



Scientia Agropecuaria

Web page: <http://revistas.unitru.edu.pe/index.php/scientiaagrop>

Facultad de Ciencias
Agropecuarias

Universidad Nacional de
Trujillo

RESEARCH ARTICLE



Biochar derived from pig manure with ability to reduce the availability of Pb in contaminated agricultural soils

Biocarbón derivado de excretas porcinas con capacidad de disminuir la disponibilidad de Pb en suelos agrícolas contaminados

Rita Jaqueline Cabello-Torres^{1,*} ; John Robert Romero-Longwell² ; Lorgio Valdiviezo-Gonzales¹ ; Rubén Munive-Cerrón^{3,2} ; Carlos Alberto Castañeda-Olivera² 

¹ Universidad César Vallejo, Escuela profesional de Ingeniería Ambiental, Campus San Juan de Lurigancho, Lima. Peru.

² Universidad César Vallejo, Escuela profesional de Ingeniería Ambiental, Campus Los Olivos, Lima. Peru.

³ Universidad Nacional del Centro del Perú, Facultad de Agronomía, Huancayo. Peru.

* Corresponding author: rcabello@ucv.edu.pe, rcabelot@hotmail.com (R. J. Cabello-Torres).

Received: 27 January 2021. Accepted: 23 August 2021. Published: 8 October 2021.

Abstract

The use of organic amendments improves the quality and increases the fertility of the soils due to their adsorption properties, stimulates nutrient cycling and can be used to reduce the availability of heavy metals. The main objective of the research was to evaluate the effect of biochar (BC) derived from pig manure on the availability of Pb in a contaminated and limed agricultural soil. A randomized experimental design was applied, the pig manure was dried at room temperature (23 °C) and pyrolyzed at 500 °C for 2 h. Doses of 5%, 10% and 20% of BC were applied to the Pb soils contaminated (165.7 mg/kg), that were arranged in 2 kg pots except for the control sample, and *Lactuca sativa* was subsequently grown cultivated to evaluate the Pb availability. The results indicated an improvement in soil quality at higher BC dose, increase of 0.34 pH units, decrease of Pb extracted by EDTA (27% to 62% of decrease), and non-significant Pb content in leachates (< 1 mg Pb/L) and no detection in plant roots (< 0.01 mg/kg), except for the control plant (0.7 mg Pb/kg) in the original soil. A logarithmic relational model between BC dose and Pb adsorbed in the soil was obtained ($R^2 = 0.9938$, $p < 0.05$) showing that the decrease of Pb availability in the soil increased for higher BC doses, which represents an eco-friendly remediation alternative. It is recommended to investigate the interaction relationships between the soil quality parameters and to establish functional models of bioaccumulation and extractable metal of the amended soil.

Keywords: pig manure; biochar; Pb availability; contaminated soil; bioremediation.

Resumen

El uso de enmiendas orgánicas mejora la calidad y aumenta la fertilidad de los suelos debido a sus propiedades de adsorción, estimula el ciclo de nutrientes y puede usarse para reducir la disponibilidad de metales pesados. El principal objetivo de la investigación fue evaluar el efecto del biocarbón (BC) derivado de las excretas porcinas sobre la disponibilidad de Pb en un suelo agrícola contaminado y encalado. Se aplicó un diseño experimental aleatorizado, las excretas de cerdo se secaron a temperatura ambiente (23 °C) y se pirolizaron a 500 °C durante 2 h. Se aplicaron dosis del 5%, 10% y 20% de BC a los suelos contaminados con Pb (165,7 mg/kg), que se dispusieron en macetas de 2 kg con excepción de la muestra control, y posteriormente se cultivó *Lactuca sativa* para evaluar la disponibilidad de Pb. Los resultados indicaron una mejora en la calidad del suelo a dosis más altas de BC, aumento de 0,34 unidades de pH, disminución de Pb extraído por EDTA (27% a 62% de disminución) y contenido no significativo de Pb en lixiviados (< 1 mg Pb/L) y sin detección en raíces de plantas (< 0,01 mg/kg), excepto para la planta de control (0,7 mg Pb/kg) en el suelo original. Se obtuvo un modelo relacional logarítmico entre la dosis de BC y el Pb adsorbido en el suelo ($R^2 = 0,9938$, $p < 0,05$) que muestra que la disminución de la disponibilidad de Pb en el suelo aumentó para dosis más altas de BC, lo que representa una alternativa de remediación ecológica. Se recomienda investigar las relaciones de interacción entre los parámetros de calidad del suelo y establecer modelos funcionales de bioacumulación y metal extraíble del suelo enmendado.

Palabras clave: excretas porcinas; biocarbón; disponibilidad de Pb; suelo contaminado; bioremediación.

DOI: <https://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2021.050>

Cite this article:

Cabello-Torres, R. J., Romero-Longwell, J. R., Valdiviezo-Gonzales, L., Munive-Cerrón, R., & Castañeda-Olivera, C. A. (2021). Biocarbón derivado de excretas porcinas con capacidad de disminuir la disponibilidad de Pb en suelos agrícolas contaminados. *Scientia Agropecuaria*, 12(4), 461-470.

1. Introducción

El desarrollo industrial ha liberado los metales pesados y las actividades como la minería, uso de las aguas residuales para riego en tierras de cultivo entre otros, ha causado problemas de contaminación y alteraciones fisicoquímicas en los suelos (Yang et al., 2021a; Vejvodová et al., 2020; Gaurav & Sharma, 2019; Jing et al., 2018). El impacto sobre los cultivos, debido a la disponibilidad de los metales presentes en diversas formas o especies químicas, en la solución del suelo, se produce por la absorción de estos contaminantes en las plantas, así ingresan a la cadena trófica y al ser humano por el consumo de alimentos contaminados. Esta situación ha generado una mayor conciencia respecto a la seguridad alimentaria y a la contaminación del suelo (Lahori et al., 2017).

En la actualidad, se han desarrollado diversas alternativas tecnológicas para el tratamiento de suelos, a fin de lograr su remediación o mitigación, ante los efectos nocivos de los elementos metálicos (Vejvodová et al., 2020). Entre las técnicas fisicoquímicas, destaca la aplicación de enmiendas comerciales, que además actúan como adsorbentes, pero pueden resultar costosos y de acceso limitado; sin embargo, hace algunos años el concepto de revalorización de los residuos orgánicos ha merecido especial atención, por convertirse en materiales precursores para la producción de biocarbón (BC), usado como mejorador de la calidad del suelo y adsorbente amigable con el ambiente (Zhou et al., 2018).

El BC es un producto de la pirólisis de la materia prima biodegradable, al calentarlo hasta alcanzar una alta temperatura en un entorno limitado de oxígeno (Lebrun et al., 2020a). Se puede fabricar BC a partir de residuos vegetales, estiércol de animales, lodos de plantas de tratamientos de aguas residuales o de animales muertos bajo diferentes condiciones pirolíticas, que afectan sus propiedades finales (Wang et al., 2020). Los costos de su producción han sido discutidos por Zhang et al. (2019a); en términos económicos y energéticos, principalmente, dependen del material precursor, técnica usada, dimensiones de producción, rendimiento, costo de aplicación y de su valor como compensador de la emisión de los gases de efecto invernadero.

El sector agroindustrial, ha desarrollado prototipos pirolíticos cada día más eficientes que pretenden disminuir el gasto energético para producir BC (Heredia-Salgado & Tarelho, 2018). Actualmente se incluyen procesos de pirólisis asistida por microondas, co-pirólisis, pirólisis húmeda, enfoques de modificación mineral, fotocatalítica, electroquímicas; pero la aplicación de técnicas pirolíticas lentas y rápidas han resultado beneficiosas y económicas (Zhang et al., 2019b). Esta diversidad causa distintos efectos en el producto final (BC) y su aplicación afecta a las propiedades fisicoquímicas del suelo (Wang et al., 2020).

La ventaja del uso del BC comprende la mejora de la calidad del suelo y su remediación, favorecidos por un incremento del área de superficie específica, microporosidad y capacidad de intercambio iónico (Tareq, Akter & Azam, 2019; Liu et al., 2017), influye en la disponibilidad de nutrientes y en la actividad de las raíces para absorberlos,

produce cambios en el pH del suelo y aumenta la actividad de los microorganismos (Boostani et al., 2021). El BC posee agentes quelantes que proveen grupos funcionales como el oxígeno o minerales de grupos de S^{2-} , PO_4^{3-} y CO_3^{2-} , micas entre otros, que generan una atracción con los metales de carga positiva formando nuevos compuestos que son adsorbidos en las redes de las partículas (Han et al., 2017; Lahori, et al., 2017; Mitchell et al., 2020). Sin embargo, el pH de un suelo es el principal factor que determina su movilidad y son los valores de pH alcalinos o neutros los que se asocian a fracciones de carbonatos en el suelo (Mitchell et al., 2020).

Entre los metales, el Pb es uno de los más tóxicos, su liberación en el suelo implica una amplia movilidad ambiental y disminuir su disponibilidad y bioabsorción en los tejidos vegetales resulta crucial. Kabiri et al. (2021) trataron suelos calcáreos contaminados con Pb usando biocarbón derivado de las hojas de nogal, pirolizado entre los 200 °C y 600 °C, luego incubó el suelo modificado con BC al 20%, en macetas por 45 días y reportó una menor liberación de Pb cuando aplicó la enmienda producida a 600 °C, la formación de óxidos intercambiables y el par Fe/Mn, disminuyeron la toxicidad del metal en el suelo. Yang et al. (2021a) demostró que condiciones oxidantes (> +100 mV) en la solución suelo, asociadas a un pH elevado provocaba en los coloides el aumento en la capacidad de intercambio catiónico (CIC) incrementando la adsorción de Cd/Pb y disminuyendo su movilidad (Rinklebe et al., 2020); ya que en un medio oxidante los sulfuros pasan a SO_4^{2-} , y el Pb disuelto (pH > 7) se agrupa con el Fe/Mn disueltos e implicados en el ciclo redox.

Zhuo et al. (2020) aumentaron el pH del suelo contaminado con Pb/Cd con cultivo de *Zea mays* por 12 semanas usando BC y redujeron el Cd/Pb extraíble del suelo; mientras que Wei et al. (2021), analizaron por 3 años esta aplicación de BC y concluyeron que mayores dosis de BC generan mayor efecto temporal para reducir de Pb/Cd en los granos de maíz siendo el pH del suelo el factor que controla la acumulación (Adejumo et al., 2020).

Vejvodová et al. (2020), demostró que la pirólisis lenta entre 350 °C y 500 °C mejoraba las propiedades del BC por sus grupos funcionales y mejoraba el pH en un suelo de cultivo de trigo, con una dosis del 2% de BC, inmovilizando Cd/Pb/Zn por mecanismos de la capacidad de intercambio catiónico (CIC). Aplicaciones de BC en suelos mineros contaminados con Pb y cultivos de trigo (Lebrun et al., 2020a) o esquejes de *Salix dasyclados* Wimm (Lebrun et al., 2020b) mostraron menores proporciones de absorción del metal en la superficie de la raíz que dentro del sistema radicular, implicando una disminución en la acumulación y una inmovilización simultánea en el suelo, reflejados en los factores de bioacumulación y de translocación (Voca et al., 2020).

Yang et al. (2021b) inmovilizaron Pb/Cd/Zn en distintos suelos contaminados usando biocarbón de excretas porcinas, mejoraron el pH de suelos ácidos a valores alcalinos, disminuyeron la disponibilidad de los metales a mayor dosis de BC; la transformación de excretas porcinas ha llamado la atención ante su incremento generado por la industria agropecuaria que trata de responder a la creciente demanda alimentaria (Zhou et al., 2018).

Su aprovechamiento como BC se debe a la presencia de estructuras aromáticas, oxígeno y compuestos inorgánicos minerales carbonatados, aluminio-silicatos y grupos funcionales que generan propiedades quelantes, elevada superficie específica disminuyendo la movilidad del metal contaminante (Xu et al., 2017).

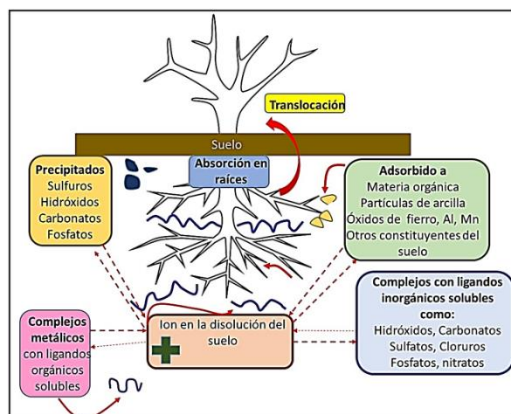


Figura 1. Especies químicas de un metal en el suelo (adaptado de Sarwar et al., 2017).

La Figura 1 describe las formas de movilidad del metal pesado sujeto a factores ambientales y de entorno en el sistema suelo-lixiviado-planta, evaluar su disponibilidad en el sistema es crucial (Samsuri et al., 2019), para ello, planteamos un balance simple considerando al metal retenido en el suelo, sea adsorbido, precipitado, disuelto (lixiviado) y absorbido en la planta, se ha despreciado el efecto de volatilización y su contenido en aguas superficiales o subterráneas bajo la siguiente expresión: $S = L + P + E$; donde, S representa el contenido de Pb en el sistema suelo-lixiviado-planta, L es el Pb lixiviado, P es el Pb absorbido en la planta (raíces y E es el Pb extractable en el suelo.

La aplicación de una solución de ácido etilendiaminetetraacético (EDTA) para la extracción de Pb en el suelo resulta apropiada para determinar la disponibilidad del Pb en el sistema.

A diciembre de 2020, Perú se encontró dentro de los primeros 4 países productores de Pb en el mundo, con una producción de 483.096 miles de toneladas métricas de contenido fino (Ministerio de Energía y Minas de Perú, 2021). En el distrito de San Mateo de Huanchor de la sierra limeña se han producido históricamente conflictos socioambientales por los relaves mineros que contaminaron los suelos agrícolas de la zona. Además, Lima convertida en una mega ciudad de más de 10 millones de habitantes (Instituto Nacional de Estadística e Informática, 2019), ha incrementado la crianza de cerdos, para atender la alimentación humana y con ello aumentó la producción de estiércol (11.050 t de estiércol/año) que es dispuesta de manera inadecuada (Instituto Nacional de Estadística e Informática, 2017); por ende su transformación como BC representa una alternativa para la remediación de los suelos contaminados (Lahori et al., 2017).

El objetivo principal de esta investigación ha sido evaluar la capacidad del biocarbón derivado de las excretas porcinas para disminuir la disponibilidad de plomo en los suelos agrícolas de San Mateo de Huanchor-Lima. Los objetivos específicos de este experimento fueron (i) Analizar el efecto de la aplicación del biocarbón sobre las propiedades fisicoquímicas del suelo de cultivo, (ii) Evaluar el efecto de las dosis de biocarbón sobre el contenido de Pb en las matrices del sistema suelo-agua-planta y (iii) evaluar los efectos del biocarbón entre las propiedades fisicoquímicas del suelo y la disponibilidad del Pb en la lechuga.

2. Materiales y métodos

2.1 Área de estudio y colección de muestras de suelo

La zona de estudio correspondió al área agrícola del distrito San Mateo de Huanchor ubicada a 3.185 m s.n.m., la posición del área se determinó por medio de un Sistema de Posicionamiento Global (GPS, Marca GARMIN, Modelo Etrex Vista H, Serie 1JY061782, China) y fue localizada entre 11°45'31" S y 76°18'00" O, en la cuenca alta del río Rímac en la sierra de Lima, al norte de la provincia de Huarochirí y en el centro de la vertiente occidental de la cordillera de los andes, distanciada 95 km de la capital de Perú (ciudad de Lima) (Figura 2).

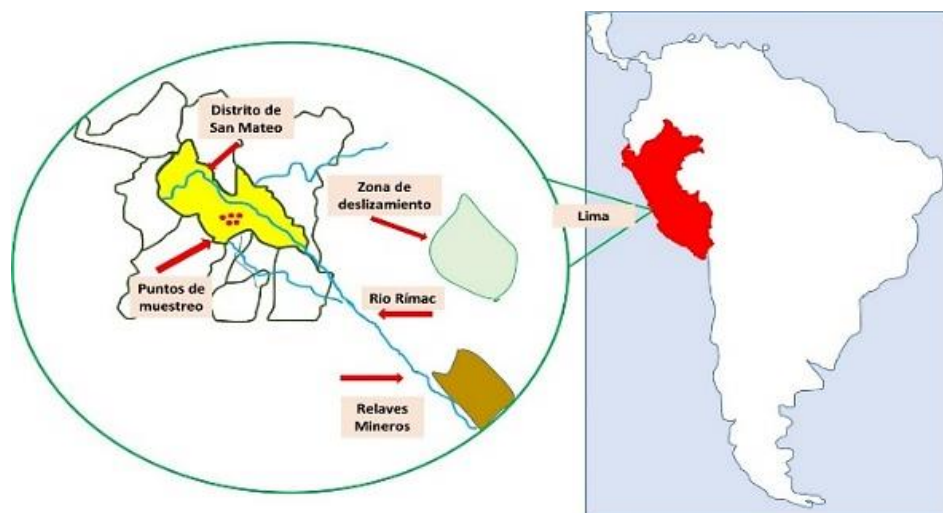


Figura 2. Zona de estudio. Área agrícola en el Distrito de San Mateo de Huanchor- Lima.

Se recolectó suelo de una parcela de la zona agrícola en desuso mediante calcatas usando palas, se separaron los primeros 20 cm de profundidad del suelo superficial en 5 puntos de la zona. En el campo, el material fue tamizado en malla de polipropileno de 2 mm, luego se aplicó el método de cuarteo, y se separaron 30 kg de suelo para el experimento.

2.2 Elaboración de Biocarbón

Se emplearon 4,30 kg de excretas porcinas de un criadero de cerdos para preparar la enmienda orgánica, estas se pre-secaron a 70 °C por 3 h es una estufa de secado de convección natural digital (Marca RAYPA Modelo DAF 43 Serie 53039, España), luego se dejó reposar a temperatura ambiente por 24 horas y después se determinó el peso final (4,0 kg) en una balanza analítica (0,0001 g) (Marca SARTORIUS, modelo ENTRIS3202 -1S, Serie 34607521, España), finalmente se determinó la humedad del material precursor (6,98%). La pirolisis lenta se realizó a 500 °C durante 2 h en una mufla (Marca NABERTHERN, Modelo HTCT 03/15, Serie 339096, Alemania) sin aplicación de aire forzado, en el laboratorio de la Universidad César Vallejo y nuevamente se dejó reposar por 24 h antes de su aplicación con un rendimiento de 1,36 kg de biocarbón.

2.3 Preparación de las macetas, siembra y mantenimiento

Para este experimento se consideraron cuatro condiciones de prueba por maceta duplicada: Suelo de Huanchor (SH) no modificado (Control), SH + enmendado al 5% BC

(BC5), SH + 10% BC (BC10), SH + 20% BC (BC20). Para todos los tratamientos incluyendo el suelo control (SH), se prepararon diez macetas de 2 kg. Las mezclas en las macetas no fueron fertilizadas y fueron humedecidas con agua deionizada para alcanzar una humedad del 60% de la capacidad de campo, entonces todas las macetas se dejaron reposar por 7 días en un ambiente de invernadero bajo condiciones ambientales controladas con una temperatura promedio de 20 °C y humedad relativa promedio de 80%.

Es importante mencionar que las semillas de *Lactuca sativa* (lechuga americana) fueron tratadas por 5 minutos en una solución de H₂O₂ (2%, v/v), una vez enjuagadas con agua deionizada se dejaron remojar en ella por 1 día. Luego diez semillas de la lechuga americana fueron sembradas las cuales germinaron y se obtuvieron plántulas al cabo de una semana, la humedad del suelo siempre se mantuvo al 80% de la capacidad de campo, para lograr esta condición se pesaron las macetas diariamente ajustando la pérdida de agua con respecto al peso inicial (2,6 kg), lo cual se mantuvo durante todo el experimento. Cuando las plántulas alcanzaron los 5 cm se arrancaron aquellas que mostraron mayor deterioro quedando solo la más factible de sobrevivencia. Al cabo de 60 días todas las plantas maduras se cosecharon y se separaron cuidadosamente de cada maceta, para evaluar la disponibilidad del Pb y su acumulación en las raíces de la planta.

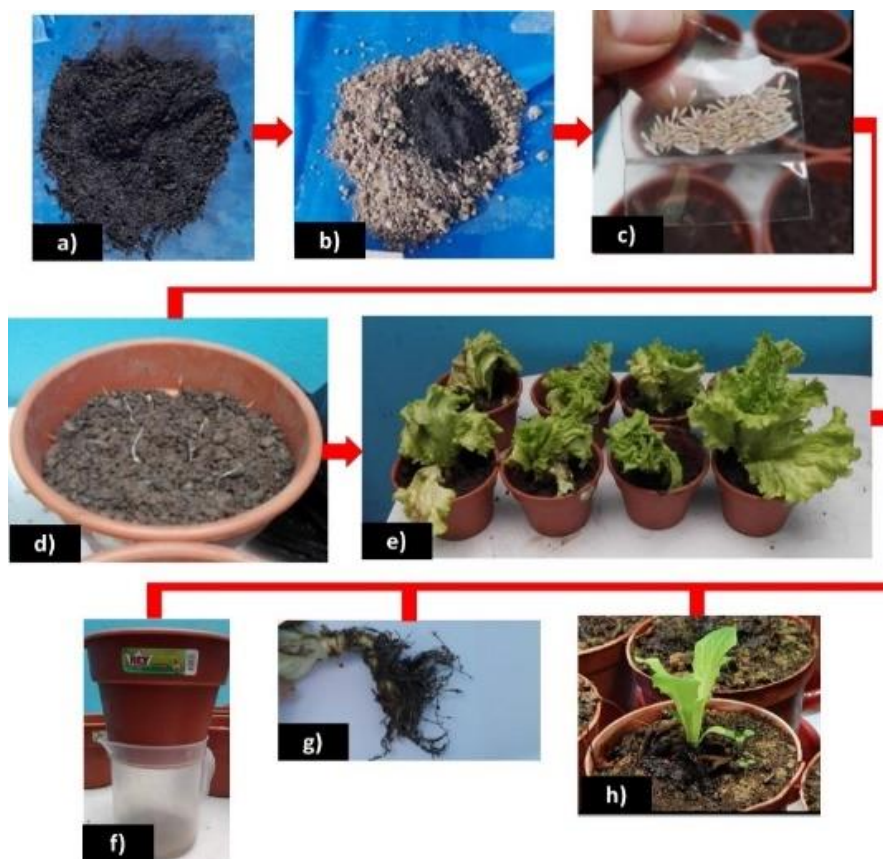


Figura 3. Experimento en macetas: a) Biocarbón, b) preparación de suelos modificados, c) semillas de *Lactuca sativa*, d) brotes incipientes de cultivo, e) cultivos a los 60 días, f) lixiviado, g) separación de raíces h) suelos tratados para análisis fisicoquímicos.

La "lechuga americana" fue cosechada de cada maceta a los 2 meses de cultivo, una vez separada las raíces fueron cortadas empleando una navaja de acero inoxidable y sometidas a una limpieza de partículas adheridas enjuagadas con agua deionizada, y luego fueron almacenadas en bolsas de polietileno herméticas hasta su análisis correspondiente. La **Figura 3** muestra el proceso aplicado en el experimento.

2.4 Análisis fisicoquímicos y cuantificación de Pb

Análisis de Pb en suelos. Se separaron alícuotas de los suelos modificados y del suelo control (SH) antes de la siembra de *Lactuca sativa*. Esta separación de muestras de suelo se repitió por cada maceta al final del período de cultivo (60 días) con la finalidad de determinar las concentraciones de Pb disponibles, la extracción se realizó usando una solución de acetato de amonio + ácido etilendiaminotetraacético (EDTA) en medio ácido (pH = 4,65) para lograr una extracción con una proporción suelo:solución extractante de 1:5.

Análisis de Pb en raíces. Asimismo, al cabo de 60 días de cultivo, se cosecharon las lechugas y se separaron las raíces por cada tratamiento, las raíces fueron cortadas empleando una navaja de acero inoxidable y fueron enjuagadas con agua deionizada para eliminar las partículas adheridas, luego fueron almacenadas en bolsas de polietileno herméticas hasta su análisis correspondiente. Los tejidos vegetales incluyendo las raíces por cada maceta, fueron secados en estufa por 4 días a 60 °C, se registró el peso seco de las raíces, estas fueron sometidas a molienda y luego tamizadas (< 2 mm), se pesaron 0,2 g de las raíces y se trataron con 10 ml de HNO₃ concentrado dispuestos en frascos de polietileno y luego digeridos a 120 °C por 2 horas en una autoclave manual (marca KINTEL, modelo YX – 18HDJ, México), posteriormente las mezclas fueron filtradas y diluidas a 50 ml para su medición de Pb.

Análisis de Pb en lixiviados. Se colectó el lixiviado una vez regado el sistema para evaluar el contenido de Pb, las muestras y réplicas fueron acidificadas con gotas de HNO₃ concentrado y filtradas usando un filtro de fibra de vidrio de 45 micras, luego se almacenaron en frascos de polietileno bajo refrigeración a -4 °C. Par el análisis las muestras fueron concentradas a 60 °C en un agitador magnético con calefacción (marca DLAB modelo MS 7-H550 –PRO, China) bajo campana de extracción (Marca ESCO Ductless, Modelo ADC – AC 3, Singapur) y luego cada muestra y replica se diluyó hasta un volumen de 50 ml para la cuantificación de Pb.

Cuantificación de Pb. El Pb contenido en los extractos de suelos, raíces de lechuga y lixiviado fueron cuantificados mediante la técnica de espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-Masa, Perkin Elmer NexION 300D, Agilent Technologies, Estados Unidos).

La **conductividad eléctrica (CE)**, se midió a partir del extracto acuoso de una relación de pasta de suelo saturado en agua con una relación igual a 1:1, en un equipo conductímetro (marca OAKTON, modelo CON 700, EE. UU). La materia orgánica (MO) se determinó por

pérdida de ignición, para ello las muestras fueron secadas en el horno por 3 horas a 550 °C. La textura de suelos se analizó por el método de Bouyucos usando hidrómetro calibrados. El pH se midió usando un potenciómetro (marca CRISON, modelo BASIC 20, España), en una suspensión de suelo 1:1. La capacidad de intercambio catiónico (CIC) se por saturación con acetato de amonio a un pH de 7.

2.5 Análisis estadísticos

Se promediaron los valores de concentración de Pb cuantificados en cada matriz evaluada (suelo, lixiviado y raíces de la planta) y sus desviaciones estándar por cada tratamiento aplicado (BC5, BC10, BC20) incluyendo la muestra control (SH) al cabo de 60 días de cultivo. Se efectuó la prueba ANOVA para determinar el efecto de cada tratamiento de BC sobre el sistema suelo, basado en el p-valor con un 95% de confianza y se demostró las diferencias significativas en la adsorción de Pb en el suelo contaminado. A partir de las dosis de BC aplicadas a los suelos y de su contenido de Pb, se establecieron 2 modelos de retención de Pb, uno lineal y el otro logarítmico, que demuestra el potencial del BC derivado de excretas porcinas para disminuir la disponibilidad del metal en el suelo agrícola, considerando como factores de decisión el p-valor y el factor R² de ajuste del modelo que fue generado en el programa Excel.

3. Resultados y discusión

3.1 Caracterización del suelo y del biocarbón

La **tabla 1** muestra las características principales del suelo original y del biocarbón elaborado a partir de excretas porcinas.

Tabla 1
Caracterización inicial de suelo sin tratamiento y biocarbón

Parámetros	Unidad	Suelo	Biocarbón
CE	dS/m	2,3	4,3
Arena	%	43,48	-
Limo	%	33,28	-
Arcilla	%	23,2	-
Textura		franco	-
MO	%	3,94	6,99
pH	-	8,06	9
CIC	meq/100g suelo	15,81	60,2
P	ppm	26,79	184,2
K	ppm	126,6	15,5
CaCO ₃	%	8,01	-
Pb	mg/kg	165,7	n.a.

n.a.: no analizado.

La textura del suelo comprendió un contenido discreto de arcillas (23,2%) y limo (33,28%), con un mayor porcentaje de arenas confirriéndole una textura franco arenoso (**Tabla 1**). También se describen condiciones alcalinas (pH = 8,06) y un valor moderado del CIC (15,81 meq/100 g de suelo), lo cual señala cierta capacidad del suelo de retener Pb, asociado a la presencia de materia orgánica (3,94%) conformada por material coloidal presente en la matriz suelo. Además, la conductividad eléctrica CE (2,3 dS/m) indicó un suelo no salino (< 2 dS/m), con un contenido discreto de fósforo (26,79 mg/kg) predispuerto a formar precipitados y a ser consumido por la planta.

Tabla 2
Resultados del tratamiento de suelos con biocarbón de excretas porcinas

a) Resultados analíticos: determinación del contenido de Pb extractable en suelo, lixiviado y en <i>Lactuca sativa</i>								
(a) Biochar (%)	(b) Pb _e extractable en suelo (mg/kg)	(c) Pb _f extractable en suelo (mg/kg)	(d) Lixiviado _o de Pb (mg/L)	(e) Lixiviado _f de Pb (mg/L)	(f) Pb en raíces de <i>Lactuca</i> <i>s.</i> (mg/kg)	(g) Pb total extractable inicial* (mg/kg)	(h) Pb total extractable final* (%)	(i) Total Pb adsorbido en el suelo (%)
0	165,7	166,6	0,9	1,2	0,7	168,5	100	0
0	165,7	169,7	0,82	0,88	<0,01	167,4	102	0
5	181,0	113,3	0,7	0,45	<0,01	182,15	62	38
5	181,0	105,5	0,6	0,33	<0,01	181,93	58	42
10	194,6	85,4	0,61	0,25	<0,01	195,46	44	56
10	194,6	112,8	0,5	0,3	<0,01	195,4	58	42
20	165,4	44,3	0,45	0,1	<0,01	165,95	27	73
20	165,4	60,4	0,5	0,07	<0,01	165,97	36	64
b) Resultados estadísticos Media y desviación estándar								
(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)	(i)
0	165,7 ± 0,0	168,15 ± 2,2	0,86 ± 0,1	1,04 ± 0,2	0,7 ± 0,0	167,95 ± 0,8	101 ± 1,4	0 ± 0,0
5	181,0 ± 0,0	109,4 ± 5,5	0,65 ± 0,1	0,39 ± 0,1	< 0,01	182,04 ± 0,2	60 ± 2,8	40 ± 2,8
10	194,6 ± 0,0	99,1 ± 19,4	0,555 ± 0,1	0,275 ± 0,0	< 0,01	195,3 ± 0,0	51 ± 9,9	49 ± 9,9
20	165,4 ± 0,0	52,35 ± 11,4	0,475 ± 0,1	0,085 ± 0,0	< 0,01	165,96 ± 0,0	31,5 ± 6,4	68,5 ± 6,4

* en el sistema agua-suelo-planta. Pb_e: Pb en los suelos enmendados, muestra testigo y lixiviado, al inicio del cultivo. Pb_f: Pb en los suelos enmendados, muestra testigo y lixiviado al final del cultivo.

Respecto a la elaboración de BC, **Awasthi et al. (2020)** reportaron que la excreta porcina presenta un pH de 8,31 y **Alaboudi, Ahmed, & Brodie (2019)** señalaron que su BC posee un pH de 9,45 cuando el material precursor fue sometido a una pirólisis lenta (**Meng et al., 2018**) a 400 °C durante 2 horas, esto aumentó su alcalinidad, de manera similar a lo ocurrido en este experimento con un tratamiento pirolítico de 500 °C por 2 horas para la excreta porcina que generó un pH de 9 y una CE igual 2,3 dS/cm. Esta situación aseguró una alta capacidad amortiguadora en el suelo contaminado que originalmente se hallaba enmendado con CaCO₃ (8,01%), además el alto contenido de materia orgánica registrado para el biocarbón (6,99%), mejoró el encalamiento del suelo, lo cual se tradujo en un incremento de 0,34 unidades de pH en los suelos modificados con biocarbón (**Alaboudi et al., 2019**) lo que facilitaría la formación de fosfatos debido a su elevado contenido en el BC (126,6 mg/kg) o de grupos insolubles con el Pb.

3.2 Concentración de Pb en las matrices del sistema suelo-agua-planta

Se diseñaron 03 tratamientos de suelo con dosis de biocarbón (BC) derivado de excretas porcinas, definidos como suelo enmendado al 5% de biocarbón (BC5), suelo enmendado al 10% de biocarbón (BC10), suelo enmendado al 20% de biocarbón (BC20), y un suelo control sin tratamiento (SH). La **Tabla 2a**, presenta los resultados del análisis de Pb extractable en las muestras de suelos enmendadas con distintos porcentajes de biocarbón y la muestra testigo al inicio (b) y al final de cada tratamiento (c), también se presenta las mediciones de Pb en el lixiviado colectado al inicio (d) y el acumulado al final del experimento (e). Se incluyen las mediciones de Pb en las raíces de la planta, que es el primer canal de absorción; sin embargo, en este caso, no se detectó la presencia de Pb (f).

La columna (g) muestra todo el Pb extractable presente al iniciar los tratamientos en el sistema suelo-agua-planta,

mientras que (h) expresa el porcentaje extractable al final de cada tratamiento, finalmente en (i) como producto del balance de materia se ha calculado el porcentaje de Pb adherido en el suelo como consecuencia de la aplicación del biocarbón producido por el balance de masa.

La aplicación de BC20 logró la mayor adsorción con un promedio de 68,5%, mientras que BC10 logró un promedio de 49% y el BC5 logró una adsorción del 40% de promedio de retención del metal en el suelo. De acuerdo con las columnas (d) y (e), los lixiviados disminuyeron su contenido de Pb conforme se incrementó el contenido de biocarbón en el suelo, confirmando las propiedades adsorbentes de la enmienda. A pesar de que el suelo presentó una característica franco-arenosa, es sabido que el contenido en arena no favorece en los procesos de retención o adsorción de los metales, sin embargo, resultó beneficioso la aplicación del biocarbón no solo por mejorar la calidad del suelo por los nutrientes presentes que favorecieron el crecimiento de la planta, sino por su contribución en la disminución de la disponibilidad del Pb hacia el cultivo. La **Tabla 2b**, muestra los resultados estadísticos registrados en este experimento para cada tratamiento.

Los resultados del análisis de ANOVA, efectuado para los valores de Pb adsorbidos entre los suelos modificados indicaron diferencias significativas entre los tratamientos y el control ($p = 0,002$), seguido del Pb extractable ($p = 0,003$) y lixiviado ($p = 0,006$), mientras que la evaluación de muestras emparejadas entre tratamientos del BC10 y BC20, no presentaron diferencias estadísticas, pero si se confirmaron las diferencias entre la muestra control (SH) con los demás tratamientos ($p < 0,05$).

La **Figura 3a** muestra la disminución de la disponibilidad del Pb en el sistema, expresado como la extractabilidad del suelo (curva azul), conforme se incrementó el porcentaje de BC aplicado en el suelo, mientras que el Pb retenido en el suelo (curva roja) se incrementa con el aumento de la dosis de BC en el suelo, lo cual refleja las propiedades de adsorción de la enmienda.

Tabla 3
Experimentos realizados con la aplicación de biocarbón de derivado de distintas fuentes en suelos contaminados con Pb

Sistema de elaboración	Residuo utilizado	Condiciones de fabricación	Dosis de Biocarbón	pH	Carbono	Tipo de suelos	Pb adsorbido en suelo (mg/kg)	Planta	Tiempo de cultivo (días)	Pb en raíces (mg/kg)	Referencias
Pirólisis lenta	excretas porcinas	Temperatura = 500 °C Tiempo = 2h En condiciones limitadas de O ₂	5%, 10% y 20%	8,06	-	Arena = 43,52% Arcillas = 23,2% Limo = 33,28% Suelo franco arenoso	165,7 - 194,6	<i>Lactuca sativa</i>	60	< 0,01	Este estudio
Pirólisis lenta	Biomasa leñosa y desechos verdes quemados de parques y jardines	Temperatura = 500 °C Tiempo = 4-5 h Condiciones de oxígeno muy limitadas	1%, 2,5%, 5%, 10%	9,01	79,84%	Limo = 12,80% Arcilla = 6,20 % Arena arcillosa	200, 400, 600	<i>Zea mays</i>	30	0,32 (10%) a 6,99 (1%)	Alaboudi, et al. (2019)
Pirólisis lenta	Paja de maíz (SC)	Temperatura = 350 °C Tiempo = 2h Partículas = 2 mm	10%- 20%	7,5-8,1	-	Arena = 10,6% Limo = 31,2% Arcilla = 58,2%	51	<i>Lactuca sativa L.</i>	60	0,89 (10%) y 0,27 (20%)	Wang et al. (2017)
Pirólisis lenta	Cenizas volantes procesadas (PFA) /bambú	Temperatura = 500 °C Tiempo = 0,5 h Partículas de cenizas = 1 mm	1% -2%	10,63	11,34% (cenizas) 85,58% (bamboo)	Arcilla 29,85 Limo 38,02 Textura Franco Arcilloso	23,6	<i>Zea mays L.</i>	60	0,9-1,2	Mujtaba et al. (2020)
Pirólisis por lotes	Bambú	Temperatura = 750 °C Tiempo = 3 h	2%	9,68	839 g/kg	Arena = 7,0% Limo = 71,6% Arcilla = 22,4% Partículas = 4 mm	119	Maíz Raigrás	30	980 (maíz) y 5500 (raigrass)	Xu et al. (2016)
Método de calentamiento semi-indirecto	<i>Prosopis juliflora</i> (PJB) y Ceniza de cáscara de arroz (RHA)	Temperatura = 400 a 450 °C Tiempo = 2 h	2,5%, 5%	9,55 (PJB) y 8,22 (RHA)	88,32% (PJB) 28,94% (RHA)	Arena = 40,38% Limo = 26,92% Arcilla = 32,70% Alfisol franco arcillosa	400 y 800	<i>Ricinus communis</i>	60	3,41 (5%) PJB 1,22 (5%) RHA	Kiran & Prasad (2019)
Pirólisis por lotes	Cáscara de mani (SP) y bloque de paja (SS) paja de maíz (SM)	Temperatura = 550 °C Tamaño = 0,25 mm	5%	9,87 (SP) 6,79 (SS) 7,59 (SM)	-	Suelos mineros Tamaño = 5 mm	26651,7	Col china	50	650 (SP) y 600 (SS), 625 (SM)	Xu et al. (2019)
Pirólisis con un suministro limitado de oxígeno	Biocarbón-cal-sepiolitezeolita (CA-1) Estiércol-cal-sepiolita (CA-2)	Temperatura = 350 °C Tiempo = 4 h Rampa= 5 °C/min	T5: CA-1 (6000 kg/ha) T8: CA-2 (3000 kg/ha)	11,6 (CA-1) 11,8 (CA-2)	32,5 g/kg (CA-1) 32,3 g/kg (CA-2)	Arena=12,3% Limo = 71,0% Arcilla = 16,7% Antrosoles estagnicos arcilloso púrpura	16,8	Trigo	20	6,31 (CA-1) 5,86 (CA-2)	Hamid et al. (2020)
Pirólisis lenta	1. Pasto varilla Switchgrass (SG) 2. <i>Panicum virgatum</i> (SGB) cama de aves de corral (PLB)	1er calentamiento = 200 °C y 1 h 2do calentamiento = 8,33 °C/min y 1 h Temperatura final = 700 °C y 2 h	0,5%, 1 %, 2 %, 4%	Gras 10,1 Aves 10,2	31,4% 27,8%	Partícula = 2 mm	49,9	<i>Lolium perenne</i> (raigrás)	75	43-120	Antonangelo & Zhang (2019)
Pirólisis lenta	1. Madera de álamo (PWB) 2. Bagazo de caña de azúcar (SCBB)	PWB: Temperatura = 550 °C Tiempo = 1 h SCBB: Tiempo = 8 h	3%, 7%	7,33 7,76	-	Arcilla 22% Limo 30,7% Arena 47,3% Franco arenoso pH = 7,20	44	<i>Lactuca sativa</i>	60	14-30 (biomasa aérea)	Khan et al. (2020)
Pirólisis lenta	Estiércol de conejo	Temperatura= 450 °C (BM450) y 600 °C (BM600) Rampa = de 3 °C/min; Tiempo = 1h	10%	10,59 10,58	11,34% 4,99%	Suelo minero	302	<i>Brassica napus</i> BM450; BM600	60	186 210	Gascó et al. (2019)
Pirólisis lenta	1. Tallos de Girasol (<i>Helianthus annuus L</i>) 2. Sesamo (<i>Sesamum indicum L</i>)	Temperatura = 300, 400, 500, 600, 700 °C Tiempo = 2 h Rampa =10 C/min Reactor tubular (SUG 1100)	-	9,22 - 11,37	-	Suelo agrícola	93,1	Girasol Sésamo	abril a julio	14,9	Zhou et al. (2020)

Además, el análisis químico de plomo en las raíces de la *Lactuca sativa* (al finalizar los 2 meses de cultivo) no detectó la presencia del metal ($< 0,01$ límite de detección), salvo en la muestra testigo, la cual presentó una concentración de $0,7$ mg/kg, indicando una mayor disponibilidad del Pb en el suelo sin BC. En la **Figura 3b**, se ha graficado el contenido del Pb adsorbido en el suelo en función de la dosis inoculada de BC al cabo de los 60 días. El ajuste estadístico ha mostrado una correlación lineal no significativa ya que su ajuste resultó con un p-valor $> 0,05$, mientras que la función logarítmica ha resultado significativa (p-valor $< 0,05$, $R^2 = 0,9938$); explicando la capacidad de retención de Pb en el suelo para las dosis aplicadas de biocarbón.

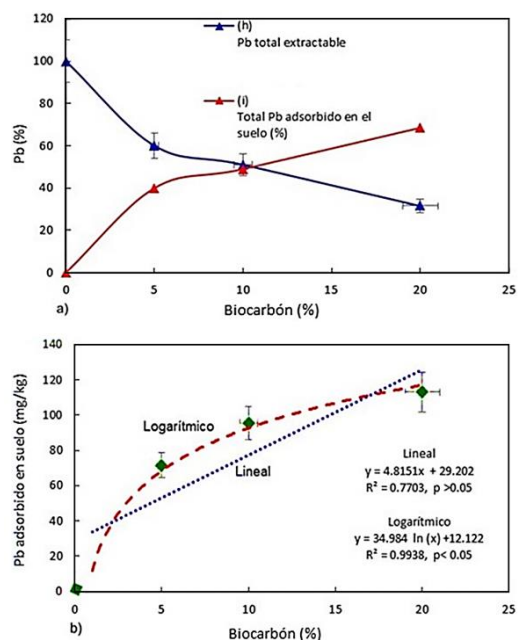


Figura 3. Contenido de plomo en a) suelos enmendados y lixiviados, b) Pb adsorbido en suelo (mg/kg) en función de las dosis de BC aplicado en el suelo.

3.3 Efectos del biocarbón en el suelo y en el cultivo

Los datos de elaboración de biocarbón y los efectos de su aplicación en suelos cultivados se presentan en la **Tabla 3**, en ella se muestra detalles de experimentos similares a esta investigación. **Xu et al. (2016)** produjo BC (de maíz y de raigrass) a 750 °C mediante una pirólisis lenta que redujo el contenido de Pb en la raíz del maíz (13,5% and 27,8%) hasta concentraciones de 980 y 5500 mg/kg y sugirió que los enlaces formados entre la elevada materia orgánica y el Pb en un periodo de 30 días causaron la disminución de su disponibilidad en el suelo. De manera similar, en esta investigación, la elaboración de biocarbón de excretas porcinas a 500 °C que presentó un mayor contenido de materia orgánica (6,99%) que el suelo original (3,94%) se habría enlazado con el Pb, motivo por el cual el metal no fue detectado en las raíces de la lechuga americana al final del cultivo (60 días).

Además, **Zhang et al. (2019a)** indicaron que el biocarbón actúa como un mejorador de suelo y facilita la adsorción de los nutrientes y metales por su afinidad polar con los grupos funcionales presentes en el BC; esta cualidad

permite una desorción lenta de los nutrientes, oligoelementos y de contaminantes como el Pb al sistema suelo. Esto significa que, en esta investigación, se produjo una mayor disponibilidad del metal en el suelo control, durante los 2 meses de cultivo, siendo absorbido por las raíces de la *Lactuca sativa* ($SH = 0,7$ mg Pb/kg). Sin embargo, a pesar del contenido de $CaCO_3$ (8,01%) en el suelo original, los suelos modificados con BC, incrementaron su capacidad de amortización produciendo un cultivo en el que no se detectó Pb en las raíces. Así, las plantas cultivadas en suelos modificados con BC presentaron mejor estado, según **Wang et al. (2017)** esta condición se debería, además, al contenido de cenizas del biocarbón derivado de excretas porcinas, el investigador, aplicó dosis de 10% y 20% de BC sobre suelos cultivados con la misma especie *Lactuca sativa* logrando un mejor cultivo comparado al de control. La abundancia de cenizas o minerales del BC en nuestra investigación se reflejó en la CE del suelo (4,3 dS/m) que habría incrementado su fertilidad y adsorción del metal.

También **Hamid et al. (2020)** cultivaron trigo en un suelo enmendado con cal, entonces proveyó Ca^{2+} generando un efecto sinérgico con el BC de estiércol de granja, entonces aumentó el pH del suelo y logró reducir la biodisponibilidad del Pb, tal como sucedió en nuestro experimento, se registró una mejora en la adsorción y reducción del Pb extraíble debido a la precipitación del Pb ligado al CO_3^{2-} , la adsorción superficial y su dependencia al pH facilitaron el desarrollo de la planta (**Kiran & Prasad, 2019**). Cabe señalar que el BC lleva una parte de fósforo y potasio en su estructura y su descomposición aumenta el contenido de estos nutrientes en el suelo, **Xu et al. (2019)** informó que los BC de cáscara de maní y de paja de maíz en suelos contaminados con Pb y cultivados con col china permitieron que la planta creciera sin mostrar efectos negativos en las propiedades fisiológicas. En este estudio el BC de excretas porcinas presentó contenidos de K (15,5 mg/kg) y P (126,6 mg/kg) cercanos a los obtenidos por **Wang et al. (2017)** en su experimento (K = 17,37 mg/kg y P = 51,70 mg/kg), el mayor contenido de P normalmente es alto en BC derivados de cuerpos de animales muertos (**Qin et al., 2018**).

Con relación a la metodología de cultivo, esta comprendió la siembra de semillas en cada maceta y la germinación condujo al desarrollo de la biomasa de la lechuga con adiciones entre el 5% y 20% de BC de excretas porcinas, para suelos con una concentración inicial de Pb entre 165,7 y 194,6 mg/kg, estas dosis resultaron superiores a las aplicadas por **Antonangelo & Zhang (2019)** con adiciones entre el 0,5% y el 2,0% de BC y menor contenido de Pb en el suelo (49,9 mg/g) logrando una mayor tasa de germinación de biomasa de *Lolium perenne* (raigrás) comparadas con las de control, al mismo tiempo observaron mayores concentraciones de Pb en las raíces del raigrás (43 a 120 mg/kg). Como en nuestro estudio, también **Kiran & Prasad (2019)** demostraron en el caso del cultivo de *Ricinus communis* (higuereta) una disminución significativa ($p < 0,05$), en la acumulación de Pb en la raíz (59% y 56%), al aplicar BC de *Prosopis*, y respecto a las especies herbáceas, **Khan et al. (2020a)** redujo la absorción de Pb en las raíces de

espinacas cultivadas (75% y 50%), así como en las raíces de las lechugas (26,3% y 47,4%) cultivadas en otro estudio (Khan et al., 2020b), a diferencia de dichas investigaciones, en nuestra prueba no fue detectado Pb en las raíces de la lechuga. Asimismo, el análisis de Pb extraíble en EDTA ha servido como un indicador de la biodisponibilidad del Pb en el suelo cultivado y se ha cuantificado la reducción de Pb extraíble entre el 27% y 62%, esta técnica fue aplicada también por Mujtaba et al. (2020) al tratar suelos de cultivo de maíz contaminados con Pb durante 60 días y enmendados con BC, logró entonces una reducción en la concentración de Pb extraíble con EDTA entre el 30,17% y 42,93% y un bajo contenido de Pb acumulado en las raíces del maíz (0,9 - 1,2 mg/kg). Esta capacidad de acumulación del metal en la planta se expresa mediante el factor de bioacumulación (FBA), definido como la razón entre la concentración de Pb en la raíz y la concentración de Pb en el suelo original, Xu et al. (2019) obtuvo un factor bioacumulación (FBA) < 1 con un valor máximo de 0,71 para las raíces de la col china usando una mezcla de BC (paja de maíz y maíz = 2:1), el BFA calculado en esta investigación no fue significativo (BFC = 0,004 < 1) en el suelo control ni en los suelos modificados con BC en los que no se detectó Pb.

4. Conclusiones

En este estudio, se investigaron los efectos de la aplicación de biocarbón derivado de excretas porcinas para disminuir la disponibilidad de Pb en suelos agrícolas contaminados cultivados con *Lactuca sativa* en dosis de 5, 10% y 15% de biocarbón comparado con el suelo control. La enmienda se caracterizó por presentar una mayor materia orgánica, capacidad de intercambio iónico, conductividad eléctrica, elevado contenido de fósforo y de potasio que mejoraron la calidad del suelo original previamente encalado con CaCO₃. El suelo contaminado con Pb presentó una textura franco arenoso con menores niveles de concentración de los parámetros fisicoquímicos, el pH original se incrementó discretamente en 0,34 unidades con la amortización de diferentes dosis de biocarbón del suelo antes encalado. Se logró disminuir el contenido de Pb extraíble con EDTA entre 27% y 62% en los suelos a los 60 días de cosecha y no se encontraron diferencias estadísticas entre los efectos de las dosis de biocarbón al 10% y 20% aplicado en los suelos, pero si con la dosis del 5% y la muestra control. Se demostró que el contenido de Pb en los lixiviados no fue significativo (< 1 mg Pb/L), mientras que la acumulación de Pb en las raíces de la especie cultivada *Lactuca sativa* resultó no detectable al cabo de los 2 meses de cultivo sin deterioro fisiológico visible comparados con la concentración de Pb (0,7 mg/kg) registrado en la planta control; esto confirmó la disponibilidad del Pb en el suelo original. La relación entre las dosis de biocarbón aplicado y el Pb adsorbido en el suelo originaron un modelo logarítmico significativo de mejor ajuste ($R^2 = 0,9938$, $p < 0,05$) demostrando que la disponibilidad del Pb en el suelo disminuyó al aplicar mayores proporciones de biocarbón derivado de excretas porcinas, debido a las condiciones fisicoquímicas mejoradas. Se recomienda el desarrollo de más investigaciones que demuestren las relaciones de interacción entre los parámetros fisicoquímicos del

sistema suelo y modelos funcionales entre la bioacumulación de la planta indicadora y el metal extraíble del suelo enmendado.

Declaración de intereses

Los autores declaran que no tienen intereses en conflicto.

Agradecimiento

Esta investigación fue financiada por el proyecto "Aplicación de biocarbón sobre suelos degradados en la selva amazónica identificados mediante imágenes satelitales proporcionadas por el sensor MODIS (MOD17A2H)" de la Universidad Cesar Vallejo aprobado mediante Resolución 047-2018-UCV-VI.

ORCID

R. J. Cabello-Torres  <https://orcid.org/0000-0002-9965-9678>
 J. R. Romero-Longwell  <https://orcid.org/0000-0003-1917-6543>
 L. Valdiviezo-Gonzales  <https://orcid.org/0000-0002-8200-4640>
 R. Murive-Cerrón  <https://orcid.org/0000-0001-8951-2499>
 C. A. Castañeda Olivera  <https://orcid.org/0000-0002-8683-5054>

Referencias bibliográficas

- Adejumo, S. A., Arowo, D. O., Ogundiran, M. B., & Srivastava, P. (2020). Biochar in combination with compost reduced Pb uptake and enhanced the growth of maize in lead (Pb)-contaminated soil exposed to drought stress. *Journal of Crop Science and Biotechnology*, 23, 273–288.
- Alaboudi, K. A., Ahmed, B., & Brodie, G. (2019). Effect of biochar on Pb, Cd and Cr availability and maize growth in artificial contaminated soil. *Annals of Agricultural Sciences*, 64, 95–102.
- Antonangelo, J. A., & Zhang, H. (2019). Heavy metal phyto-availability in a contaminated soil of northeastern Oklahoma as affected by biochar amendment. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 33582–33593.
- Awasthi, S. K., Liu, T., Awasthi, M. K., & Zhang, Z. (2020). Evaluation of biochar amendment on heavy metal resistant bacteria abundance in biosolids compost. *Bioresource Technology*, 306, 123114.
- Boostani, H. R., Najafi-Ghiri, M., & Safizadeh, M. (2021). Can Addition of Biochar and Zeolite to a Contaminated Calcareous Soil Mitigate the Pb-toxicity Effects on Spinach (*Spinacia Oleracea L.*) Growth? *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 52(2), 136–148.
- Gaurav, V. K., & Sharma, Ch. (2019). Estimating health risks in metal contaminated land for sustainable agriculture in peri-urban industrial areas using Monte Carlo probabilistic approach. *Sustainable computing: informatics and systems*, 28, 100310.
- Hamid, Y., Tang, L., Hussain, B., Usman, M., Rehman Hashmi, M. L., et al. (2020). Immobilization and sorption of Cd and Pb in contaminated stagnic anthrosols as amended with biochar and manure combined with inorganic additives. *Journal of Environmental Management*, 257, 109999.
- Han, L., Qian, L., Liu, R., Chen, M., Yan, J., & Hu, Q. (2017). Lead adsorption by biochar under the elevated competition of cadmium and aluminium. *Scientific Reports*, 7(1), 2264.
- Heredia-Salgado, M. A., & Tarelho, A. C. (2018). Biochar production as an alternative for energetic valorization or residual biomass generated in the Ecuadorian agroindustrial sector. *Boletín del Grupo Español del Carbón*, 49, 6–11.
- Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). (2017). Compendio estadístico Perú 2017. Recuperado de: https://www.inei.gov.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1483/cap19/cap19.pdf.
- Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). (2019). Población del Perú totalizó 31 millones 237 mil 385 personas al 2017. Nota de Prensa. Recuperado de: <https://www.inei.gov.pe/prensa/noticias/poblacion-del-peru-totalizo-31-millones-237-mil-385-personas-al-2017-10817/>

- Jing, F., Chen X., Wen, X., Liu, W., Hu, S., et al. (2019). Biochar effects on soil chemical properties and mobilization of cadmium (Cd) and lead (Pb) in paddy soil. *Soil Use Manage.*, 36, 320–327.
- Kabiri, P., Motaghian, H., & Hosseinpour, A. (2021). Impact of Biochar on Release Kinetics of Pb (II) and Zn (II) in a Calcareous Soil Polluted with Mining Activities. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 21, 22–34.
- Khan, A. Z., Ding, X., Khan, S., Ayaz, T., Fidel, R., & Khan, M. A. (2020a). Biochar efficacy for reducing heavy metals uptake by Cilantro (*Coriandrum sativum*) and spinach (*Spinacia oleracea*) to minimize human health risk. *Chemosphere*, 244, 125543.
- Khan, A. Z., Khan, S., Ayaz, T., Brusseau, M. L., Khan, M. A., et al. (2020b). Popular wood and sugarcane bagasse biochars reduced uptake of chromium and lead by lettuce from mine-contaminated soil. *Environmental Pollution*, 263, 114446.
- Kiran, B. R., & Prasad, M. N. V. (2019). Biochar and rice husk ash assisted phytoremediation potentials of *Ricinus communis* L. for lead-spiked soils. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 183, 109574.
- Lahori, A. H., Zhang, Z., Guo, Z., Li, R., Mahar, A., et al. (2017). Beneficial effects of tobacco biochar combined with mineral additives on (im)mobilization and (bio)availability of Pb, Cd, Cu and Zn from Pb/Zn smelter contaminated soils. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 145, 528–538.
- Lebrun, M., Alidou Arzika, I., Miard, F., Nandillon, R., Bayçu, G., et al. (2020a). Effect of fertilization of a biochar and compost amended technosol: Consequence on *Ailanthus altissima* growth and As- and Pb-specific root sorption. *Soil Use and Management*, 36, 766–772.
- Lebrun, M., Van Poucke, R., Miard, F., Scippa, G. S., Bourgerie, S., et al. (2020b). Effects of carbon-based materials and redmuds on metal(loid) immobilization and growth of *Salix dasyclados* Wimm on a former mine technosol contaminated by arsenic and lead. *Land Degradation and Development*, 32, 467–481.
- Liu, W., Huo, R., Xu, J., Liang, S., Li, J., et al. (2017). Effects of biochar on nitrogen transformation and heavy metals in sludge composting. *Bioresource Technology*, 235, 43–49.
- Meng, J., Tao, M., Wang, L., Liu, X., & Xu, J. (2018). Changes in heavy metal bioavailability and speciation from a Pb-Zn mining soil amended with biochars from co-pyrolysis of rice straw and swine manure. *Science of The Total Environment*, 633, 300–307.
- Ministerio de Energía y Minas de Perú. (2021). Producción minera anual 2011 - 2020. Recuperado de: http://www.minem.gob.pe/_estadistica.php?idSector=1&idEstadistica=12501.
- Mitchell, K., Mendoza-González, C. V., Ramos-Gómez, M. S., Yamamoto-Flores L., Guerrero-Barrera A. L., et al. (2020). The effect of low-temperature biochar and its non-pyrolyzed composted biosolids source on the geochemical fractionation of Pb and Cd in calcareous river sediments. *Environmental Earth Sciences*, 79, 164.
- Mujtaba, M. A., Liu, G., Yousaf, B., Ali, M. U., Abbas, Q., & Ullah, H. (2020). Synergistic effects of biochar and processed fly ash on bioavailability, transformation and accumulation of heavy metals by maize (*Zea mays* L.) in coal-mining contaminated soil. *Chemosphere*, 240, 124845.
- Qin, P., Wang, H., Yang, X., He, L., Müller, K., et al. (2018). Bamboo- and pig-derived biochars reduce leaching losses of dibutyl phthalate, cadmium, and lead from co-contaminated soils. *Chemosphere*, 198, 450–459.
- Rinklebe, J., Shaheen, S. M., El-Naggar, A., Wang, H., Du Laing, G., et al. (2020). Redox-induced mobilization of Ag, Sb, Sn, and Tl in the dissolved, colloidal and solid phase of a biochar-treated and un-treated mining soil. *Environment International*, 140, 105754.
- Samsuri, A. W., Fahmi, A. H., Jol, H., & Daljit, S. (2019). Particle size and rate of biochar affected the phytoavailability of Cd and Pb by mustard plants grown in contaminated soils. *International Journal of Phytoremediation*, 1-11.
- Sarwar, N., Imran, M., Shaheen, M. R., Ishaque, W., Kamran, M. A., Matloob, A., Rehimb, A., & Hussain, S. (2017). Phytoremediation strategies for soils contaminated with heavy metals: Modifications and future perspectives. *Chemosphere*, 171, 710–721.
- Tareq, R., Akter, N., & Azam, Md. S. (2019). Biochars and Biochar Composites: Low-Cost Adsorbents for Environmental Remediation. Biochar from Biomass and Waste. *Fundamentals and Applications*, 169–209.
- Vejvodová, K., Száková, J., García-Sánchez, M., Praus, L., Romera, I. G., & Tlustoš, P. (2020). Effect of Dry Olive Residue-Based Biochar and Arbuscular Mycorrhizal Fungi Inoculation on the Nutrient Status and Trace Element Contents in Wheat Grown in the As-, Cd-, Pb-, and Zn-Contaminated Soils. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20, 1067–1079.
- Voca, H., Piscitelli, L., Mezzapesa, G. N., Mondelli, D., Miano, T., & D'Orazio, V. (2020). Biochar effect on crop performance and Pb and Zn uptake of tomato (*Solanum lycopersicum*, L.) plants grown on heavy metals contaminated Kosovo soils. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 1–10.
- Wang, T., Sun, H., Ren, X., Li, B., & Mao, H. (2017). Evaluation of biochars from different stock materials as carriers of bacterial strain for remediation of heavy metal-contaminated soil. *Scientific Reports*, 7(1), 12114.
- Wang, L., Ok, Y. S., Tsang, D. C., Alessi, D. S., Rinklebe, J., et al. (2020). New trends in biochar pyrolysis and modification strategies: Feedstock, pyrolysis conditions, sustainability concerns and implications for soil amendment. *Soil Use and Management*, 1-29.
- Wei, L., Huang, Y., Huang, L., Huang, Q., Li, Y., et al. (2021). Combined biochar and soda residues increase maize yields and decreases grain Cd/Pb in a highly Cd/Pb-polluted acid Uduits soil. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 306, 107198.
- Xu, P., Sun, C.-X., Ye, X.-Z., Xiao, W.-D., Zhang, Q., & Wang, Q. (2016). The effect of biochar and crop straws on heavy metal bioavailability and plant accumulation in a Cd and Pb polluted soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 132, 94–100.
- Xu, X., Zhao, Y., Sima, J., Zhao, L., Mašek, O., & Cao, X. (2017). Indispensable role of biochar-inherent mineral constituents in its environmental applications: A review. *Bioresource Technology*, 241, 887–899.
- Xu, W., Shafi, M., Penttinen, P., Hou, S., Wang, X., Ma, J., et al. (2019). Bioavailability of heavy metals in contaminated soil as affected by different mass ratios of biochars. *Environmental Technology*, 1-9.
- Yang, X., Pan, H., Shaheen, S. M., Wang, H., & Rinklebe, J. (2021a). Immobilization of cadmium and lead using phosphorus-rich animal-derived and iron-modified plant-derived biochars under dynamic redox conditions in a paddy soil. *Environment International*, 156, 106628.
- Yang, F., Wang, B., Shi, Z., Li, L., Li, Y., et al. (2021b). Immobilization of heavy metals (Cd, Zn, and Pb) in different contaminated soils with swine manure biochar. *Environmental Pollutants and Bioavailability*, 33(1), 55-65.
- Zhang, M., Wang, J., Bai, S. H., Zhang, Y., Teng, Y., & Xu, Z. (2019a). Assisted phytoremediation of a co-contaminated soil with biochar amendment: Contaminant removals and bacterial community properties. *Geoderma*, 348, 115–123.
- Zhang, Z., Zhu, Z., Shen, B., & Liu, L. (2019b). Insights into Biochar and Hydrochar Production and Applications: A Review. *Energy*, 171, 581–598.
- Zhou, H., Meng, H., Zhao, L., Shen, Y., Hou, Y., et al. (2018). Effect of biochar and humic acid on the copper, lead, and cadmium passivation during composting. *Bioresource Technology*, 258, 279–286.
- Zhuo, F., Zhang, X.-F., Lei, L.-L., Yan, T.-X., Lu, R.-R., et al. (2020). The effect of arbuscular mycorrhizal fungi and biochar on the growth and Cd/Pb accumulation in *Zea mays*. *International Journal of Phytoremediation*, 1-10.