

Efficacy of cattle manure-derived biochar for the remediation of lead-contaminated soils

Marielle Andrea Delgado Mantilla¹; María Sofía del Cielo Gutiérrez Aguilar¹ and Magda Velásquez Marín Mtr¹

¹Universidad Privada del Norte (UPN), Trujillo, Perú, N00263565@upn.pe, N00262550@upn.pe, magda.velasquez@upn.edu.pe

Abstract– *This study determines the efficacy of biochar in the remediation of lead (Pb) contaminated soils through a quantitative and broad scope research. Lead (Pb) contaminated soil samples from an agricultural plot located in Huamachuco were treated with different doses of biochar (10%, 20%, and 25%) for 30 days. The research was divided into two evaluation periods, pre- and post-treatment (T0 and T30), and the information obtained was statistically analyzed using Shapiro-Wilk normality tests and ANOVA, using SPSS v.26 software. During the experimental phase, physical and chemical changes resulting from the treatments were recorded. The findings indicate that biochar is effective in removing lead (Pb), with the 25% dose being the most effective, with a removal rate of 78.9% (28.52 mg/kg), meeting Environmental Quality Standards (ECS) for agricultural soils. An improvement in the physicochemical properties of the soil analyzed was also evident. It is concluded that cattle manure biochar constitutes a viable alternative for the remediation of agricultural soils contaminated with lead (Pb).*

Keywords– *Contaminated soils, biochar, cattle manure, soil remediation, pyrolysis.*

Eficacia del biocarbón de estiércol vacuno en la remediación de suelos contaminados con plomo

Marielle Andrea Delgado Mantilla¹; María Sofía del Cielo Gutiérrez Aguilar¹ and Magda Velásquez Marín Mtr¹

¹Universidad Privada del Norte (UPN), Trujillo, Perú, N00263565@upn.pe, N00262550@upn.pe, magda.velasquez@upn.edu.pe

Resumen– Este estudio determina la eficacia del biocarbón en la remediación de suelos contaminados con plomo (Pb) mediante una investigación de enfoque cuantitativo y alcance aplicativo. Se emplearon muestras de suelo contaminadas con plomo (Pb) provenientes de una parcela agrícola ubicada en Huamachuco, las cuales fueron tratadas con diferentes dosis de biocarbón (10 %, 20 % y 25 %) durante 30 días. La investigación se dividió en dos tiempos de evaluación, pre y postratamiento (T0 y T30), y la información obtenida fue procesada estadísticamente mediante pruebas de normalidad de Shapiro-Wilk y ANOVA, empleando el software SPSS v.26. Durante la fase de experimentación, se registraron los cambios físicos y químicos de los tratamientos. Los hallazgos indican que el biocarbón es eficaz en la remoción de plomo (Pb), siendo la dosis de 25 % la más efectiva con una remoción de 78,9 % (28,52 mg/kg), cumpliendo con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelos agrícolas. Igualmente, se evidenció una mejoría en las propiedades fisicoquímicas del suelo analizadas. Se concluye que el biocarbón de estiércol vacuno constituye una alternativa viable para la remediación de suelos agrícolas contaminados con plomo (Pb).

Palabras clave– Suelos contaminados, biocarbón, estiércol vacuno, remediación de suelos, pirólisis.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, existe un problema que se ha convertido en el principal enemigo de la calidad ambiental y la seguridad alimentaria a nivel mundial: la contaminación por trazas de metales pesados en los suelos agrícolas [1]. Muchas hectáreas de tierras agrícolas han perdido su productividad debido al deplorable manejo de los residuos sólidos, la erosión y, especialmente, la actividad minera [2]. Un caso en particular son los suelos de la región de Huamachuco, en Perú, donde se llevan a cabo actividades mineras y agrícolas, debido a que sus tierras presentan trazas de metales como plomo (Pb), cadmio (Cd), cromo (Cr) y arsénico (As), empleados para dichas actividades, los cuales alteran las propiedades fisicoquímicas del suelo, y a la vez su fertilidad [3].

Los metales pesados son extremadamente peligrosos e imperecederos, lo que dificulta su control, puesto que pueden penetrar el suelo, alcanzar las aguas subterráneas y acumularse en animales y plantas [4]. La falta de regulaciones ambientales agrava este problema, ya que las actividades económicas ponen como prioridad el incremento de la productividad sobre la sostenibilidad [5].

Un claro ejemplo es el río Wei, que absorbe las emisiones de las actividades industriales y agrícolas que se llevan a cabo en su cuenca hidrográfica, y transporta los metales pesados hacia los cultivos circundantes [6].

De ese modo, para poder mitigar dicho problema, se han desarrollado diversas tecnologías de remediación, muchas de las cuales utilizan enmiendas orgánicas. El biocarbón es uno de los métodos más comunes, debido a que se le conoce por su habilidad para absorber metales pesados, optimizar la humedad, el pH y la porosidad del suelo, y también porque funciona como un sumidero de carbono [7]. Esto se respalda debido a que el biocarbón elaborado de estiércol animal contine mayor proporción de minerales, como calcio (Ca), magnesio (Mg) y fósforo (P), que son esenciales para potenciar la fertilidad de los suelos [8]. Además, posee una gran capacidad de intercambio catiónico, lo cual favorecen la precipitación y fijación de metales pesados y evita la lixiviación de estos. [9].

La temperatura de pirólisis del biocarbón influye directamente en el tratamiento de suelos contaminados con metales, puesto que temperaturas intermedias favorecen la creación de grupos funcionales oxigenados (–COOH, –OH, fenólicos), los cuales permiten la quelación química de los metales pesados [10].

En Brasil, el biocarbón obtenido del estiércol de ganado se aplica para disminuir la acidez del terreno, aumentar la presencia de fósforo y optimizar la remoción de metales pesados. De este modo, se favorece el crecimiento de las plantas [11].

Asimismo, la introducción de biocarbón a partir de estiércol porcino en los suelos agrícolas redujo los niveles de plomo en un 62 %, lo cual mejoró aspectos como el pH y la fertilidad [12]. Por otra parte, tras aplicar biocarbón procedente de bambú, se eliminó hasta un 75 % del plomo, lo que demuestra su efectividad como adsorbente natural [13]. Según [14], la combinación de biocarbón magnético con raigrás redujo las concentraciones de zinc (Zn), plomo (Pb), cadmio (Cd) y cobre (Cu) en el suelo en un 70 %, 71 %, 82 % y 63 %, respectivamente. Además, el biocarbón aumenta eficazmente la materia orgánica del suelo, estabilizó los metales pesados y redujo la movilidad de metales pesados [15]. Otro estudio que empleó biocarbón derivado de estiércol de pollo encontró que una concentración del 20 % contribuyó a la reducción de plomo (Pb) y cadmio (Cd) en suelos agrícolas [16].

Si bien los estudios acerca del biocarbón son diversos, la mayor parte de estos se centra en el biocarbón elaborado con residuos de cultivo (madera o paja), y solo unos pocos utilizan estiércol vacuno como materia prima [17]. De hecho, es sumamente importante enfatizar en estudios que utilicen biocarbón de origen animal porque estos recursos son de importancia estratégica en zonas andinas de gran altitud como Huamachuco, donde predominan la ganadería y la agricultura. Se consideran una alternativa sostenible debido a su bajo costo, alta capacidad de adsorción y potencial para reducir los residuos orgánicos perjudiciales para el medio ambiente [18]. Sin embargo, su aplicación específica para la remediación de suelos agrícolas contaminados con plomo en Perú no se ha estudiado lo suficiente, y se necesitan más estudios para confirmar su eficacia [19].

En consecuencia, de lo previsto, se planteó la siguiente interrogante: ¿Cuál es la eficacia del biocarbón de estiércol vacuno en la remediación de suelos contaminados con plomo (Pb) del Centro Poblado de Shiracmaca, Huamachuco? Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue determinar la eficacia del biocarbón de estiércol vacuno para la remediación de suelos agrícolas contaminados con plomo (Pb) en el Centro Poblado de Shiracmaca, Huamachuco. De la misma forma, se evaluó el efecto del biocarbón sobre los parámetros fisicoquímicos del suelo (pH, conductividad eléctrica, densidad aparente, temperatura y humedad) y se determinó la dosis óptima para lograr la máxima eficacia de remediación y si cumple con los estándares de calidad ambiental para suelos agrícolas.

II. METODOLOGÍA

A. Diseño experimental

Se empleó un diseño de estiércol vacuno y evaluar su eficacia en la remediación de suelos contaminados con plomo (Pb) y en la mejora de parámetros fisicoquímicos [20]. Hubo tres dosis de aplicación de la enmienda (10 %, 20 % y 25 % p/p) y el lote homogenizado de suelo (18 kg) se fraccionó en unidades experimentales de 2 kg, las cuales se colocaron en macetas plásticas de 3 L de capacidad [21]. Cada tratamiento se estableció con tres unidades experimentales ($n = 3$). La aplicación del biocarbón se llevó a cabo durante 30 días y se realizaron mediciones de plomo (Pb) y de los parámetros fisicoquímicos (pH, conductividad eléctrica, densidad aparente, temperatura y humedad) en el día 0 (T0) y en el día 30 (T30) [22].

Dado que el suelo fue previamente homogenizado, se tomó una muestra representativa inicial antes de su distribución en las unidades experimentales con el fin de determinar la concentración basal de plomo (Pb) y las condiciones fisicoquímicas del suelo. Esta medición corresponde al tiempo T0 (condición inicial) y no constituye un tratamiento, sino un punto de referencia temporal utilizado para comparar los cambios generados tras la aplicación de las distintas dosis de biocarbón en el tiempo T30.

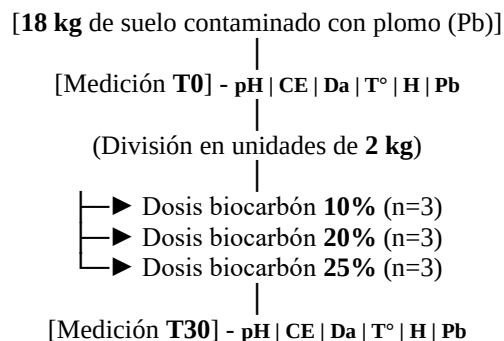


Fig. 1 Esquema del diseño experimental para la aplicación de biocarbón de estiércol vacuno y medición de parámetros fisicoquímicos y plomo (Pb). T0: día cero (pretratamiento); T30: día 30 (postratamiento); pH: potencial de hidrógeno; CE: conductividad eléctrica; Da: densidad aparente; T°: temperatura; H: humedad.

1) Tipo de investigación

El estudio adoptó un enfoque cuantitativo, el cual, según [23] “se caracteriza por su objetividad y su capacidad para generar resultados que pueden ser generalizados y reproducidos”. Este enfoque fue elegido debido a que, las variables principales del estudio, como la concentración de metales, pueden medirse numéricamente, lo que permite obtener datos precisos sobre la efectividad de la técnica empleada. Asimismo, su alcance es aplicativo, ya que, según [23] “implica el desarrollo e implementación de soluciones que aborden problemáticas específicas”, lo que en este caso se traduce en el uso del biocarbón de estiércol vacuno como alternativa sostenible para la remediación de suelos contaminados con plomo (Pb).

B. Área de estudio y muestreo de suelos

Las muestras de suelo se obtuvieron de una parcela agrícola de 0,35 ha, ubicada en el centro poblado Shiracmaca, distrito de Huamachuco, provincia de Sánchez Carrión, La Libertad (UTM 17S: 829 319 m E y 9 134 923 m S; altitud: 3107 m s. n. m.), próxima al Cerro El Toro, el cual es un área de fuerte actividad minera, lo que permitió evaluar los efectos combinados de la minería y la agricultura. Cabe mencionar que se empleó un muestreo dirigido no probabilístico para seleccionar seis puntos dentro del terreno, siguiendo la Guía de muestreo de suelos del MINAM [24]. Se recolectó una muestra compuesta de 18 kg desde una profundidad de 30 cm, correspondiente al horizonte B, donde suelen acumularse metales traza y se desarrolla el sistema radicular de los cultivos [25].

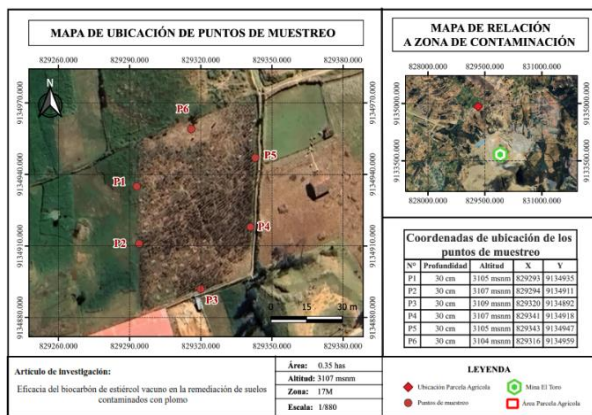


Fig. 2 Coordenadas de los puntos de muestreo en la parcela agrícola

El estiércol vacuno fresco (10 kg) fue proporcionado por el establo El Milagro S.A.C., luego secado al aire, triturado y sometido a pirólisis en horno mufla (Nabertherm LT40/12) a 400 °C durante 1 h, obteniéndose aproximadamente 3,3 kg de biocarbón. El suelo agrícola se homogenizó *in situ* y posteriormente se secó en una estufa de laboratorio (Memmert GmbH + Co. KG UN 30), para ser tamizado con una malla de 2,36 mm (tamiz N° 8). El material fue repartido en macetas (9 submuestras de 2 kg) y mezclado con biocarbón en las proporciones establecidas (p/p). Los tratamientos se almacenaron a temperatura ambiente durante 30 días.

TABLA I
CODIFICACIÓN SEGÚN TRATAMIENTO Y RÉPLICA

Réplicas	Dosis 10 %	Dosis 20 %	Dosis 25 %
Primera	R1-10	R1-20	R1-25
Segunda	R2-10	R2-20	R2-25
Tercera	R3-10	R3-20	R3-25

Los tratamientos se mantuvieron bajo condiciones ambientales durante el periodo de experimentación (23/04/2025 al 23/05/2025). La temperatura máxima registrada durante este intervalo según el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) fue de 25,50 °C y la temperatura mínima de 13,40 °C; la humedad relativa promedio fue de 83,89 % y no se registraron precipitaciones. El riego se realizó con agua destilada de manera interdiaria, aplicando 220 ml en los tratamientos con dosis de 10 % de biocarbón, 240 ml en los de 20 % y 250 ml en los 25 %, con el fin de representar el porcentaje de humedad necesario en el suelo (5 %).

C. Análisis fisicoquímico y determinación de metales pesados (Pb)

El pH y la conductividad eléctrica (CE) del suelo se determinaron en relación suelo-agua (1:1) utilizando el multiparámetro (Hach HQ40d). El porcentaje de humedad se calculó por el método gravimétrico, secando 300 g de suelo fresco a 110 °C durante 24 horas (1). La densidad aparente se determinó mediante el método del cilindro metálico (2).

$$\%H = \frac{W_{seco}(g) - W_{fresco}(g)}{W_{fresco}(g)} \times 100 \quad (1)$$

$$Da = \frac{W_{seco}(g)}{V(cm^3)} \quad (2)$$

Las concentraciones de plomo (Pb) se cuantificaron mediante espectrofotometría de absorción atómica utilizando el método 3050B de la Agencia de Protección Ambiental de EE. UU. (EPA) [26], que incluye digestión ácida con HNO₃, HCl y H₂O₂. El equipo empleado fue el espectrofotómetro de absorción atómica tipo llama (Agilent Technologies 240FS AA). Todos los análisis con equipos calibrados 24 horas antes de su uso.

Todos los tratamientos se realizaron por triplicado para garantizar la reproducibilidad y confiabilidad de los resultados. Se utilizó un formato estructurado de registro validado por expertos en ciencias ambientales. Las mediciones se realizaron en dos momentos: T0 (condición basal) y T30 (postratamiento).

El análisis estadístico incluyó estadísticas descriptivas, así como la verificación de normalidad (Shapiro-Wilk) y homogeneidad de varianzas (Levene). Asimismo, se aplicó ANOVA de una vía y una prueba post hoc. Se utilizaron los programas SPSS v26, Python y Microsoft Excel. El nivel de significancia considerado fue $\alpha = 0,05$.

III. RESULTADOS

A. Caracterización del suelo y de la materia prima

La Tabla II muestra los indicadores fisicoquímicos del suelo agrícola antes de aplicar el biocarbón. En ella se aprecian un pH poco ácido, una conductividad eléctrica baja, humedad moderada y una densidad aparente de 1,66 g/cm³. La concentración de Pb (131,11 mg/kg) en un principio excedió la cantidad máxima permitida para suelos agrícolas (70 mg/kg), según los Estándares de Calidad Ambiental para Suelo establecidos en el D.S. N.º 011-2017-MINAM [27]. También se muestran los resultados del biocarbón y de la materia prima (estiércol vacuno); el segundo tuvo un pH de 6,81 y una CE más alta (9 610 µS/cm), lo que demuestra su capacidad para suministrar nutrientes y sales al terreno.

TABLA II
PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DEL SUELO
PRETRATAMIENTO Y MATERIA PRIMA

Propiedades	Valores obtenidos		
	Pretratamiento del suelo	Pretratamiento del estiércol vacuno	Biocarbón
pH	6,77	6,81	8,75
Conductividad eléctrica (µS/cm)	47,10	9 610	2 048
Temperatura (°C)	23,8	24,5	26,3
Densidad aparente (g/cm³)	1,66	NE ^a	NE ^a
Humedad (%)	17,16	NE ^a	NE ^a
Plomo (mg/kg)	131,11	NE ^a	NE ^a

^aNE: No evaluado.

El biocarbón se elaboró mediante pirólisis lenta a 400 °C durante 1 hora en horno mufla, luego de la preparación y molienda del estiércol vacuno. Estas condiciones favorecieron la formación de un material carbonoso con propiedades mejoradoras de suelo, como se ha reportado en estudios previos. Esto se debe a que el material carbonizado tiene una gran cantidad de grupos funcionales, un área superficial más extensa y una porosidad alta [28].

B. Concentración de Pb en las matrices del sistema suelo

Se establecieron tres tratamientos de biocarbón (10 %, 20 % y 25 % respecto al peso de suelo), cada uno con tres réplicas. La concentración inicial de Pb en el suelo (día 0) ya mencionada fue de 131,11 mg/kg, superando el ECA para suelos agrícolas. Después de 30 días de ensayo, la concentración final de Pb en el suelo se redujo gradualmente a medida que la dosis de biocarbón aumentaba, alcanzando niveles inferiores al límite normativo, como se puede ver en la Tabla III.

TABLA III
CONCENTRACIÓN DE PLOMO (MG/KG) EN SUELOS AGRÍCOLAS ANTES Y DESPUÉS DEL TRATAMIENTO

Tratamiento	ECA Suelo (mg/kg) ^a	Concentración Día 0	Concentración Día 30 (Media ± DE ^b)	Cumplimiento final
10%	70	131,11 (No cumple)	69,31 ± 0,57	Cumple
20%	70	131,11 (No cumple)	43,26 ± 0,29	Cumple
25%	70	131,11 (No cumple)	28,52 ± 0,50	Cumple

^a Valor límite de concentración de plomo (Pb) establecido en [27]

^bDE: Desviación estándar.

Según investigaciones anteriores, el uso de biocarbón ha posibilitado que los niveles de plomo en tierras agrícolas caigan por debajo de los límites definidos en regulaciones internacionales; esto se debe sobre todo a procesos de adsorción superficial, a la creación de complejos estables con grupos funcionales oxigenados y a la precipitación del metal en formas poco solubles [29]. Se registraron disminuciones en la concentración de Pb en terrenos agrícolas contaminados cercanos a minas antiguas, por encima de 1260 mg/kg, tras la aplicación de biocarbón en incubaciones de corto plazo, donde la concentración inicial de Pb en estos suelos era de 1445 mg/kg [30]. Esto apoya la validez de los resultados obtenidos en este estudio.

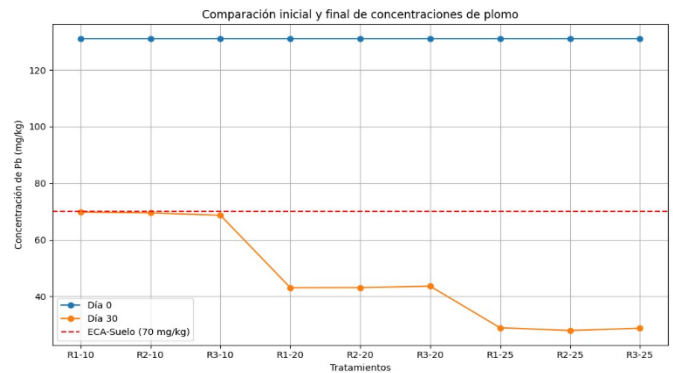


Fig. 3 Comparación inicial y final de las concentraciones de plomo según [27].

El plomo tiene una gran afinidad con el biocarbón, como se puede ver en que hasta la dosis más baja (10 %) llegó a niveles próximos al límite permitido. Esto lo convierte en una opción práctica y económicamente viable para reducir contaminantes sin afectar la productividad agrícola.

En cuanto a la eficacia promedio de remoción, fue del 47,14 % para la dosis del 10 %, del 67,01 % para la dosis del 20 % y del 78,25 % para la dosis del 25 %, como se observa en la Figura 4. Estos hallazgos coinciden con investigaciones anteriores que afirman que el biocarbón, al ser administrado en dosis significativas, es capaz de retener metales pesados en mayor medida gracias a su superficie específica más extensa, a la cantidad superior de espacios activos para la adsorción y a la presencia de grupos funcionales oxigenados [31].

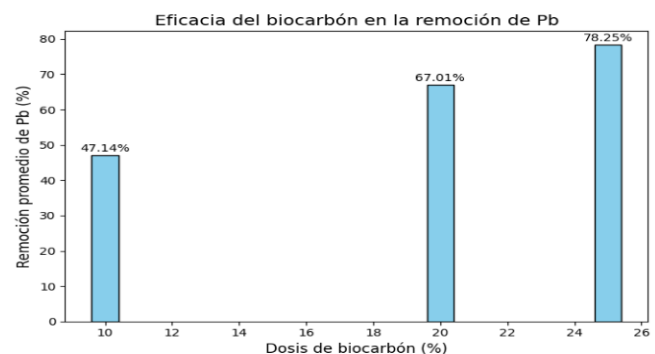


Fig. 4 Gráfico del porcentaje de remoción promedio de plomo según la dosis aplicada.

Sin embargo, la elección de la dosis ideal no solo se basa en la eficacia técnica, sino también en elementos económicos y sostenibles. Como otras investigaciones sugieren, la producción y uso del biocarbón en cantidades elevadas podría conllevar un aumento de los costos de transporte, materia prima y aplicación en campo [32]. En esa línea, es imprescindible analizar estudios de escalabilidad que examinen la relación entre el costo y el beneficio de distintas dosis y la posibilidad de incorporar biocarbón en sistemas agrícolas grandes y medianos.

Aunque la dosis del 25 % mostró el mayor valor de remoción de plomo (Pb), su aplicación práctica requiere un

análisis costo-beneficio, dado que dosis elevadas implican mayores gastos de producción y aplicación en campo.

Los análisis estadísticos confirmaron que los datos presentaron normalidad (Shapiro-Wilk, $p > 0,05$) lo cual muestra que los datos se adecuan a una distribución normal como se ve en la Tabla 4, y la homogeneidad de varianzas (Levene, $p > 0,05$) corroboró la igualdad de varianzas entre los grupos analizados, tal como se observa en la Tabla 5. El ANOVA mostró diferencias significativas ($p < 0,05$), y la prueba post hoc indicó que el tratamiento del 25 % tuvo mejores resultados respecto al tratamiento del 10 %, pero sin diferencias significativas frente al 20 %. (Figura 5). Estos resultados muestran que la aplicación de biocarbón produjo diferencias estadísticas entre los tratamientos.

TABLA IV

PRUEBA DE NORMALIDAD PARA EL PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE Pb

Pruebas de normalidad				
	Dosis del Biocarbón	Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl ^a	Sig. ^b
Porcentaje de Remoción de Pb	10 % de Biocarbón con respecto a 2 kg de suelo	0,915	3	0,512
	20 % de Biocarbón con respecto a 2 kg de suelo	0,916	3	0,129
	25 % de Biocarbón con respecto a 2 kg de suelo	0,868	3	0,303

^agl: Grados de libertad

^bSig.: Nivel de significancia

Resultados similares han sido reportados en investigaciones previas que aplicaron ANOVA para evaluar los efectos del biocarbón. En estos estudios, se comprobó con anterioridad la homogeneidad y normalidad de los datos experimentales como condición metodológica [33]. El ANOVA, en estas investigaciones, posibilitó identificar variaciones importantes en variables edáficas esenciales, como la retención de humedad, el pH y la conductividad eléctrica, tras incorporar biocarbón [34]; por ello, la validez estadística del diseño experimental se garantizó mediante este método estadístico para comparar los tratamientos con base en estos hallazgos.

TABLA V

PRUEBA DE HOMOGENEIDAD DE VARIANZAS

Pruebas de homogeneidad de varianzas					
Porcentaje de Remoción de Pb		Estadístico de Levene	gl1 ^a	gl2 ^b	Sig. ^c
	Se basa en la media	0,984	2	6	0,427
	Se basa en la mediana	0,218	2	6	0,810
	Se basa en la mediana y con gl ajustado	0,218	2	5,427	0,811
	Se basa en la media recortada	0,885	2	6	0,461

^agl1: Grados de libertad entre grupos

^agl2: Grados de libertad dentro de los grupos

^bSig.: Nivel de significancia

Según estudios anteriores, el biocarbón presenta una adsorción más elevada de metales pesados (en especial de plomo) cuando se le suministran dosis crecientes. Se observaron porcentajes de remoción superiores al 70 % en tratamientos con dosis del 10 % en algunos estudios, lo que es similar a lo que se ha visto en este trabajo [35].

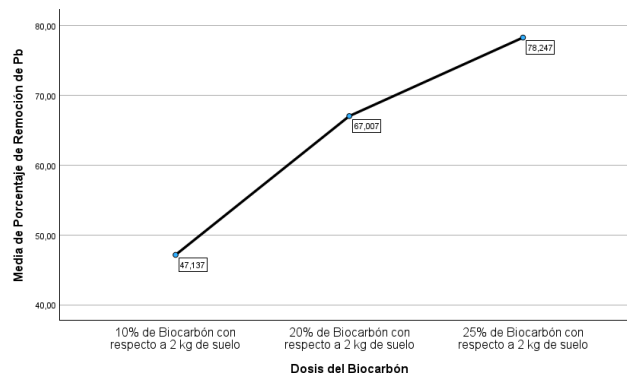


Fig. 5 Prueba Post Hoc para el porcentaje de remoción de Pb

La existencia de grupos funcionales oxigenados y superficies con carga negativa que propician la creación de complejos estables con el plomo, disminuyendo así su movilidad y biodisponibilidad [36], podría ser la causa del mayor efecto documentado con una dosis del 25 %. Asimismo, incrementar la cantidad de biocarbón contribuye a optimizar el pH del suelo, lo que fomenta la precipitación de metales pesados en forma de carbonatos o hidróxidos poco solubles y robustece el procedimiento de inmovilización [37].

Para que las comparaciones reflejen de manera imparcial los cambios producidos por la aplicación del biocarbón, es fundamental cumplir con estas suposiciones, ya que previenen sesgos que podrían resultar en una sobreestimación o una subestimación de los efectos observados.

C. Efectos del biocarbón en el suelo

Los parámetros fisicoquímicos postratamiento (Tabla 6) reflejaron mejoras en la calidad del suelo. La inmovilización del Pb en el suelo fue favorecida por el aumento del pH en todos los tratamientos. La CE mostró un aumento importante en comparación con la condición inicial, como resultado de agregar sales derivadas del biocarbón. Igualmente, la humedad del suelo aumentó y la densidad aparente se redujo respecto al suelo original, lo que indica una mayor aireación y capacidad de retener agua.

TABLA VI

RESULTADOS DE LAS PROPIEDADES DEL SUELO POST TRATAMIENTO

Tratamiento	pH (Media $\pm$ DE ^a)	Conductividad eléctrica (μ S/cm) (Media $\pm$ DE ^a)	Temperatura (°C) (Media $\pm$ DE ^a)	Humedad (%) (Media $\pm$ DE ^a)	Densidad aparente (g/cm ³) (Media $\pm$ DE ^a)
10%	8.72 $\pm$ 0.82	751.67 $\pm$ 227.01	23.37 $\pm$ 0.12	35.58 $\pm$ 4.06	1.44 $\pm$ 0.16

20%	8.84 ± 0.94	591.33 ± 369.03	23.33 ± 0.15	34.31 ± 1.84	1.41 ± 0.10
25%	8.03 ± 0.42	849.00 ± 221.50	23.3 ± 0.17	31.32 ± 7.11	1.35 ± 0.20

^aDE: Desviación estándar.

El incremento del pH hacia niveles de neutralidad y alcalinidad está en línea con estudios anteriores que indican el efecto corrector del biocarbón al equilibrar la acidez del terreno, lo cual propicia la fijación de metales pesados en formas más estables y menos solubles. Según un metaanálisis, el uso de biocarbón aumenta el pH ($\approx +46\%$), disminuye la densidad aparente ($\sim -29\%$) y mejora la porosidad ($\approx +59\%$), especialmente si se aplica a temperaturas superiores a $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ [38]. Estos efectos tienen que ver con la existencia de cenizas que contienen silicatos, carbonatos y óxidos en abundancia. Un estudio reciente con biocarbón de *Tithonia diversifolia* mostró que, de manera coherente, la densidad aparente disminuyó notablemente y la humedad y porosidad de los suelos franco-arenosos aumentaron; se explicó la alcalinización como el resultado de las altas concentraciones de cationes básicos presentes en las cenizas. [39].

El aumento de la conductividad eléctrica que se ha observado se debe a la liberación de sales minerales y nutrientes solubles que contiene el biocarbón, lo cual coincide con estudios relacionados similares, en los que se registraron aumentos en la CE tras añadir dosis medianas a altas de este material [40]. Aunque este fenómeno aumenta la disponibilidad de nutrientes, es necesario monitorearlo para prevenir situaciones de salinidad en suelos delicados.

Según [41], una disminución de la densidad aparente indica que la estructura del suelo ha mejorado. Esto es porque el biocarbón, al integrar su matriz porosa, mejora la aireación y reduce la compactación. Estudios anteriores también han informado que esta propiedad promueve el crecimiento de raíces y mejora la habilidad del suelo para conservar agua, como lo mencionan [42], lo cual coincide con el aumento de humedad observado en esta investigación.

Al examinar los resultados, es importante tener en cuenta ciertas limitaciones que se presentaron en el camino. Primero, el análisis se limitó a una única parcela agrícola en Huamachuco, lo que disminuye la representatividad ante la diversidad de suelos que distinguen al área. Además, dado que el ensayo fue de reducida duración (30 días) y se realizó en un laboratorio con condiciones controladas, no se pueden extrapolar de manera directa los efectos a proyecciones de mediana o larga duración en condiciones de campo. Además, el número de réplicas fue definido a solo tres por tratamiento, lo que limita la solidez estadística de los hallazgos.

Entre otras limitaciones, el análisis se centró únicamente en la remoción de plomo (Pb), sin analizar la existencia de otros metales pesados significativos dentro del área estudiada, como arsénico, cromo o cadmio, y si se presentaba una posible interacción con ellos. Igualmente, las propiedades del suelo estudiadas se restringieron a variables fisicoquímicas elementales, tales como temperatura, pH, conductividad

eléctrica, humedad y densidad; sin tener en cuenta factores de relevantes, como la actividad microbiana, la cantidad de materia orgánica o la capacidad de intercambio catiónico, que también afectan el movimiento y la dinámica del Pb, sobre todo, a nivel de campo.

Finalmente, si bien los resultados fueron eficientes a nivel experimental dado los recursos disponibles, no se estudió la factibilidad económica y logística de la aplicación del biocarbón de estiércol vacuno en extensiones agrícolas de mayores extensiones, y este sería un factor crucial para la determinación de la viabilidad de la técnica en condiciones reales. Futuras investigaciones deberán considerar estas limitaciones, con el fin de validar la escalabilidad de estos hallazgos.

IV. CONCLUSIONES

En este estudio se evaluaron los efectos de la aplicación de biocarbón derivado de estiércol vacuno para la remoción de plomo (Pb) en suelos agrícolas contaminados de Huamachuco. Se emplearon dosis de biocarbón del 10%, 20% y 25%, y los hallazgos se contrastaron con el valor obtenido en la medición inicial (T0). El biocarbón se distinguió por tener un pH alcalino, una alta conductividad eléctrica y atributos que ayudaron a mejorar la calidad del suelo. El suelo pretratamiento, se caracterizó con un pH poco ácido, humedad relativa media y la densidad aparente se situó en $1,66\text{ g/cm}^3$. Asimismo, presentó una conductividad eléctrica (CE) baja. De acuerdo con el D.S. N.º 011-2017-MINAM, la concentración de Pb en la tierra agrícola era de 131.11 mg/kg , superando el límite reglamentario de 70 mg/kg . Después de 30 días de tratamiento, se observó una reducción significativa de plomo (Pb), teniendo eficacias de remoción promedio respectivas de $47,14\%$ (10%), $67,01\%$ (20%) y $78,25\%$ (25%). Todos los tratamientos consiguieron reducir el Pb por debajo del límite normativo. En cuanto a la normalidad de los datos (Shapiro-Wilk, $p > 0,05$) y la homogeneidad de las varianzas (Levene, $p > 0,05$), estas fueron verificadas por las evaluaciones estadísticas. El ANOVA reveló que existían diferencias notables entre los tratamientos ($p < 0,05$), y el análisis post hoc evidenció que la dosis del 25% mostró el mayor valor de remoción observado, aunque sin diferencia significativa respecto al 20% . El suelo tratado reveló un aumento de la conductividad eléctrica, la humedad y el pH hacia valores alcalinos, así como una reducción de la densidad aparente, lo cual indica que hubo mejoras respecto a la capacidad para retener agua y a la aireación. Estos hallazgos evidencian que el biocarbón proveniente de estiércol vacuno es una enmienda efectiva para la remediación de plomo (Pb) en suelos agrícolas contaminados, además genera mejoras notables en las propiedades fisicoquímicas del suelo. No obstante, es importante considerar que el tamaño de muestra ($n=3$ por tratamiento), la duración del estudio (30 días) y las condiciones controladas de laboratorio pueden limitar la generalización de los resultados a condiciones de campo. Se recomienda realizar investigaciones de mayor alcance, con

periodos de aplicación prolongados y donde se analicen otros metales pesados y parámetros del suelo, con el fin de verificar su aplicación sostenible y práctica en condiciones reales.

REFERENCIAS

- [1] K. Vejvodová, J. Száková, M. García-Sánchez, L. Praus, I. G. Romera, and P. Tlustoš, "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," *J. Soil Sci. Plant Nutr.*, vol. 20, pp. 1067–1079, 2020, doi: 10.1007/s42729-020-00193-2.
- [2] D. Berslin, A. Reshmi, B. Sivaprakash, N. Rajamohan, and P. S. Kumar, "Remediation of emerging metal pollutants using environment friendly biochar: Review on applications and mechanism," *Chemosphere*, vol. 290, Art. no. 133384, 2021, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.133384.
- [3] F. R. Noronha, S. K. Manikandan, and V. Nair, "Role of coconut shell biochar and earthworm (*Eudrilus euginea*) in bioremediation and palak spinach (*Spinacia oleracea* L.) growth in cadmium-contaminated soil," *J. Environ. Manage.*, vol. 302, Art. no. 114057, 2022, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.114057.
- [4] F.-M. Pellerá and E. Gidaraks, "Effect of dried olive pomace-derived biochar on the mobility of cadmium and nickel in soil," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 3, no. 2, pp. 1163–1176, 2015, doi: 10.1016/j.jece.2015.04.005.
- [5] H. M. M. Abbas *et al.*, "Microbial-inoculated biochar for remediation of salt and heavy metal contaminated soils," *Sci. Total Environ.*, vol. 954, Art. no. 176104, 2024, doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.176104.
- [6] W. Dong *et al.*, "Sources, contamination and risk assessment of heavy metals in riparian soils of the Weihe River based on a receptor model and Monte Carlo simulation," *Sustainability*, vol. 16, no. 23, Art. no. 10779, 2024, doi: 10.3390/su162310779.
- [7] S. S. H. Shah, K. Nakagawa, R. Yokoyama, and R. Berndtsson, "Efficacy of Ca-modified cypress biochar in immobilization of heavy metals in contaminated soils," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 12, no. 6, Art. no. 114507, 2024, doi: 10.1016/j.jece.2024.114507.
- [8] L. Sun *et al.*, "Modified chicken manure biochar enhanced the adsorption for Cd²⁺ in aqueous and immobilization of Cd in contaminated agricultural soil," *Sci. Total Environ.*, vol. 851, no. 2, Art. no. 158252, 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.158252.
- [9] K. N. Palansooriya *et al.*, "Prediction of soil heavy metal immobilization by biochar using machine learning," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 56, no. 7, pp. 4187–4198, 2022, doi: 10.1021/acs.est.1c08302.
- [10] T. G. Ambaye, M. Vaccari, E. D. van Hullebusch, A. Amrane, and S. Rtimi, "Mechanisms and adsorption capacities of biochar for the removal of organic and inorganic pollutants from industrial wastewater: A review," *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 18, pp. 3273–3294, 2021, doi: 10.1007/s13762-020-03060-w.
- [11] W. G. A. Torres *et al.*, "Biochar as a soil conditioner for common bean plants," *Acta Sci. Agron.*, vol. 45, no. 1, Art. no. 60644, 2023, doi: 10.4025/actasciagron.v45i1.60644.
- [12] R. J. Cabello-Torres, J. R. Romero-Longwell, L. Valdiviezo-Gonzales, R. Munive-Cerrón, and C. A. Castañeda-Olivera, "Biochar derived from pig manure with ability to reduce the availability of Pb in contaminated agricultural soils," *Sci. Agropecuaria*, vol. 12, no. 4, pp. 461–470, 2021.
- [13] A. Emamverdian, A. Ghorbani, N. Pehlivan, Y. Li, M. Zargar, and G. Liu, "Bamboo biochar helps minimize Brassica phytotoxicity driven by toxic metals in naturally polluted soils of four mine zones," *Environ. Technol. Innov.*, vol. 36, Art. no. 103753, 2024, doi: 10.1016/j.eti.2024.103753.
- [14] X. Li *et al.*, "Combined magnetic biochar and ryegrass enhanced the remediation effect of soils contaminated with multiple heavy metals," *Environ. Int.*, vol. 185, Art. no. 108498, 2024, doi: 10.1016/j.envint.2024.108498.
- [15] J. Sun, L. Cui, G. Quan, J. Yan, H. Wang, and L. Wu, "Effects of biochar on heavy metals migration and fractions changes with different soil types in column experiments," *Bioresources*, vol. 15, no. 2, pp. 4388–4406, 2020, doi: 10.15376/biores.15.2.4388-4406.
- [16] S. Cabello Ponce, "Eficacia de la adsorción con distintas dosis de biocarbón de gallinaza para restaurar el suelo contaminado con metales pesados del centro poblado de Chicrín, Pasco – 2023," *Tesis de pregrado*, Univ. de Huánuco, 2023.
- [17] Q. Chen *et al.*, "Remediation of cadmium and lead in mine soil by ameliorants and its impact on maize (*Zea mays* L.) cultivation," *Agronomy*, vol. 14, no. 2, p. 372, 2024, doi: 10.3390/agronomy14020372.
- [18] I. Lobzenko *et al.*, "Development of a unique technology for the pyrolysis of rice husk biochar for promising heavy metal remediation," *Agriculture*, vol. 12, no. 10, Art. no. 1689, 2022, doi: 10.3390/agriculture12101689.
- [19] C. Peiris, Y. A. Alahakoon, U. M. Arachchi, T. E. Mlsna, S. R. Gunatilake, and X. Zhang, "Phosphorus-enriched biochar for the remediation of heavy metal contaminated soil," *J. Agric. Food Res.*, vol. 12, Art. no. 100546, 2023, doi: 10.1016/j.jafr.2023.100546.
- [20] J. A. Ippolito, T. F. Ducey, K. A. Spokas, *et al.*, "A biochar selection method for remediating heavy metal contaminated mine tailings," *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 21, pp. 9611–9622, 2024, doi: 10.1007/s13762-024-05621-9.
- [21] B. A. Kamdar, C. H. Solanki, and K. R. Reddy, "Moringa seed cake biochar: A novel binder for sustainable remediation of lead-contaminated soil," *J. Environ. Eng.*, vol. 149, no. 10, Art. no. 04023057, 2023, doi: 10.1061/(JOE)EDU.EEENG-7332.
- [22] T. X. Vuong, J. Stephen, T. B. Minh, T. T. T. Nguyen, T. H. Duong, and D. T. N. Pham, "Chemical fractionations of lead and zinc in the contaminated soil amended with the blended biochar/apatite," *Molecules*, vol. 27, no. 22, Art. no. 8044, 2022, doi: 10.3390/molecules27228044.
- [23] J. Lozada, "Investigación aplicada," *CienciaAmérica: Rev. Divulg. Cient. Univ. Tecnol. Indoamérica*, vol. 3, pp. 47–50, 2014. [Online]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6163749>
- [24] Ministerio del Ambiente (MINAM), *Guía para el muestreo de suelos* (Resolución Ministerial N.º 085-2014-MINAM), Lima, Perú, 2014. [Documento institucional].
- [25] H. Wang, S. Chen, H. Liu, J. Li, Q. uz Zaman, K. Sultan, M. Rehman, M. Jeridi, S. Siddiqui, S. Fahad, G. Deng, and A. Chen, "Maize straw biochar can alleviate heavy metals stress in potato by improving soil health," *S. Afr. J. Bot.*, vol. 162, pp. 391–401, 2023, doi: 10.1016/j.sajb.2023.09.024.
- [26] U.S. EPA, "Method 3050B: Acid digestion of sediments, sludges, and soils," Revision 2, Washington, DC, 1996.
- [27] Ministerio del Ambiente (MINAM), *Decreto Supremo N.º 011-2017-MINAM, que aprueba los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo*, Lima, Perú, 2017.
- [28] S. Yang *et al.*, "Insights into remediation of cadmium and lead contaminated-soil by Fe-Mn modified biochar," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 12, no. 3, Art. no. 112771, 2024, doi: 10.1016/j.jece.2024.112771.
- [29] A. Vannini *et al.*, "Biochar amendment reduces the availability of Pb in the soil and its uptake in lettuce," *Toxics*, vol. 9, no. 10, Art. no. 268, 2021, doi: 10.3390/toxics9100268.
- [30] A. D. Igalavithana *et al.*, "Soil lead immobilization by biochars in short-term laboratory incubation studies," *Environ. Int.*, vol. 127, pp. 190–198, 2019, doi: 10.1016/j.envint.2019.03.031.
- [31] C. Wu *et al.*, "Biological calcium carbonate enhanced the ability of biochar to passivate antimony and lead in soil," *Environ. Sci. Process. Impacts*, vol. 25, no. 8, pp. 1365–1373, 2023, doi: 10.1039/d3em00117b.
- [32] P. Luo, W. Zhang, D. Xiao, J. Hu, N. Li, y J. Yang, "Biochar-based fertilizers: Advancements, applications, and future directions in sustainable agriculture—A review," *Agronomy (Basel)*, vol. 15, no. 5, Art. no. 1104, 2025, doi: 10.3390/agronomy15051104.
- [33] S. Kalu, A. Seppänen, K. Z. Mganga, O.-M. Sietiö, B. Glaser, y K. Karhu, "Biochar reduced the mineralization of native and added soil organic carbon: evidence of negative priming and enhanced microbial carbon use efficiency," *Biochar*, vol. 6, Art. no. 7, 2024, doi: 10.1007/s42773-023-00294-y.
- [34] J. M. De la Rosa, P. Campos, y A. Diaz-Espejo, "Soil biochar application: Assessment of the effects on soil water properties, plant

- physiological status, and yield of super-intensive Olive groves under controlled irrigation conditions”, *Agronomy (Basel)*, vol. 12, no. 10, Art. no. 2321, 2022, doi: 10.3390/agronomy12102321
- [35] R. Maceiras, L. Perez-Rial, V. Alfonsin, J. Feijoo, y I. Lopez, “Biochar amendments and phytoremediation: A combined approach for effective lead removal in shooting range soils”, *Toxics*, vol. 12, no. 7, Art. no. 520, 2024, doi: 10.3390/toxics12070520
- [36] L. Cui, L. Li, R. Bian, J. A. Ippolito, J. Yan, y G. Quan, “Physicochemical disintegration of biochar: a potentially important process for long-term cadmium and lead sorption”, *Biochar*, vol. 3, no. 4, pp. 511–518, 2021, doi: 10.1007/s42773-021-00108-z
- [37] T. X. Vuong, D. P. Nguyen, V. H. Ngoc Nguyen, T. T. Ha Pham, y T. T. Thuy Nguyen, “Immobilization of lead and zinc in contaminated soil using taro stem-derived biochar and apatite amendments: a comparative study of application ratios and pyrolysis temperatures”, *RSC Adv.*, vol. 15, no. 15, pp. 11975–12000, 2025, doi: 10.1039/d5ra00912j
- [38] H. Singh, B. K. Northup, C. W. Rice, y P. V. V. Prasad, “Biochar applications influence soil physical and chemical properties, microbial diversity, and crop productivity: a meta-analysis”, *Biochar*, vol. 4, Art. no. 8, 2022, doi: 10.1007/s42773-022-00138-1
- [39] T. M. Agbede, “Influence of Tithonia diversifolia biochar on selected soil physicochemical properties, leaf nutrient concentrations and broccoli growth”, *Sci. Rep.*, vol. 15, no. 1, Art. no. 8084, 2025, doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-91844-w>
- [40] K. Pandian, S. Vijayakumar, M. R. A. F. Mustaffa, P. Subramanian, y S. Chitraputhirapillai, “Biochar – a sustainable soil conditioner for improving soil health, crop production and environment under changing climate: a review”, *Front. Soil Sci.*, vol. 4, 2024, doi: 10.3389/fsoil.2024.1376159
- [41] F. Jiang, Y. Li, Y. Jia, L. Li, R. Guan, y A. Biswas, “Compound effects of biochar application and irrigation on soil water and temperature transport”, *Front. Sustain. Food Syst.*, vol. 8, Art. no. 1480991, 2024, doi: 10.3389/fsufs.2024.1480991
- [42] M. Rizwan *et al.*, “Sustainable manufacture and application of biochar to improve soil properties and remediate soil contaminated with organic impurities: a systematic review”, *Front. Environ. Sci.*, vol. 11, 2023, doi: 10.3389/fenvs.2023.1277240