochar afecta a varias propiedades del suelo, como la conductividad eléctrica (CE), el pH, la capacidad de intercambio

catiónico (CEC), los niveles de nutrientes, porosidad, densidad aparente y las estructuras de la comunidad microbiana (Wang R. et al., 2018, p.2).

Como consecuencias, puede ocurrir cambios en las propiedades de la tierra agrícola, generando que el suelo se vuelva fértil y con ello traer consigo el incremento de producción agrícola y la mejora de los niveles de nutrientes; además, puede reducir la lixiviación de nitrógeno (N) (Zhu Xiaomin et al., 2017, p.3). El biocarbón también, altera las poblaciones microbianas del suelo al generar hábitats adicionales, cambiando en último momento los nutrientes en formas que se consideren disponibles para las plantas (Sheng y Zhu, 2018).

Además, el biochar puede disminuir la probabilidad de que se presenten contaminantes ambientales como orgánicos e inorgánicos de los suelos mediante la formación de complejos o a través del proceso de sorción de compuestos orgánicos como los herbicidas (Liu Zunqi et al., 2017, p.4).

III. METODOLOGÍA

3.1. Tipo y diseño de investigación

La presente investigación utilizó un tipo de investigación básica; siendo este descrito por Howard D. et al., (2016, p.23), como el reconocimiento visual y análisis de lecturas para la obtención de conocimientos; así mismo, esta ciencia implica teorías sobre el mundo, y de hecho el universo, que se consideran fundamentales para la comprensión humana. Además, hace inca pie al conocimiento que adquieren los científicos, utilizándolos para la elaboración de estrategias de investigación (Pomeroy c. y Sanfilippo F., 2016, p.179).

Por otro lado, los estudios de tipo revisión, se refieren a la búsqueda de estudios utilizando palabras clave para obtener estudios con la referencia buscada y recaudar amplias pruebas; así mismo, mediante la búsqueda de estudios se realizan etapas de inclusión o criterios mucho más amplios que permitan considerar diferentes diseños de investigación (Simasatitkul A. et al., 2013, p.5). Siendo el diseño de investigación empleado la sistemática; donde, en comparación con una revisión narrativa típica, una revisión sistemática pretende utilizar un diseño de investigación explícito y reproducible, garantizar la exhaustividad de la búsqueda bibliográfica y reducir el sesgo en la selección de los estudios (Sovacool B. et al., 2018, p.28).

3.2. Categoría y Subcategoría y matriz de categorización

Las categorías que se plantearon fueron; Efectos de la aplicación del biocarbón en la remediación de suelos, Efectos del uso de biocarbón y microorganismos y Efectos de del uso de la unión de biocarbón y nutrientes; siendo estas desprendidas de los objetivos específicos del estudio, así mismo las sub categorías por cada categoría fueron sub divisiones planteadas también por los tres objetivos. Ver anexo 1.

3.3. Escenario de estudio

El escenario de estudio al ser el lugar donde se realizan los estudios experimentales y al ser este un trabajo sistemático, se realizó la recolección de investigaciones experimentales y se consideró los escenarios que se encontraron descritos en los diversos artículos científicos estudiados; siendo los campus universitarios y laboratorios donde estos estudios describieron más.

3.4. Participantes

Debido a que este trabajo es una revisión, no se requiere de personajes o un grupo de personas involucradas, por el contrario, los participantes son las plataformas virtuales. Donde, los participantes que fueron elegidos en este trabajo fueron; Sciencedirect, Scopus y ResearchGate; siendo los responsables de la búsqueda y recolección de los estudios científicos añadidos al estudio.

3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

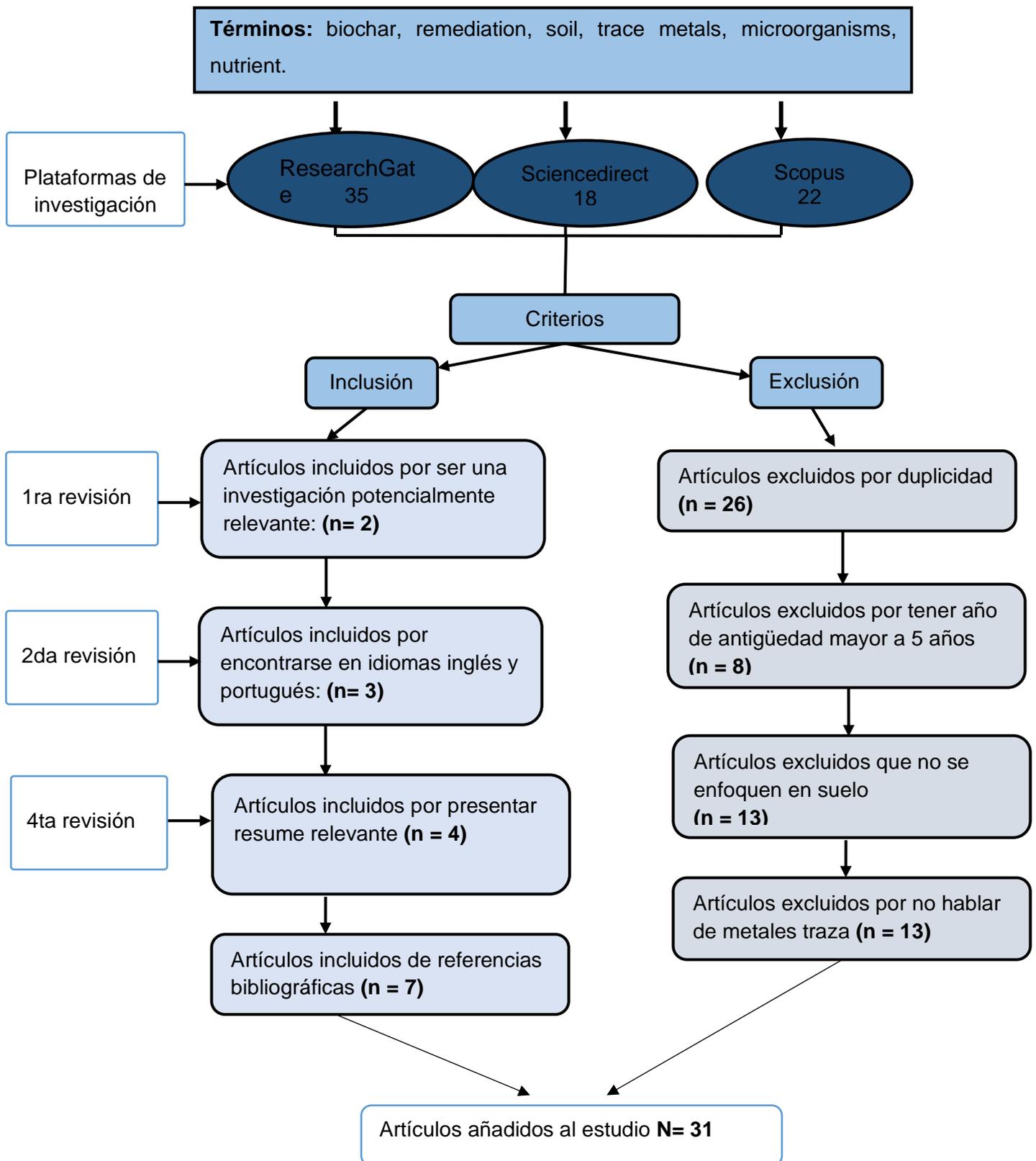
La técnica usada fue el método de análisis documental, el cual puede ser usada en estudios cualitativos o cuantitativos y al ser este un estudio sistemático permite seguir los pasos de la recolección, recogida y estudio de los documentos analizados.

Así mismo, esta técnica permite que el investigador pueda extraer información relevante del documento original para permitir facilitar su recuperación, esto mediante un proceso intelectual.

Ante lo expuesto, el instrumento de recolección de datos usados, fue la ficha propuesta encontrada en el anexo 2, ya que, permitió mediante la información plasmada la representación de documento original. Los datos que se piden detallar en el documento de la ficha de recolección de datos es: datos de autor, datos del artículo, tipo de estudio, metodología, tipo de biocarbón, tipo de microorganismo, resultados, conclusiones.

3.6. Procedimiento

Gráfico N° 1. Procedimiento de selección de artículos



Elaboración propia

3.7. Rigor científico

El presente trabajo de investigación buscó cumplir con 4 criterios para cumplir con el rigor científico requerido. Siendo descritos por Cadena Iñiguez P. et al., (2017, p.4), donde:

Primero se consideró a la credibilidad o valor de verdad, siendo el criterio que pretende evidenciar los descubrimientos en su realidad. Es decir, aproximar la solución en relación con el problema, así mismo este criterio permite contrastar los resultados obtenidos por el investigador versus las de otros autores.

La confiabilidad en la investigación científica es la probabilidad de obtener resultados similares en diferentes estudios que hayan aplicado el mismo sujeto u objeto. Pero de acuerdo con diversos investigadores, este criterio puede cambiar por factores indistintos como la improvisación, y es que, elegir un instrumento de manera rápida dan a notar la falta de conocimientos, lo que lleva a la conclusión de tener una herramienta poco confiable e inválida.

Aplicabilidad; la aplicabilidad va ser condicional al origen del estudio o trabajo de investigación y es que, un instrumento no siempre podrá ser aplicado en todos los casos; existiendo casos en los que se pueden enfocar en un solo individuos u otros en los que se enfocan en diferentes individuos.

Por último, aplicabilidad de los instrumentos, es el criterio que se aplicó, ya que, este depende de la naturaleza del estudio o investigación, y permite que mediante la explicación clara y concisa de los resultados otros investigadores puedan aplicarlo en sus estudios.

3.8. Método de análisis de información

el principio de la triangulación se encarga de estudiar teorías comparándolas y comparar diversos conceptos; siendo la triangulación teórica usado en el presente estudio; ya que, permitió que se usara la matriz apriorística, elaborando las categorías y sub categorías que permiten que los resultados mostrados sean exactos.

Siendo las categorías las siguientes 3: Efectos de la aplicación del biocarbón en la remediación de suelos, Efectos de la aplicación integrada de biocarbón y microorganismos, Efectos de la aplicación integrada de biocarbón y nutrientes

Mientras que las sub categorías fueron: Reducción mínima de la concentración % de metales traza, Reducción máxima de la concentración % de metales traza, Mejoró la biomasa de las hojas, Reducción de la biodisponibilidad de metales traza, Efectos sobre la planta y Porcentaje de concentración reducido.

3.9. Aspectos éticos

Los aspectos éticos del presenta trabajo fueron cumplidos siguiendo con los criterios éticos de la norma ISO 690, la cual permitió que se genere el respeto a la autoría de los investigadores, así mismo, se cumplió con el respeto a la Norma propuesta por la Universidad Cesar Vallejo, la resolución de consejo universitario N° 0103-2018.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los efectos del biocarbón y la integración con microorganismos y nutrientes vegetales para la remediación de metales traza en suelos agrícolas se ha convertido en un papel clave bajo la toxicidad de los metales traza reduciendo el aumento, germinación y desarrollo de la planta; por lo tanto, minimiza la absorción de agua y nutrientes y, finalmente, inhibe la tasa fotosintética. Por lo cual se describe los efectos de la aplicación del biocarbón, biocarbón y microorganismos, y biocarbón y nutrientes en la remediación de suelos expuestos a metales traza mediante las tablas 1, 2 y 3.

Así, de acuerdo con la tabla 1, se clasificaron los efectos de la aplicación del biocarbón en la remediación de suelos expuestas bajo estrés por metales traza.

Tabla N° 1. Efectos de la aplicación del biocarbón

Materia prima	Concentración de metal traza	Especies de plantas	Alivio del estrés	Refer.
Aluminio				
cáscara de maní	3744 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	Repollo	Reducción de MDA: 60,67 % POD: 97,80 % SOD: 61,29 %. Mejora de eficiencia: La actividad CAT: 28% Proteínas solubles 61%	Xia Hao et al., (2019, p.1)
No indica	3 g de $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ en 20 l de agua destilada	Álamo	Incremento en la altura de la germinación de la planta: 55,55 % Absorción de Al en Hojas: 30,72 % Raíces: 27,01 %	Qian L. et al. (2018, p.1)
cáscara de maní	3744 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	Repollo	Incremento de la longitud de los brotes: 89,11 % Incremento de biomasa fresca: 99,85 % Incremento de contenido de K: 152,49 % Absorción de Al en las hojas en un 84,16%.	Xia Hao et al., (2019, p.1)
Residuos de madera de eucalipto	16.000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	Arroz	Aumento de altura de la planta: 19,58 % Aumento de peso seco de los brotes: 46,86 % Aumento de peso seco de la raíz: 29,21 % Aumento en la longitud de la raíz: 37,86 %	Shetty R. y Prakash N., (2020, p.1)

			Reducción de la biodisponibilidad de Al en el suelo en un 83,33 %.	
Cadmio				
Paja de arroz	2,86 mg·kg ⁻¹	Trigo	Reducción: Concentraciones de EC: 33,33 % MDA: 16,67 % H ₂ O ₂ : 26,00 % Reducción de POD en las hojas: 16,67 % Mejora de CAT: 31,25 %	Abbas T. et al., (2017, p.1)
Trigo	2,86 mg·kg ⁻¹	Trigo	Mejora de rendimiento del brote: 186,5 % la raíz: 83,8 % la longitud de la espiga: 200 % el grano: 06 % Absorción de Cd: 28 %	Abbas T. et al., (2017, p.1)
Bagazo de caña de azúcar)	50 mg kg ⁻¹	Frijol mungo	Mejóro Altura de la planta: 25,33% Biomasa fresca de brotes: 10,65% Absorción de Cd: 63 %	Bashir et al. (2017, p.1)
Tomate	2,02 mg·kg ⁻¹	Nabo	Mejóro la disponibilidad de micronutrientes y biomasa vegetal y redujo la biodisponibilidad de Cd en un 54%.	Khan K. et al. (2017, p.1)
Trigo	41 mg·kg ⁻¹	Repollo	Incrementó Biomasa seca aérea: 36,5% Radicular: 38% Absorción de Cd: 73 %	Bashir S. et al. (2018, p.1)
Bambú	No indica	Amaranto	Absorción de Cd en brotes y hojas: 49 % Mejóro la biomasa de la planta de manera significativa	Shaaban M. et al., (2018, p.1)
Cobre				
Paja de arroz	145,41 mg·kg ⁻¹	Ramina	Reducción de: MDA: 57 % Prolina libre en las hojas: 33 % Disminución de: SOD: 38 % POD: 63 %	Ur Rehman M. et al., (2020, p.1)
estiércol de pollo	338 mg·kg ⁻¹	Metalófito	Incremento de Biomasa aérea: 22,73 % Radicular: 48,28 % Reducción de Cu en el tallo: 39,41 %	Meier S. et al. (2017, p.1)
Paja de arroz	145,41 mg·kg ⁻¹	Ramina	Mejóro: Contenidos de clorofila: 79 % Intercambio gaseoso: 86 % Biomasa seca de los brotes: 224 % Peso seco de las hojas: 216 % Redujo: MDA: 57 % Cu en las raíces: 60 %	Ur Rehman M. et al., (2020, p.1)

Residuo de naranja	60 mg kg ⁻¹	Mostaza	Mejoró Proceso de fotosíntesis: 68 % Biomasa de los brotes: 232 % Absorción de Cu: 70%	Silva Maria I. et al. (2019, p.1)
Cromo				
Paja de arroz	500 micras	Mostaza	Redujo MDA: 14,28 % Concentración de H ₂ O ₂ en hojas: 53,33 % Actividades de SOD: 33,33 % POD: 53,57 % Proteínas solubles: 28,57 % contenido de ácido ascórbico: 25,00 %	Alí S. et al. (2018, p.1)
Arena para aves de corral	500 mg kg ⁻¹	Espinaca	Reducción de la actividad de MDA y concentración de H ₂ O ₂ en hojas en un 20% y 44,44%, respectivamente. Mejoraron las actividades de SOD y CAT en hojas en un 9,09 % y un 51,11 %, respectivamente.	Sehrish Adiba K. et al., (2019, p.1)
Residuos de astillas de madera	50 mg L ⁻¹	Trigo	Mejoró contenido de Clorofila: 149 % Longitud de la raíz: 135 % Longitud del brote: 168 % Biomasa fresca: 370 % Contenido de carbohidratos: 47 % Reducción de Cr en suelo: 90%	Arshad M. et al. (2017, p.1)
Bagazo de caña de azúcar	50 mg kg ⁻¹	Frijol mungo	Mejora de Altura de la planta: 25,33% Biomasa fresca de brotes: 10,65% Reducción de Cd: 85 %	Bashir et al. (2017, p.1)
Paja de arroz	500 micras	Mostaza	Mejoró Altura de la planta: 42,86 % Longitud de la raíz: 33,33 % Contenido de clorofila: 14,29 % Reducción de Cr en hojas: 41,05 %.	Alí S. et al. (2018, p.1)
Arena para aves de corral	500 mg kg ⁻¹	Espinaca	Mejoró Longitud de la raíz: 38,86 % Longitud de los brotes: 39,5 % Contenido de clorofila: 94,87 % Reducción de Cr en brotes: 49 %	Sehrish Adiba K. et al., (2019, p.1)
Níquel				
Paja de arroz	2,1 mg·kg ⁻¹	Girasol	Reducción de H ₂ O ₂ : 10,71% MDA en hojas: 13,64% Estimuló las actividades de APX: 25,45 % CAT: 17,76 % SOD: 25,00 %	Turan Veysel et al., (2018, p.2)

hierba plateada	77 mg·kg ⁻¹	Girasol y maíz	<p>Redujo la producción de H₂O₂ y MDA en hojas de girasol en un 62 % y 56 %, respectivamente</p> <p>Ayudó en la actividad de APX: 84 % CAT: 75 % SOD: 75 %</p> <p>Redujo la producción de H₂O₂: 55 % MDA en hojas: 59 % Mejoró APX: 89 % CAT: 98 % SOD en hojas: 131 %</p>	Shahbaz Ali K. et al., (2018, p.1)
Paja de arroz	2,1 mg·kg ⁻¹	Girasol	<p>Incrementó Biomasa de plantas: 42.89% Semillas: 75% Reducción de Ni en el suelo: 47 %</p>	Turan Veysel et al., (2018, p.2)
hierba plateada	77 mg·kg ⁻¹	girasol y maíz	<p>Mejoró la biomasa aérea: 70% Conductancia estomática: 107%</p> <p>Incrementó de Biomasa aérea: 50% Conductancia estomática: 107%</p> <p>Reducción de Ni en brotes de girasol: 50 % Ni en brotes de maíz 49 %</p>	Shahbaz Ali K. et al., (2018, p.1)
Plomo				
tallo de Prosopis	800 mg kg ⁻¹	Ricino	<p>Disminuyó concentración de antocianina: 41 % Prolina: 19 % MDA: 29 % H₂O₂ en las hojas: 14 % Mejoró síntesis de proteínas: 72 %</p>	Kiran Boda R. et al., (2019, p.1)
cáscara de pistacho	600 mg kg ⁻¹	Espinaca	<p>Disminuyó Concentración de H₂O₂: 50 % MDA: 60 % Mejoró APX: 185 % AsA: 174 % CAT: 126 % DHAR: 141 % POX: 100 % SOD: 132%</p>	Turán V. (2019, p.1)
hierba plateada	1000 mg kg ⁻¹	Guisante	<p>Redujo Concentración de MDA: 39 % H₂O₂ en las hojas: 61 % Mejoró actividades de APX: 111 % CAT: 106 % DHAR: 129 % SOD: 111 %</p>	Zulqurnain H. et al. (2019, p.1)
tallo de Prosopis	800 mg kg ⁻¹	Ricino	<p>Mejora en: Incremento del tamaño de la planta, síntesis de proteínas y el contenido de clorofila en porcentajes de:</p>	Kiran Boda R. et al., (2019, p.1)

			Planta: 69 % Síntesis de proteínas: 72 % Contenido de clorofila: 52 % Reducción de la captación de Pb en hojas en un 62%.	
cáscara de pistacho	600 mg kg ⁻¹	Espinaca	Mejora de Peso seco del brote: 92 % Peso seco de la raíz: 121 % Contenido de clorofila: 60 % Contenido de agua de la planta: 30 % Reducción de Pb (brote): 66%	Turán V. (2019, p.1)
hierba plateada	1000 mg kg ⁻¹	Guisante	Mejóro Altura de la planta: 33 % Contenido de clorofila: 38,89 % Biomasa seca de los brotes: 41,96 % Biomasa seca de la raíz: 30,77 % Reducción de Pb (grano): 31,25%	Zulqurnain H. et al. (2019, p.1)

Elaboración propia

De acuerdo con la tabla 1, se tiene que los efectos en el suelo de aplicar directamente biocarbón como método de remediación al estrés metálico, ayuda a la regulación de antioxidantes bajo estrés, ya que, la aplicación del biochar mejora la permeabilidad de las células vegetales y de esta manera hace que los metales sean adsorbidos más rápidamente y la planta incrementa la adsorción al entrar en contacto con las propiedades eléctricas de las actividades enzimáticas y la membrana (Yuan Peng et al., 2019, p.2).

Además, el metal traza con mayor presencia son el aluminio, cadmio, cobre, cromo, níquel y plomo. Siendo así corroborado por algunos de los autores como: Qian L. et al. (2018, p.1), Xia Hao et al., (2019, p.1), Shetty R. y Prakash N., (2020, p.1), Khan K. et al. (2017, p.1), Bashir S. et al. (2018, p.1), Shaaban M. et al., (2018, p.1), Ur Rehman M. et al., (2020, p.1), Silva Maria I. et al. (2019, p.1), Alí S. et al. (2018, p.1), Sehrish Adiba K. et al., (2019, p.1), Turan Veysel et al., (2018, p.2), Shahbaz Ali K. et al., (2018, p.1), Turán V. (2019, p.1), Zulqurnain H. et al. (2019, p.1), Kiran Boda R. et al., (2019, p.1).

Entre los metales traza, el metal Cd es el metal de entre todos los iones metálicos que presenta una adsorción más rápida y causa efectos en las diversas propiedades fisiológicas, morfológicas, bioquímicas y estructurales aun a pesar de contener cantidades muy pequeñas en las plantas y es uno de los más estudiados al igual que

el Cr. Siendo demostrado por Qianqian M. et al., (2022, p.3), que la toxicidad del Cd disminuyó significativamente las características morfológicas y la actividad de algunas enzimas antioxidantes, como CAT o SOD.

Así mismo, se obtuvo mediante la clasificación de autores en la tabla 1 que, la aplicación de biocarbón en el suelo ayudó a minimizar la absorción de metales y redujo la toxicidad de metales en plantas que incluyen trigo (*Triticum aestivum L.*), trigo, Mostaza, Girasol y espinaca en los estudios de Shetty R. y Prakash N., (2020, p.1), Abbas T. et al., (2017, p.1), Alí S. et al. (2018, p.1), Turan Veysel et al., (2018, p.2), Turán V. (2019, p.1).

Respaldando los resultados mencionados, Gonzaga M. et al., (2019, p.2), afirma que la adición de biochar en tierras contaminados termina el ROS generación bajo estrés de metales y, como consecuencia, reduce las probabilidades de peroxidación lipídica, además, incentiva los procesos metabólicos y enzimáticos y desintoxica los contaminantes en las plantas.

Lo que es también respaldado por Bashir et al. (2017, p.1), quien con una concentración de metal traza de 50 mg kg^{-1} utilizando biocarbón de bagazo de caña de azúcar ayudó a incrementar la formación de nódulos y la actividad microbiana en el suelo; ayudando a que el crecimiento del tamaño de la planta y la biomasa fresca de brotes incrementen en rangos porcentuales de 25% y 11% respectivamente y la reducción de la absorción del contenido de Cd en brotes en un 85%.

Pero, Haider F. et al., (2021, p.2), señala que, aunque se han informado muchos avances en la investigación sobre las propiedades del biocarbón, aún no se ha explicado en detalle el papel del biocarbón en la remediación de los contaminantes del suelo y la sostenibilidad.

Lo que es refutado por Kiran Boda R. et al., (2019, p.1), quien en su estudio demostró que el biocarbón con tallo de prosopis mejoró la altura de la planta ricino, la síntesis de proteínas y los niveles de clorofila en la planta, dando como resultados porcentajes de 69, 72 y 52%, cada uno en dicho orden.

Por otro lado, se definió cuáles son los efectos de la aplicación de biocarbón más microorganismos en la remediación de suelos expuestos a metales traza, teniendo el

análisis de la concentración de los metales, la materia prima, y el microorganismo usado; mediante la elaboración de la tabla 2.

Tabla N° 2. Efectos de la aplicación del biocarbón y microorganismos

Concentración de metal traza (mg/kg-1) (mg L ⁻¹)	Materia prima de biocarbón	Microorganismos	Cosecha	Efectos	Referencias
Cromo					
50 mg/L	Astillas de madera	<i>Pseudomonas japonica</i> y <i>Bacillus cereus</i>	Trigo	Mejóro contenido de Clorofila: 149 % Longitud de la raíz: 135 % Longitud del brote: 168 % Biomasa fresca: 370 % Contenido de carbohidratos: 47 % Reducción de Cr en suelo: 90%	Arshad M. et al. (2017, p.1)
Mercurio					
280 mg/kg	Paja de pino	<i>Pseudomonas</i> sp. (DC-B1)	Lechuga	Mejóro Longitud de brotes: 62,5 % Reducción de Hg: 23,2 %	Chen J. et al. (2018, p.1)
Plomo					
1000 mg/L	Residuos de lodos	<i>Enterobacter</i> sp.		Reducción de Pb en suelo: 60,85%	Chen H. et al. (2019, p.2)
241 mg/kg	Paja de arroz	<i>Bacilo thuringiensis</i> HC-2	Rábano	Mejóro Peso seco de la raíz: 22,8 % Peso seco de las hojas: 39,9 % Reducción de Pb en raíz: 63,0 % Pb intercambiable en el suelo: 42,0 %.	Li Z. et al. (2019, p.1)
Cadmio					
20 mg/kg	Paja de arroz	<i>Micorriza arbuscular</i>	Alfalfa	Reducción de Cd en raíz: 40,63 % Reducción de Cd en brote: 40 %	Zhang F. et al. (2019, p.1)
6 mg/kg	Paja de trigo	<i>Micorriza arbuscular</i>	Maíz	Incremento de la biomasa del cultivo en un 79,1% Reducción de Cd: 76,19 % hojas: 58,04 % tallo: 67,19 % raíz: 50,06 %	Li Z. et al. (2019, p.1)

56 mg/kg y Cobre 247 mg/kg	Paja de maíz	<i>Pseudomonas</i> sp. (NT-2)	No indica	Disminución de Cd: 12,82 % Cu: 26,55 %	Tu C. et al. (2020, p.1)
147,75 mg/kg	Estiércol de aves de corral	<i>Trichoderma harzianum</i> y <i>Bacillus subtilis</i>	Haba de soja	Mejóro Longitud de la raíz: 23,48 % Longitud del brote: 28,66 % Biomasa fresca: 19,73 % Redució absorción de Cd en: Brotos: 73,24 % Raíz: 70,02 %	Haider F. et al. (2021, p.1)

Elaboración propia

De acuerdo con la tabla 2, se tiene que los efectos de la aplicación del biocarbón más microorganismos es más exitosa ya que presenta muchísimos mejores resultados de eficiencia; debido a que, el biocarbón al ser modificado cambia las propiedades del suelo, como los agentes microbianos, lo que genera que los procesos metabólicos cambien incrementando la cantidad de microorganismos de la tierra.

Siendo así que estudios como los de Zhu X. et al., (2017, p.2), Zulfiqar Usman et al., (2019, p.2); comprobaron que el biocarbón agrega materia orgánica y micronutrientes que ayudan a mejorar la actividad enzimática del suelo y la actividad microbiana.

Así también, apoyando lo mencionado, Haider F. et al., (2021, p.2), señala que señala que el uso de aplicar al suelo agrícola biocarbón más microbios ayuda a que se adsorba y degrade mayores contaminantes del suelo; además, reduce la toxicidad y biodisponibilidad de los metales presentes en él.

Siendo apoyado por Zhang F. et al. (2019, p.1), quien menciona en la tabla 2 que la adición de micorriza arbuscular en el biocarbón de paja de arroz ayudó a optimizar la biomasa aérea y radicular de la alfalfa; y esto, mediante la observación de una mejor eficiencia de adsorción de nutrientes esenciales en el interior de la planta y con ello minimizar los niveles de Cd en la raíz y los brotes de la planta en porcentajes de 55% y 40,6 %, en raíz y brotes, a diferencia de aplicar biocarbón solo.

Aunque en el estudio de Tu C. et al. (2020, p.1), se menciona que el porcentaje de la concentración de Cd y Cu en el suelo fueron en promedios de 12,8% para Cd y 26,5% para Cu, después de la aplicación, los resultados mostraron que, comparando el uso solo del biocarbón y el biocarbón inoculado con la cepa NT-2 a una concentración porcentual del 5 %, pudieron observar que incrementó notablemente el pH del suelo

al inicio de la incubación y después de una ligera disminución a un pH neutro con rango alcalino durante la reacción.

Por último, se realizó mediante la tabla 3 la definición de los efectos de la aplicación integrada de biocarbón y nutrientes en la remediación de suelos expuestos a metales traza.

Tabla N° 3. Efectos de la aplicación del biocarbón y nutrientes

Concentración de metal traza	Materia prima de biocarbón	Nutrientes	Cosecha	Efectos sobre las plantas o el suelo	Referencias
Cobre y Plomo					
Cobre (422,9 mg kg⁻¹) Plomo (224,25 mg kg⁻¹)	Estiércol de ganado	Fosforo	Lechuga	Reducción de Cu y Pb en: Tejidos de la raíz (Cu): 78,15% Tejidos de la raíz (Pb): 71,35% Reducción de Cu y Pb en: Brotos (Cu): 20,83 % Brotos (Pb): 66,04 %	Huang L. et al. (2019, p.1)
Cadmio					
(10 mg kg⁻¹)	Astillas de madera	Zinc	Trigo	Mejóro Rendimiento del grano: 9,51 % Reducción de Cd en Paja: 7,1 % Grano: 95,6 %	Farooq M. et al. (2020, p.2)
Cromo					
(73,56 mg kg⁻¹)	Bagazo de caña de azúcar	Azufre	Maíz	Mejóro la Tamaño de la planta: 81,11 % Longitud de la raíz: 80,80 % Biomasa de brotes frescos: 85,50 % Área foliar: 80,11 %, Reducción de Cr en: Raíz: 56,73% Brote: 58,37%	Bashir M. et al. (2020, p.1)
(67,54 mg kg⁻¹)	Cáscara de maní	Selenio	<i>Ipomoea acuática</i>	Mejóro en la planta Contenido de azúcar: 56,63 % Proteína soluble: 43,83 % Reducción de Cr en Raíz: 72,07 % Brotos: 50,30 % Hojas: 52,48 %	Guo X. et al. (2020, p.1)

Elaboración propia

De acuerdo con la tabla 3, se tiene que entre los efectos de aplicar biocarbón más nutrientes se encuentra la disminución de los efectos negativos causados por estos metales en el suelo, esto se da cuando la unión de la aplicación integrada evita u obstruye que se genere el proceso de adsorción.

Además, los nutrientes usados fueron micronutrientes como el zinc (Zn), Azufre (S), Fósforo (P) y el selenio (Se). Huang L. et al. (2019, p.1), Farooq M. et al. (2020, p.2), Bashir M. et al. (2020, p.1), Guo X. et al. (2020, p.1).

Siendo ello justificado por Haider F. et al., (2021, p.2); en su estudio; donde menciona que la cuando se aplica Zn y Se en la tierra, se da un mejoramiento en el crecimiento de las plantas; ya que, esta adición ayuda a que las plantas presentes en este tipo de suelos con metales trazan un mejor crecimiento; y es que, eso se debe a que no se daña la membrana de las células presentes en las raíces de las plantas; además, mejora el proceso fotosintético en las hojas.

Además, que, entre estos nutrientes, cuando se modifica el biocarbón en el proceso de pirolisis es cuando se genera los cambios en las áreas superficiales, mejorando el biocarbón como producto de adsorción; también se modifican en el proceso los grupos funcionales; eliminando y reemplazando compuestos orgánicos y metales pesados (Virk Ahmad L. et al., 2021, p.8).

Así también, lo corrobora Farooq M. et al., (2020, p.2), quien menciona que, para la reducción de metales en las plantas, una excelente opción es el uso de biocarbón mas micronutrientes; debido a que estos reducen la biodisponibilidad.

V. CONCLUSIONES

En base a los estudios realizados se puede concluir de manera general que los efectos del biocarbón y la integración con microorganismos y nutrientes vegetales remediar metales traza en suelos agrícolas ayuda significativamente a aliviar la concentración de metales traza; siendo que la adición de microorganismos o nutrientes genera mejores resultados; por lo cual para explicar dicha conclusión de presentan las siguientes conclusiones específicas:

Los efectos de la aplicación del biochar genera la regulación del desarrollo de antioxidantes bajo estrés; debido a que la aplicación de biocarbón tiene que ver de manera directa en la influencia de las células y la retención de metales; pero los resultados que presenta pueden mejorarse mediante la adición de otros compuestos.

Los efectos de la aplicación de la unión entre el biocarbón y el uso de microorganismos en el tratamiento de suelos expuestos a metales pesados son más exitosos, ya que, al aplicar el biocarbón en un suelo este va a cambiar su composición microbiana, generando que se altere de manera indirecta el proceso metabólico.

Los efectos de la aplicación de la unión entre el biocarbón y el uso de microorganismos en el tratamiento de suelos con presencia de metales pesados ayuda al igual que la adición de microorganismos a disminuir la intensidad de los efectos negativos que los iones metálicos puedan generar en el suelo obstruyendo su absorción, ya que, estos micronutrientes y la absorción de estos contaminantes metálicos son llevados por el mismo canal en la membrana plasmática de las células de la raíz; además, los nutrientes usados fueron micronutrientes como el zinc (Zn), Azufre (S), Fósforo (P) y el selenio (Se).

VI. RECOMENDACIONES

Los estudios analizados permitieron descubrir que los investigadores de los últimos 5 años se enfocan en la aplicación del biocarbón más no exploran estudios prácticos de las propiedades de la aplicación integrada del biocarbón con otros compuestos; por lo cual se recomienda proporcionar nuevos estudios para ampliar conocimientos sobre el desarrollo de materiales y tecnologías funcionales para la remediación ecológica y sostenible de suelos contaminados con metales pesados mediante la combinación de biocarbón y microorganismos funcionales.

Así mismo, se recomienda realizar un estudio detallado sobre las vías para extraer compuestos tóxicos del biocarbón.

Además, debido a que algunas otras herramientas de remediación que incluyen biocarbón, abonos orgánicos y hormonas de crecimiento también se pueden usar para minimizar de manera efectiva los efectos adversos del Cd del suelo a escala comercial. Se sugiere implementar herramientas de remediación adecuadas para contrarrestar los efectos adversos del Cd de los suelos agrícolas contaminados.

El biocarbón necesita un estudio a fondo, por lo que, para determinar los métodos óptimos de generación del biochar, se debe aplicar mayor énfasis en la sostenibilidad de este como herramienta con un alto potencial de remediación.

REFERENCIAS

1. ABBAS, Tahir, et al. Effect of biochar on alleviation of cadmium toxicity in wheat (*Triticum aestivum* L.) grown on Cd-contaminated saline soil. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, vol. 25, no 26, p. 25668-25680. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8987-4>
2. ADREES, Muhammad, et al. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of heavy metal toxicity in plants: a review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2016, vol. 119, p. 186-197. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.05.011>
3. AHMAD, Munir, et al. Engineered biochar composites with zeolite, silica, and nano-zerovalent iron for the efficient scavenging of chlortetracycline from aqueous solutions. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, vol. 26, no 15, p. 15136-15152. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04850-7>
4. AL-ZAWAHREH, Khaled, et al. Competitive removal of textile dyes from solution by pine bark-compost in batch and fixed bed column experiments. *Environmental Technology & Innovation*, 2022, vol. 27, p. 102421. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102421>
5. ALI, Amjad, et al. *Streptomyces pactum* addition to contaminated mining soils improved soil quality and enhanced metals phytoextraction by wheat in a green remediation trial. *Chemosphere*, 2021, vol. 273, p. 129692. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129692>
6. ALI, Shafaqat, et al. Effects of biochar on growth, photosynthesis, and chromium (Cr) uptake in *Brassica rapa* L. under Cr stress. *Arabian Journal of Geosciences*, 2018, vol. 11, no 17, p. 1-9. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3861-3>
7. ALIPOUR, Mohammadreza, et al. The concentration and probabilistic risk assessment of potentially toxic elements in fillets of silver pomfret (*Pampus argenteus*): A global systematic review and meta-analysis. *Journal of*

- Environmental Sciences, 2021, vol. 100, p. 167-180. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2020.07.014>
8. ANTONIADIS, Vasileios, et al. A critical prospective analysis of the potential toxicity of trace element regulation limits in soils worldwide: Are they protective concerning health risk assessment?-A review. *Environment international*, 2019, vol. 127, p. 819-847. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.03.039>
 9. ANTONIADIS, Vasileios, et al. Trace elements in the soil-plant interface: Phytoavailability, translocation, and phytoremediation–A review. *Earth-Science Reviews*, 2017, vol. 171, p. 621-645. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.06.005>
 10. ARSHAD, Maryem, et al. The reduction of chromium (VI) phytotoxicity and phytoavailability to wheat (*Triticum aestivum* L.) using biochar and bacteria. *Applied Soil Ecology*, 2017, vol. 114, p. 90-98. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.02.021>
 11. BASHIR, Muhammad Asaad, et al. Combined application of biochar and sulfur regulated growth, physiological, antioxidant responses and Cr removal capacity of maize (*Zea mays* L.) in tannery polluted soils. *Journal of environmental management*, 2020, vol. 259, p. 110051. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.110051>
 12. BILAL, Muhammad, et al. Hazardous contaminants in the environment and their laccase-assisted degradation—a review. *Journal of environmental management*, 2019, vol. 234, p. 253-264. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.01.001>
 13. BRTNICKÝ, Martin, et al. Environmental impact assessment of potentially toxic elements in soils near the runway at the international airport in Central Europe. *Sustainability*, 2020, vol. 12, no 17, p. 7224. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/su12177224>
 14. CHEN, Haoming, et al. Enhanced Pb immobilization via the combination of biochar and phosphate solubilizing bacteria. *Environment international*, 2019,

vol. 127, p. 395-401. Disponible en:
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.03.068>

15. CHEN, Jinqun, et al. Characterization of an Hg (II)-volatilizing *Pseudomonas* sp. strain, DC-B1, and its potential for soil remediation when combined with biochar amendment. *Ecotoxicology and environmental safety*, 2018, vol. 163, p. 172-179. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.07.071>
16. CHEN, Xueyan, et al. A review on remediation technologies for nickel-contaminated soil. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2019. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/10807039.2018.1539639>
17. EL-NAGGAR, Ali, et al. Biochar application to low fertility soils: A review of current status, and future prospects. *Geoderma*, 2019, vol. 337, p. 536-554. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.09.034>
18. FAROOQ, Muhammad, et al. Application of zinc and biochar help to mitigate cadmium stress in bread wheat raised from seeds with high intrinsic zinc. *Chemosphere*, 2020, vol. 260, p. 127652. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127652>
19. GONZAGA, Maria Isidoria Silva, et al. Pyrolysis methods impact biosolids-derived biochar composition, maize growth and nutrition. *Soil and Tillage Research*, 2017, vol. 165, p. 59-65. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.07.009>
20. GONZAGA, Maria Isidoria Silva, et al. Biochar increases plant water use efficiency and biomass production while reducing Cu concentration in *Brassica juncea* L. in a Cu-contaminated soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, vol. 183, p. 109557. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109557>
21. GUO, Xiongfei, et al. Effects of biochar and foliar application of selenium on the uptake and subcellular distribution of chromium in *Ipomoea aquatica* in chromium-polluted soils. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, vol. 206, p. 111184. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111184>

22. HAIDER, Fasih Ullah, et al. Co-application of biochar and microorganisms improves soybean performance and remediate cadmium-contaminated soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, vol. 214, p. 112112. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112112>
23. HAIDER, Fasih Ullah, et al. Cadmium toxicity in plants: Impacts and remediation strategies. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, vol. 211, p. 111887. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111887>
24. HOWARD, Deborah. US federal oversight of biological materials and the IBC. *En Ensuring National Biosecurity*. Academic Press, 2016. p. 23-40. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801885-9.00002-0>
25. HUANG, Ling, et al. RETRACTED ARTICLE: Immobilization of Heavy Metals in e-Waste Contaminated Soils by Combined Application of Biochar and Phosphate Fertilizer. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2019, vol. 230, no 2, p. 1-13. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11270-019-4081-5>
26. IBRAHIM, Ehab A.; EL-SHERBINI, Mohamed AA; SELIM, El-Metwally M. Effects of biochar on soil properties, heavy metal availability and uptake, and growth of summer squash grown in metal-contaminated soil. *Scientia Horticulturae*, 2022, vol. 301, p. 111097. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111097>
27. JAMES R, Arthur M., et al. The effect of gasification conditions on the surface properties of biochar produced in a top-lit updraft gasifier. *Applied Sciences*, 2020, vol. 10, no 2, p. 688. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/app10020688>
28. KAPOOR, Dhriti; KAUR, Satwinderjeet; BHARDWAJ, Renu. Physiological and biochemical changes in Brassica juncea plants under Cd-induced stress. *BioMed research international*, 2014, vol. 2014. Disponible en: <https://doi.org/10.1155/2014/726070>
29. KHAN, Shamshad, et al. Global soil pollution by toxic elements: Current status and future perspectives on the risk assessment and remediation strategies—A review. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, vol. 417, p. 126039. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126039>

30. KHAN, Kiran Yasmin, et al. Impact of different feedstocks derived biochar amendment with cadmium low uptake affinity cultivar of pak choi (*Brassica rapa* ssp. *chinensis* L.) on phytoavoidance of Cd to reduce potential dietary toxicity. *Ecotoxicology and environmental safety*, 2017, vol. 141, p. 129-138. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.03.020>
31. KIRAN, Boda Ravi; PRASAD, M. N. V. Biochar and rice husk ash assisted phytoremediation potentials of *Ricinus communis* L. for lead-spiked soils. *Ecotoxicology and environmental safety*, 2019, vol. 183, p. 109574. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109574>
32. KONG, Fanjing, et al. Human health risk visualization of potentially toxic elements in farmland soil: A combined method of source and probability. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, vol. 211, p. 111922. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.111922>
33. LI, Kuangjia, et al. Spatial analysis, source identification and risk assessment of heavy metals in a coal mining area in Henan, Central China. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2018, vol. 128, p. 148-154. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2017.03.026>
34. LI, Zigang, et al. Effects of *Bacillus thuringiensis* HC-2 combined with biochar on the growth and Cd and Pb accumulation of radish in a heavy metal-contaminated farmland under field conditions. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, vol. 16, no 19, p. 3676. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/ijerph16193676>
35. LIU, Guannan, et al. Partitioning and geochemical fractions of heavy metals from geogenic and anthropogenic sources in various soil particle size fractions. *Geoderma*, 2018, vol. 312, p. 104-113. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.10.013>
36. LIU, Zunqi, et al. Effects of biochar application on nitrogen leaching, ammonia volatilization and nitrogen use efficiency in two distinct soils. *Journal of soil science and plant nutrition*, 2017, vol. 17, no 2, p. 515-528. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162017005000037>

37. MEIER, Sebastián, et al. Chicken-manure-derived biochar reduced bioavailability of copper in a contaminated soil. *Journal of Soils and Sediments*, 2017, vol. 17, no 3, p. 741-750. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11368-015-1256-6>
38. MØLLER, Hanne, et al. Local non-food yeast protein in pig production-environmental impacts and land use efficiency. *Livestock Science*, 2022, p. 104925. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2022.104925>
39. POMEROY, Claire; SANFILIPPO, Fred. How research can and should inform public policy. En *The transformation of academic health centers*. Academic Press, 2015. p. 179-191. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800762-4.00018-9>
40. POURRET, Olivier; BOLLINGER, Jean-Claude. 'Heavy metals'-what to do now: to use or not to use?. *Science of the Total Environment*, 2017, vol. 610, p. 419-420. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.043>
41. QIAN, Lianwen, et al. Effect of Bio char on plant growth and aluminium form of soil under aluminium stress. En *IOP conference series: earth and environmental science*. IOP Publishing, 2018. p. 042123. Disponible en: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/108/4/042123>
42. QIANQIAN, Ma, et al. Selenium treated Foliage and biochar treated soil for improved lettuce (*Lactuca sativa* L.) growth in Cd-polluted soil. *Journal of Cleaner Production*, 2022, vol. 335, p. 130267. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130267>
43. REHMAN, Rabia Abdur, et al. Efficiency of various sewage sludges and their biochars in improving selected soil properties and growth of wheat (*Triticum aestivum*). *Journal of environmental management*, 2018, vol. 223, p. 607-613. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.06.081>
44. RINKLEBE, Jörg, et al. Health risk assessment of potentially toxic elements in soils along the Central Elbe River, Germany. *Environment International*, 2019, vol. 126, p. 76-88. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.02.011>

45. SAWUT, Rukeya, et al. Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in the vegetable bases of northwest China. *Science of the Total Environment*, 2018, vol. 642, p. 864-878. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.034>
46. SEHRISH, Adiba Khan, et al. Effect of poultry litter biochar on chromium (Cr) bioavailability and accumulation in spinach (*Spinacia oleracea*) grown in Cr-polluted soil. *Arabian Journal of Geosciences*, 2019, vol. 12, no 2, p. 1-9. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s12517-018-4213-z>
47. SHAABAN, Muhammad, et al. A concise review of biochar application to agricultural soils to improve soil conditions and fight pollution. *Journal of environmental management*, 2018, vol. 228, p. 429-440. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.09.006>
48. SHAHBAZ, Ali Khan, et al. Improvement in productivity, nutritional quality, and antioxidative defense mechanisms of sunflower (*Helianthus annuus* L.) and maize (*Zea mays* L.) in nickel contaminated soil amended with different biochar and zeolite ratios. *Journal of environmental management*, 2018, vol. 218, p. 256-270. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.04.046>
49. SHEN, Zhengtao; LI, Zhen; ALESSI, Daniel S. Stabilization-based soil remediation should consider long-term challenges. *Frontiers of environmental science & engineering*, 2018, vol. 12, no 2, p. 1-3. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11783-018-1028-9>
50. SHENG, Yaqi; ZHU, Lizhong. Biochar alters microbial community and carbon sequestration potential across different soil pH. *Science of the Total Environment*, 2018, vol. 622, p. 1391-1399. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.337>
51. SHETTY, Rajpal; PRAKASH, Nagabovanalli Basavarajappa. Effect of different biochars on acid soil and growth parameters of rice plants under aluminium toxicity. *Scientific Reports*, 2020, vol. 10, no 1, p. 1-10. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69262-x>

52. SIMASATITKUL, Lida; ARPORNWICHANOP, Amornchai; GANI, Rafiqul. Design methodology for bio-based processing: Biodiesel and fatty alcohol production. *Computers & chemical engineering*, 2013, vol. 57, p. 48-62. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2013.01.018>
53. SOVACOOOL, Benjamin K.; AXSEN, Jonn; SORRELL, Steve. Promoting novelty, rigor, and style in energy social science: Towards codes of practice for appropriate methods and research design. *Energy Research & Social Science*, 2018, vol. 45, p. 12-42. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2018.07.007>
54. SULIMAN, Waled, et al. Influence of feedstock source and pyrolysis temperature on biochar bulk and surface properties. *Biomass and Bioenergy*, 2016, vol. 84, p. 37-48. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.11.010>
55. SUN, Xue, et al. Effect of rice-straw biochar on nitrous oxide emissions from paddy soils under elevated CO₂ and temperature. *Science of the total environment*, 2018, vol. 628, p. 1009-1016. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.046>
56. TRIPATHI, Manoj; SAHU, Jaya Narayan; GANESAN, P. Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 55, p. 467-481. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.122>
57. TU, Chen, et al. Biochar and bacteria inoculated biochar enhanced Cd and Cu immobilization and enzymatic activity in a polluted soil. *Environment international*, 2020, vol. 137, p. 105576. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105576>
58. TURAN, Veysel, et al. Alleviation of nickel toxicity and an improvement in zinc bioavailability in sunflower seed with chitosan and biochar application in pH adjusted nickel contaminated soil. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2018, vol. 64, no 8, p. 1053-1067. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/03650340.2017.1410542>

59. TURAN, Veysel. Potential of pistachio shell biochar and dicalcium phosphate combination to reduce Pb speciation in spinach, improved soil enzymatic activities, plant nutritional quality, and antioxidant defense system. *Chemosphere*, 2020, vol. 245, p. 125611. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125611>
60. UR REHMAN, Muhammad Zia, et al. Residual effects of frequently available organic amendments on cadmium bioavailability and accumulation in wheat. *Chemosphere*, 2020, vol. 244, p. 125548. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125548>
61. WANG, Juan, et al. Source apportionment of heavy metal and their health risks in soil-dustfall-plant system nearby a typical non-ferrous metal mining area of Tongling, Eastern China. *Environmental Pollution*, 2019, vol. 254, p. 113089. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113089>
62. WANG, Rong-Zhong, et al. Investigating the adsorption behavior and the relative distribution of Cd²⁺ sorption mechanisms on biochars by different feedstock. *Bioresource technology*, 2018, vol. 261, p. 265-271. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.04.032>
63. WU, Wei, et al. Assessment of heavy metal pollution and human health risks in urban soils around an electronics manufacturing facility. *Science of the Total Environment*, 2018, vol. 630, p. 53-61. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.183>
64. XIA, Hao, et al. Investigating the effects of biochar on soil properties and alleviating aluminum toxicity for improving cabbage (*Brassica oleracea* var. capitata) productivity while reducing potash fertilizer. *International Journal of Agriculture and Biology*, 2019, vol. 22, no 6, p. 1415-1424. Disponible en: <https://doi.org/10.17957/IJAB/15.1216>
65. YOUNIS, Uzma, et al. Biochar enhances the cadmium tolerance in spinach (*Spinacia oleracea*) through modification of Cd uptake and physiological and biochemical attributes. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, vol. 23, no 21, p. 21385-21394. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7344-3>

66. ZENG, Siyan, et al. Spatial assessment of farmland soil pollution and its potential human health risks in China. *Science of the total environment*, 2019, vol. 687, p. 642-653. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.291>
67. ZHANG, Fengge, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi, biochar and cadmium on the yield and element uptake of *Medicago sativa*. *Science of The Total Environment*, 2019, vol. 655, p. 1150-1158. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.317>
68. ZHU, Xiaomin, et al. Effects and mechanisms of biochar-microbe interactions in soil improvement and pollution remediation: a review. *Environmental Pollution*, 2017, vol. 227, p. 98-115. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.04.032>

ANEXOS

Anexo N°1: Matriz de categorización apriorística

OBJETIVOS ESPECÍFICOS	PROBLEMAS ESPECÍFICOS	CATEGORÍA	SUBCATEGORÍA	CRITERIO 1	CRITERIO 2
Clasificar cuáles son los efectos de la aplicación del biocarbón en la remediación de suelos expuestas bajo estrés por metales traza	¿Cuáles son los efectos de la aplicación del biocarbón en la remediación de suelos expuestas bajo estrés por metales traza?	Efectos de la aplicación del biocarbón en la remediación de suelos (Sehrish Adiba K. et al., 2019, p.1)	Reducción mínima de la concentración % de metales traza Reducción máxima de la concentración % de metales traza (Al Zawahreh K. et al., 2022, p.5)	De acuerdo al alivio por estrés con metales traza	De acuerdo al nivel de estrés de metales pesados
Definir cuáles son los efectos de la aplicación integrada de biocarbón y microorganismos en la remediación de suelos expuestos a metales traza	¿Cuáles son los efectos de la aplicación integrada de biocarbón y microorganismos en la remediación de suelos expuestos a metales traza?	Efectos de la aplicación integrada de biocarbón y microorganismos (Kiran Boda R. et al., 2019, p.1)	Mejóro la biomasa de las hojas Reducción de la biodisponibilidad de metales traza (Gonzaga Maria I. et al., 2017, p.1)	De acuerdo a la concentración del metal traza	De acuerdo al microorganismo empleado
Definir cuáles son los efectos de la aplicación integrada de biocarbón y nutrientes en la remediación de suelos expuestos a metales traza	¿Cuáles son los efectos de la aplicación integrada de biocarbón y nutrientes en la remediación de suelos expuestos a metales traza?	Efectos de la aplicación integrada de biocarbón y nutrientes (Bilal Muhammad et al., 2019, p.2)	Efectos sobre la planta Porcentaje de concentración reducido Ehab A. et al., (2022, p.1)	De acuerdo al tipo de nutriente usado	De acuerdo a la concentración de metal traza presente

ANEXOS N° 2: Instrumento de recolección de datos

 UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO	FICHA DE ANÁLISIS DE CONTENIDO
---	---------------------------------------

TITULO:

DATOS DEL AUTOR: NOMBRE(S)		
PAGINAS UTILIZADAS	AÑO DE PUBLICACION	LUGAR DE PUBLICACION
TIPO DE INVESTIGACION:		
CÓDIGO:		
PALABRAS CLAVES :		
TIPO DE BIOCARBÓN:		
TIPO DE MICROORGANISMO:		
EFFECTOS DE LA APLICACIÓN INTEGRADA:		
RESULTADOS :		
CONCLUSIONES:		

Elaboración propia



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

Declaratoria de Autenticidad del Asesor

Yo, ESPINOZA FARFAN EDUARDO RONALD, docente de la FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA de la escuela profesional de INGENIERÍA AMBIENTAL de la UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO SAC - LIMA ESTE, asesor de Tesis Completa titulada: "Aplicación Integrada de Biocarbón con Microorganismos y Nutrientes Vegetales para la Remediación de Metales Traza en Suelos Agrícolas: Revisión sistemática", cuyos autores son RAMIREZ BARDALES MARCOS DANIEL, GABULLE GAMARRA RONALDO STEFANO, constato que la investigación tiene un índice de similitud de 9.00%, verificable en el reporte de originalidad del programa Turnitin, el cual ha sido realizado sin filtros, ni exclusiones.

He revisado dicho reporte y concluyo que cada una de las coincidencias detectadas no constituyen plagio. A mi leal saber y entender la Tesis Completa cumple con todas las normas para el uso de citas y referencias establecidas por la Universidad César Vallejo.

En tal sentido, asumo la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de información aportada, por lo cual me someto a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad César Vallejo.

LIMA, 29 de Noviembre del 2022

Apellidos y Nombres del Asesor:	Firma
ESPINOZA FARFAN EDUARDO RONALD DNI: 40231227 ORCID: 0000-0003-4418-7009	Firmado electrónicamente por: ERESPINOZAF el 30- 11-2022 23:26:33

Código documento Trilce: TRI - 0461149