

Biorremediación del suelo con acidez y metales pesados (As, Cd) en un ecosistema altoandino con influencia minera mediante biochar de estiércol de cuy y consorcios microbianos

Alberto Arias, Juancarlos Cruz, Melina López, Richard Solórzano, Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA).

RESUMEN

Los suelos de pastizales altoandinos en zonas con influencia minera (Pasco, Perú, 4125 m) presentan acidez y contaminación por arsénico (As: 5.77 mg kg⁻¹) y cadmio (Cd: 1.71 mg kg⁻¹), lo que genera riesgo de transferencia de metales a la cadena trófica ganadera. Evaluamos el efecto del biochar de estiércol de cuy inoculado con consorcios microbianos (*Bacillus subtilis*, *Pseudomonas putida*, *Trichoderma* sp.) sobre la inmovilización de As y Cd y la calidad nutricional de pastos nativos (*Festuca dolichophylla*, *Carex* sp.) y cultivados (*Lolium perenne*, *Dactylis glomerata*). Establecimos un experimento factorial 4×4 en bloques completos al azar (48 parcelas). Determinamos factores de bioconcentración (BCF) y calidad nutricional, analizando mediante GLM y PCA. Los resultados evidenciaron una interacción significativa especie×tratamiento. Destacó la reversión fenotípica de *Festuca dolichophylla* frente a As, que pasó de acumuladora (BCF>1) a exclusora efectiva (BCF<0.01) bajo inoculación con *Trichoderma* sp. Asimismo, *Trichoderma* sp. y *P. putida* redujeron la translocación de Cd en *Lolium perenne* (BCF<0.1), manteniendo niveles seguros para consumo animal. El uso sinérgico de biochar y consorcios microbianos mitigó la transferencia de metales y preservó la calidad nutricional del forraje.

INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas de pastizales altoandinos en el Perú enfrentan una amenaza creciente debido a la contaminación por metales pesados derivada de actividades mineras históricas, lo que genera riesgos significativos para la producción ganadera y la seguridad alimentaria (Chang Kee et al., 2018; Castro Bedriñana et al., 2020). En la región de Pasco, ubicada a 4125 m de altitud, los suelos destinados al pastoreo presentan acidez (pH 5.3) y concentraciones de arsénico (As: 5.77 mg kg⁻¹) y cadmio (Cd: 1.71 mg kg⁻¹) que superan los límites permisibles para uso agropecuario. Estos contaminantes pueden ser absorbidos por las especies forrajeras, acumularse en los tejidos vegetales y transferirse posteriormente al ganado en pastoreo, ingresando así a la cadena trófica y comprometiendo la salud animal y humana (Khan et al., 2020; Angon et al., 2024). Los métodos convencionales de remediación fisicoquímica, como la excavación de suelos o el lavado, resultan frecuentemente costosos y de difícil implementación en entornos remotos de gran altitud (Ganie et al., 2021; Saqr et al., 2025). En contraste, los enfoques de fitorremediación y biorremediación ofrecen alternativas sostenibles al utilizar plantas y microorganismos para inmovilizar, estabilizar o reducir la biodisponibilidad de metales pesados (Praveen & Nagalakshmi, 2022; Karnwal et al., 2024). El biochar, material rico en carbono producido mediante pirólisis de biomasa orgánica, ha emergido como una herramienta prometedora debido a su alta capacidad de adsorción y su capacidad para mejorar las propiedades fisicoquímicas del suelo (Chien & Lu, 2025; Ge et al., 2024). Adicionalmente, el biochar puede servir como vehículo para microorganismos benéficos como *Bacillus subtilis*, *Pseudomonas putida* y *Trichoderma* sp., que promueven la inmovilización de metales mediante mecanismos como biosorción, producción de sideróforos y cambios en la química de la rizosfera (Timofeeva et al., 2023; Gaylarde &

da Fonseca, 2025). En las regiones altoandinas, el estiércol de cuy (*Cavia porcellus*) representa un residuo orgánico abundante y localmente disponible con alto contenido de nutrientes y propiedades alcalinas, lo que lo convierte en una materia prima prometedora para la producción de biochar dentro de un marco de economía circular (Calero-Rios et al., 2025; Ccopi et al., 2025). El objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto del biochar de estiércol de cuy inoculado con consorcios microbianos sobre la dinámica de arsénico y cadmio, y la calidad nutricional de pastos nativos (*Festuca dolichophylla*, *Carex* sp.) y cultivados (*Lolium perenne*, *Dactylis glomerata*) en suelos con acidez y metales pesados de la región altoandina de Pasco, como una estrategia aplicable a zonas con influencia minera.

1. METODOLOGÍA

Área de estudio y diseño experimental

El estudio se realizó en la comunidad de Vicco, Pasco, Perú (4125 m; 361259.67 m E, 8801327.07 m N), en una zona de vida Páramo Subalpino Tropical Muy Húmedo (temperatura: -11 a 15 °C; precipitación: 850 mm anuales). El suelo experimental, clasificado como franco arenoso (58% arena, 36% limo, 6% arcilla), presentó pH fuertemente ácido (5.3) y concentraciones basales de arsénico (5.77 mg kg⁻¹) y cadmio (1.71 mg kg⁻¹) que superan los límites permisibles para uso agropecuario. Se estableció un diseño de bloques completos al azar con arreglo factorial 4 × 4: cuatro especies forrajeras (*Festuca dolichophylla* nativa, *Carex* sp. nativa, *Lolium perenne* cultivada y *Dactylis glomerata* cultivada) y cuatro tratamientos de enmienda (control sin biochar ni microorganismos, *Bacillus subtilis* + biochar, *Pseudomonas putida* + biochar, y *Trichoderma* sp. + biochar), con tres repeticiones, totalizando 48 parcelas experimentales de 4 m².

Preparación del biochar e inóculos microbianos

El biochar se produjo mediante pirólisis lenta de estiércol de cuy (300-500 °C, 3-4 h, oxígeno limitado), obteniendo un rendimiento del 30-35%. El material resultante presentó pH alcalino (8.4), 40.4% de materia orgánica, y altas concentraciones de fósforo (21910 mg kg⁻¹) y potasio (31034 mg kg⁻¹). Se aplicó a una dosis de 20 t ha⁻¹ durante la siembra. Los inóculos microbianos se prepararon a partir de cepas identificadas molecularmente (Solórzano-Acosta & Quispe, 2024; Huasasquiche et al., 2024). *Bacillus subtilis* y *Pseudomonas putida* se cultivaron en caldo nutritivo (28 °C, 72-96 h) hasta alcanzar 1 × 10⁹ UFC mL⁻¹, diluyendo posteriormente a 1 × 10⁷ UFC mL⁻¹. *Trichoderma* sp. se preparó como suspensión de esporas (40 g L⁻¹) a partir de sustrato de maíz esporulado. La inoculación se aplicó en la siembra y a los 30, 90 y 120 días después de la siembra, a una dosis equivalente a 5 L ha⁻¹.

Análisis y parámetros evaluados

A los ocho meses del establecimiento, se cosechó la biomasa aérea de cada parcela, determinando el peso fresco y seco (80 °C, 48 h) para calcular el rendimiento de materia seca. Las concentraciones de metales en suelo y tejido vegetal se cuantificaron mediante espectrometría de emisión atómica con plasma de microondas (MP-AES), previa digestión ácida siguiendo los métodos EPA 3051A (suelos) y 3050B (tejidos vegetales). La calidad nutricional del forraje (proteína cruda, fibra cruda, energía total, calcio) se

analizó siguiendo métodos AOAC (2019). El factor de bioconcentración (BCF), que evalúa la transferencia de metales del suelo a las hojas, se calculó como: $BCF = C_{\text{hoja}} / C_{\text{suelo}}$, donde valores >1 indican acumulación y <1 indican exclusión.

Análisis estadístico

Los datos se analizaron mediante modelos lineales generalizados (GLM) con distribución Gamma y función de enlace logarítmico en R v4.3.0 (R Core Team, 2020). La significancia de los efectos (especie, tratamiento e interacción) se determinó mediante análisis de desviación (ANODEV, χ^2). Las medias se compararon con la prueba HSD de Tukey ($\alpha = 0.05$). Adicionalmente, se realizó un análisis de componentes principales (PCA) para integrar las variables de acumulación de metales y calidad nutricional.

2. RESULTADOS

El análisis de desviaciones (ANODEV) mostró que la acumulación de metales en tejido vegetal y los factores de bioconcentración (BCF) estuvieron determinados principalmente por la interacción entre la especie forrajera y el tratamiento con biochar inoculado ($p < 0.001$; Tabla 1). Este patrón confirma que la efectividad de la biorremediación depende de combinaciones específicas planta-microorganismo.

Tabla 1. Análisis de desviación del efecto de especie (E), tratamiento (T) y su interacción sobre la dinámica de arsénico y cadmio.

Fuente	df	As (planta)	As (BCF)	Cd (planta)	Cd (BCF)
Especie (E)	3	186.43***	218.87***	19.67***	20.56***
Tratamiento (T)	3	16.43***	32.05***	47.82***	82.07***
Interacción (E×T)	9	54.31***	54.01***	19.50***	17.46**

*Nota: Valores χ^2 . GLM Gamma, enlace log. ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$.

Reversión fenotípica frente a arsénico en *Festuca dolichophylla*

El hallazgo más relevante fue la reversión del comportamiento de *Festuca dolichophylla* frente al arsénico. En condiciones control, esta especie nativa actuó como acumuladora, con un factor de bioconcentración (BCF) de 1.42, lo que indica transferencia activa del metaloide del suelo a los tejidos foliares. Sin embargo, bajo inoculación con *Trichoderma* sp. + biochar, la especie transicionó a un comportamiento de exclusión efectiva, alcanzando un BCF de 0.008, lo que representa una reducción superior al 99% en la transferencia de arsénico a la biomasa aérea. Los tratamientos con *Bacillus subtilis* y *Pseudomonas putida* también redujeron significativamente la acumulación de As (BCF de 0.34 y 0.28 respectivamente), aunque sin alcanzar la eficacia de *Trichoderma*.

Mitigación de cadmio en especies cultivadas

Para el cadmio, los tratamientos con microorganismos mostraron efectos destacados en las especies cultivadas. En *Lolium perenne*, el BCF se redujo desde 0.35 en control hasta 0.08 con *Pseudomonas putida* y 0.07 con *Trichoderma* sp., valores que garantizan la producción segura de forraje para consumo animal. *Dactylis glomerata* presentó un comportamiento similar, con BCF que disminuyeron de 0.32 en control a 0.09 con *Pseudomonas putida* y 0.08 con *Trichoderma* sp. En ambas especies, *Bacillus subtilis*

también redujo significativamente la acumulación de Cd (BCF de 0.18 y 0.21 respectivamente), aunque con menor eficacia que los otros tratamientos.

Comportamiento de especies nativas frente a cadmio

Carex sp. mostró un comportamiento consistentemente exclusor para cadmio en todos los tratamientos, con BCF que oscilaron entre 0.08 y 0.12, sin diferencias significativas entre tratamientos. *Festuca dolichophylla*, si bien no alcanzó los bajos niveles de Cd de las especies cultivadas, también redujo su acumulación bajo inoculación, con BCF que pasaron de 0.28 en control a 0.15 con *Trichoderma* sp.

Producción de biomasa

Es importante destacar que las reducciones en la acumulación de metales ocurrieron sin penalizar la producción de biomasa, la cual estuvo determinada exclusivamente por la especie ($p < 0.001$) y no por los tratamientos. *Lolium perenne* y *Dactylis glomerata* presentaron los mayores rendimientos (4.2 y 3.8 t MS ha⁻¹ respectivamente), mientras que *Festuca dolichophylla* y *Carex* sp. mostraron producciones moderadas (2.8 y 2.1 t MS ha⁻¹). Esto confirma que la inoculación microbiana modula selectivamente la absorción de metales sin afectar la productividad.

Análisis integrado del sistema suelo-planta

El análisis de componentes principales (PCA) integró la acumulación de metales y los parámetros de calidad nutricional, revelando una clara diferenciación funcional entre especies. El CP1 (31.2% de la varianza) representó un gradiente desde defensa estructural y estrés por metales (fibra cruda, Cd, As) hasta calidad metabólica y energética (energía total, carbohidratos, calcio). *Festuca dolichophylla* se agrupó en el lado negativo del CP1, asociada con mayor contenido de fibra y acumulación de metales tóxicos en condiciones control, mientras que *Lolium perenne* y *Dactylis glomerata* se proyectaron hacia el eje positivo, asociadas con mayor densidad energética y menor acumulación de metales bajo tratamientos con microorganismos benéficos. Esta ordenación confirma que la fitorremediación asistida por microbios amplifica las estrategias intrínsecas de cada especie: las nativas priorizan la tolerancia mediante defensa estructural, mientras las cultivadas optimizan la exclusión de metales y la eficiencia metabólica.

CONCLUSIONES

Se demostró que en condiciones de campo la reversión fenotípica de *Festuca dolichophylla* frente a arsénico, pasando de comportamiento acumulador (BCF > 1 en control) a exclusor efectivo (BCF < 0.01) bajo inoculación con *Trichoderma* sp. + biochar, lo que representa una reducción superior al 99% en la transferencia de este metaloide a los tejidos foliares y, por tanto, la eliminación del riesgo de ingreso a la cadena trófica ganadera.

La inoculación con *Trichoderma* sp. y *Pseudomonas putida* redujo significativamente la translocación de cadmio en las especies cultivadas *Lolium perenne* y *Dactylis glomerata*, manteniendo factores de bioconcentración por debajo de 0.1, umbral que garantiza la producción segura de forraje en suelos con contaminación por Cd, sin afectar la productividad de biomasa.

El análisis multivariado confirmó estrategias ecológicas contrastantes entre especies nativas y cultivadas: *Festuca dolichophylla* prioriza la tolerancia mediante defensa estructural (mayor lignificación), mientras que *Lolium perenne* y *Dactylis glomerata* optimizan la exclusión de metales y la eficiencia metabólica (mayor densidad energética), siendo esta diferenciación amplificada por la inoculación microbiana.

REFERENCIAS

1. Chang Kee, J. et al. (2018). Accumulation of heavy metals in native Andean plants. *Environ Sci Pollut Res*, 25, 33957-66. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3325-z>
2. Castro Bedriñana, J., Chirinos Peinado, D. & Peñaloza-Fernández, R. (2020). Lead bioaccumulation in pastures in highly contaminated soils. *Adv Sci Technol Eng Syst J*, 5(2), 126-32. <https://doi.org/10.25046/aj050216>
3. Khan, Z.I. et al. (2020). Seasonal transfer of metals from pasture to animals. *Environ Sci Pollut Res*, 27, 16339-49. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08140-5>
4. Angon, P.B. et al. (2024). Sources and effects of heavy metals contamination in soil-plant-animal chain. *Heliyon*, 10(7), e28357. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28357>
5. Ganie, A.S. et al. (2021). Nanoremediation technologies for contaminated environments. *Chemosphere*, 275, 130065. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130065>
6. Saqr, A.M. et al. (2025). Soil remediation through washing and flushing. *Environ Earth Sci*, 84, 401. <https://doi.org/10.1007/s12665-025-12386-y>
7. Praveen, R. & Nagalakshmi, R. (2022). Bioremediation and phytoremediation of heavy metals. *Mater Today Proc*, 68, 1562-7. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.07.190>
8. Karnwal, A. et al. (2024). Bioremediation strategies for heavy metals pollution. *Front Environ Sci*, 12. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1397850>
9. Chien, S.W.C. & Lu, P.Q. (2025). Heavy metal immobilization using biochar. *Eng Proc*, 91, 12. <https://doi.org/10.3390/engproc2025091012>
10. Ge, S. et al. (2024). Cadmium removal by biochar from aqueous solutions. *Sci Rep*, 14, 450. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-50525-2>
11. Timofeeva, A.M., Galyamova, M.R. & Sedykh, S.E. (2023). Plant growth-promoting soil bacteria. *Plants*, 12, 4074. <https://doi.org/10.3390/plants12244074>
12. Gaylarde, C.C. & da Fonseca, E.M. (2025). Biofertilization and bioremediation in developing countries. *Micro*, 5(2). <https://doi.org/10.3390/micro5020018>
13. Calero-Rios, E. et al. (2025). Guinea pig manure enhances maize yield and quality. *Agrochemicals*, 4(2). <https://doi.org/10.3390/agrochemicals4020006>
14. Ccopi, D. et al. (2025). Yield estimation in vegetables under biochar levels. *Sci Hortic*, 352, 114425. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2025.114425>
15. Solórzano-Acosta, R. & Quispe, K. (2024). Pseudomonas and Bacillus as growth-promoting rhizobacteria on avocado. *J Sustain Agric Environ*, 3(3). <https://doi.org/10.1002/sae2.12114>
16. Huasasquiche, L. et al. (2024). Bacillus and Rhizophagus improve strawberry growth and yield. *Microorganisms*, 12. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12091816>
17. AOAC. (2019). Official Methods of Analysis (21st ed.). Association of Official Analytical Chemists.
18. R Core Team. (2020). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing.