

Remediation of soils contaminated by copper and lead using compost with effective microorganisms

Palacios Perez, Diego Martin ¹ ; Quispe Zapana, Alex Anderson² ; Ruiz-Huaman, Carmen Milagros³ 

¹Peruvian University of Applied Sciences, Peru, u20191b132@upc.edu.pe

²Peruvian University of Applied Sciences, Peru, u20211c391@upc.edu.pe

³Peruvian University of Applied Sciences, Peru, pcigcru@upc.edu.pe

Abstract—*In Peru, mining is a fundamental activity for economic development; however, its practice generates significant environmental impacts, especially on soils affected by heavy metals such as copper and lead. Therefore, sustainable remediation strategies are needed to contribute to their recovery. This study evaluated the effectiveness of compost enriched with and without effective microorganisms (EM) as a biotechnological alternative for the recovery of soils degraded by mining waste. A quantitative experimental methodology was used, lasting 60 days. Four treatments were applied in pots containing 1 kg of soil: T1 and T2 used conventional compost at 25% and 50%, respectively; while T3 and T4 consisted of 25% and 50% compost enriched with EM, with the addition of 50 ml and 100 ml of EM, maintaining the same amendment proportions. The results showed removal efficiencies of 15.2%, 41.7%, 97.7%, and 98.8% for copper, and 18.1%, 42.2%, 98.7%, and 98.8% for lead, in the respective treatments. In conclusion, the compost enriched with 50% EM (T4) was the most effective treatment, demonstrating its potential to reduce metal concentrations and improve the soil's physicochemical properties. However, very similar values were obtained in T3, indicating that 50 ml is sufficient. Furthermore, increasing the dosage and application time optimized the efficiency of the remediation process.*

Keywords— *Remediation, sustainability, degraded soil, effective microorganisms, compost.*

Remediación de suelos contaminados por cobre y plomo aplicando compost con microorganismos eficaces

Palacios Perez, Diego Martin ¹ ; Quispe Zapana, Alex Anderson² ; Ruiz-Huaman, Carmen Milagros³ 

¹Peruvian University of Applied Sciences, Peru, u20191b132@upc.edu.pe

²Peruvian University of Applied Sciences, Peru, u20211c391@upc.edu.pe

³Peruvian University of Applied Sciences, Peru, pcigcru@upc.edu.pe

Resumen– En el Perú, la minería constituye una actividad fundamental para el desarrollo económico; sin embargo, su práctica genera impactos ambientales significativos, especialmente en los suelos que son afectados por metales pesados como el cobre y el plomo. Frente a ello, se requieren estrategias sostenibles de remediación que contribuyan a su recuperación. El estudio evaluó la efectividad del compost enriquecido con y sin microorganismos eficaces (EM) como alternativa biotecnológica para la recuperación de suelos degradados por pasivos mineros. Se empleó una metodología cuantitativa experimental con una duración de 60 días. Se aplicaron cuatro tratamientos en macetas con 1 kg de suelo: T1 y T2 utilizaron compost convencional al 25 % y 50 %, respectivamente; mientras que T3 y T4 consistieron en 25 % y 50 % de compost enriquecido con EM con adición de 50 ml y 100 ml de EM manteniendo las mismas proporciones de enmienda. Los resultados mostraron eficiencias de remoción en 15.2 %, 41.7 %, 97.7 % y 98.8 % para de cobre, y de 18.1 %, 42.2 %, 98,7 % y 98.8 % para el plomo, en los tratamientos respectivamente. En conclusión, el compost enriquecido con EM al 50 % (T4) fue el tratamiento más efectivo, demostrando su potencial para reducir la concentración de metales y mejorar las propiedades fisicoquímicas del suelo aunque se obtuvieron valores muy similares en el T3 por lo que es suficiente utilizar 50 ml. Además, se evidenció que el aumento en la dosis y el tiempo de aplicación optimizó la eficiencia del proceso de remediación.

Palabras clave-- Remediación, sostenibilidad, suelo degradado, microorganismos eficaces, compost.

I. INTRODUCCIÓN

Las actividades mineras son clave e indispensables para muchas economías en el mundo, pues aporta en gran medida al producto bruto interno (PBI) de países como Chile, Australia, y Perú con 12, 16 y 10% del total respectivamente ([1]; [2]). Se demuestra con estos porcentajes que la industria minera es altamente rentable; sin embargo, el cierre de ellas, por tema de restauración ambiental, retiro de instalaciones, remediación de ambientes usados y recursos naturales implica un alto costo. Esto conlleva a dejar sin efecto la remediación del suelo del lugar, generando así 6026 Pasivos Ambientales Mineros (PAM) los cuales 652 se concentran en Lima, creados principalmente por mineras informales ([3];[4]). Estos PAM generan riesgos ambientales e impacto al bienestar humano tales como contaminación microbiológica, metales pesados como el cobre, plomo, cadmio, hierro y zinc que en conjunto degradan aún más al suelo ([5];[6];[7]). Esto no es un

tema menor pues, según la Organización de las Naciones Unidas (ONU), es un recurso fundamental para la humanidad pues son la base de la agricultura y el 95% de productos alimenticios que consumen los seres humanos provienen del suelo. Además, la degradación de este recurso puede perjudicar la producción de cultivos y con ello la alimentación humana [8]. Según la Universidad de Florida, el cobre puede causar a corto plazo diarrea, vómitos y a largo plazo anemia, ictericia entre otros graves males [9]. Por otro lado, el plomo según la Organización Mundial de Salud (OMS) [10], también puede causar problemas graves en la salud humana y no existe un nivel de plomo que se considere seguro. A pesar de existir métodos convencionales para la remediación como extracción ácida y lavado de suelos, estos resultan ser costosos, poco eficientes e incluso ser contraproducentes [11] a diferencia de remediación con compost. El método de compostaje con microorganismos eficaces (EM) se perfila como método de remediación sostenible pues, se pueden aprovechar residuos orgánicos para convertirlos en un sustrato capaz de disminuir valores de metales pesados en el suelo.

Por todo lo antes mencionado, el objetivo de este trabajo es evaluar la efectividad del compost enriquecido con microorganismos eficaces (EM) como alternativa biotecnológica para la recuperación de suelos degradados por pasivos mineros en diferentes dosis frente al compost tradicional optando por diversas cantidades. Esto se busca con el objetivo de remediar suelos contaminados y valorizar residuos orgánicos.

II. METODOLOGÍA

A. Elaboración de compost con EM

Para el proceso de compostaje se recolectaron residuos orgánicos provenientes del mercado Tierra Prometida de Santa Anita, el cual genera aproximadamente 15 toneladas semanales de este tipo de residuos. De este total, solo cerca del 10 % es destinado a procesos de valorización como el compostaje, mientras que el resto es dispuesto de manera inadecuada en botaderos, lo que evidencia un bajo aprovechamiento de estos residuos. Posteriormente, los residuos fueron sometidos a un proceso de segregación y picado con la finalidad de mejorar la homogeneidad del sustrato y facilitar la actividad microbiológica. Para la conformación de las camas de

compostaje (1 m × 25 cm), se mezclaron 8 kg de residuos orgánicos frescos con 2 kg de residuos secos (hojas secas), lo que permitió establecer una relación inicial carbono/nitrógeno (C/N) dentro del rango óptimo de 25:1 a 30:1. Esta relación es crucial para que los microorganismos puedan aprovechar estos elementos al metabolizar el C y sintetizar sus componentes con N, para que el proceso de compostaje sea eficiente.

Durante el proceso, se aplicaron microorganismos (EM) en dos tratamientos experimentales, con dosis iniciales de 50 ml y 100 ml, respectivamente, realizándose aplicaciones semanales durante un periodo de ocho semanas. A lo largo de este tiempo se monitorearon parámetros como el pH y la temperatura, con el fin de controlar la evolución del proceso y asegurar el paso por sus distintas fases (mesófila, termófila y de maduración). Una vez alcanzada la etapa final, el compost fue enviado al laboratorio de la Universidad Nacional Agraria La Molina para evaluar su calidad, cuyos resultados fueron comparados con los criterios establecidos en la Norma Técnica Peruana NTP 201.208:2021 del INACAL, a fin de determinar su conformidad y su aptitud como enmienda orgánica.

B. Recolección de Muestras de suelo contaminado

Para la recolección de muestras se trabajó un pasivo minero como problemática ambiental, en tal sentido se optó por la relavera Chacahuaro en Matucana, Perú. Para saber el nivel de contaminación se envió a analizar las muestras de suelo degradado en los puntos de recojo como indica la guía de muestreo de suelos.

Pasado los 15 días, se evidenció por medio de los resultados que efectivamente el suelo estaba degradado y se confirmó mediante análisis, la gravedad de la situación de sitio, por la alta concentración de plomo y cobre. Posteriormente, se decidió tomar muestras para la experimentación. Se recogió 5de una hectárea, tal como lo menciona [12], estas muestras se homogeneizaron para el proceso experimental.



Fig. 1 Pasivo ambiental minero en Huarochiri.

C. Aplicación de Compost con EM en el suelo contaminado

Luego de obtener el compost enriquecido con microorganismos eficaces (EM) y el suelo contaminado proveniente de la relavera Chacahuaro, ambos materiales fueron sometidos a un proceso de tamizado con la finalidad de eliminar partículas gruesas y asegurar la homogeneidad del sistema experimental. Todos los tratamientos fueron preparados en macetas de 1 kg, procurando que la mezcla entre el suelo y el compost sea lo más homogénea posible. En los tratamientos donde se aplicaron microorganismos (T3 y T4), estos se añadieron de manera semanal durante todo el periodo experimental, con la finalidad de mantener su actividad y favorecer los procesos de remediación como se precisa en la Tabla I. Previamente a su instalación, se determinó la concentración inicial de metales pesados (Cu y Pb) tanto en el suelo como en el compost, con el propósito de establecer una línea base. De esa manera, se descarta que la reducción observada se deba únicamente a un efecto de “dilución” además que, matemáticamente, mezclando 500 g de suelo y 500 g de compost solo podría haber reducción máxima del 50% de metales pesados por simple “dilución”. Cabe destacar que el compost presentó concentraciones significativamente menores de metales en comparación con el suelo de la relavera, lo que permitió evaluar de manera más precisa la contribución de los procesos de remediación.

TABLA I
 DOSIS DE LOS 4 TRATAMIENTOS

Tratamiento	Suelo contaminado	Enmienda	Porcentaje compost	Segunda Dosis de EM
T1	750 g	250 g compost	25 %	0 ml
T2	500 g	500 g compost	50 %	0 ml
T3	750 g	250 g compost con EM	25 %	50 ml
T4	500 g	500 g compost con EM	50 %	100 ml

Durante los 60 días de experimentación, se realizó un monitoreo semanal del pH y del contenido de humedad, manteniéndose este último alrededor del 40 %, condición considerada óptima para la actividad microbiológica. Asimismo, en los tratamientos T3 y T4 se aplicaron dosis adicionales semanales de EM (50 ml y 100 ml, respectivamente), con el objetivo de potenciar los mecanismos biológicos de estabilización.

En relación con el posible fenómeno de lixiviación, se controlaron las condiciones de humedad evitando la saturación del sistema, lo cual permitió minimizar el arrastre de metales por percolación. Del mismo modo, el uso de macetas sin drenaje significativo limitó la pérdida de lixiviados, lo que permite inferir que la disminución de las concentraciones de Cu y Pb no se debió principalmente a procesos de lavado, sino a mecanismos de inmovilización, adsorción y transformación química asociados a la materia orgánica y la actividad microbiana. Diversos estudios respaldan que el uso de compost y microorganismos eficaces favorece la remediación de metales pesados mediante procesos como la biosorción, bioacumulación y la formación de complejos estables con sustancias húmicas, reduciendo su biodisponibilidad, tal como señalan la [12] y [13]. Finalmente, las muestras fueron enviadas al laboratorio de la Universidad Agraria La Molina para la evaluación de sus parámetros físico-químicos y la determinación de la concentración de metales pesados, cuyos resultados fueron comparados con los valores establecidos en el Estándar de Calidad Ambiental (ECA) para suelo y los estándares del CCME (63 mg/kg para Cu y 70 mg/kg para Pb), con el fin de verificar el cumplimiento de la normativa ambiental vigente.



Fig. 2 Remediación de suelos contaminados con compost enriquecido con EM.

D. Análisis estadístico

Se aplicó un diseño experimental completamente al azar, conformado por cuatro tratamientos y cuatro repeticiones, con la finalidad de evaluar el efecto de microorganismos eficaces (EM) sobre la remediación de suelos contaminados con Cu y Pb. La comparación de los resultados entre tratamientos se efectuó mediante un análisis de varianza (ANOVA), empleando el software estadístico Minitab, con un nivel de significancia previamente establecido ($\alpha = 0,05$). Ello con el fin de determinar la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre el tratamiento sin EM y los tratamientos con

aplicación de EM en 25 y 50 %. Para ello se establecieron dos supuestos, el de Anderson darling y Homoestacidad, para corroborar si los datos son paramétricas o no paramétricas y seguir con ANOVA.

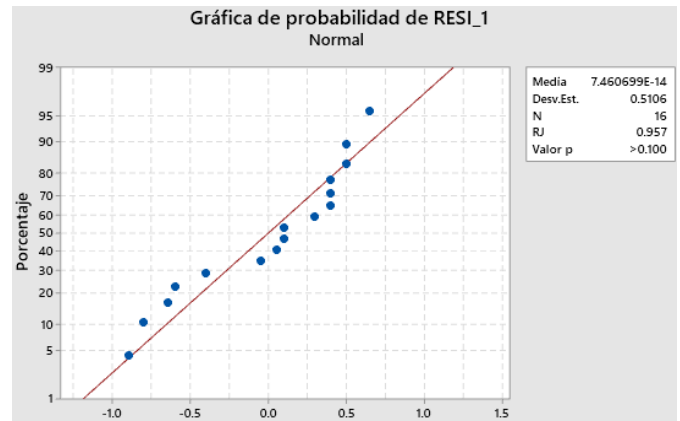


Fig. 3 Prueba de normalidad de Anderson Darling para el cobre (Cu), donde se acepta la H_0 , ya que el valor de p es mayor a 0.05.

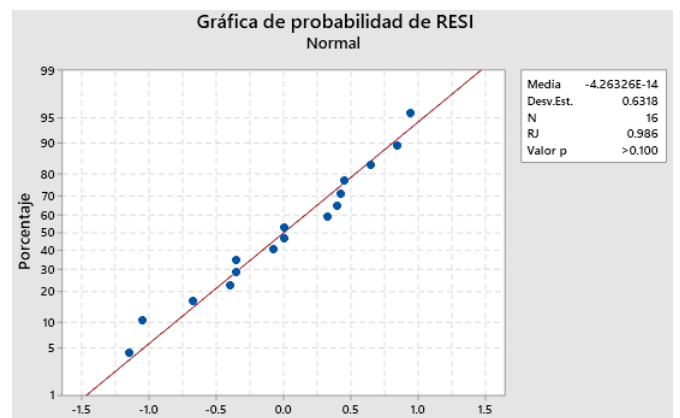


Fig. 4 Prueba de normalidad de Anderson Darling para el plomo (Pb), donde se acepta la H_0 , ya que el valor de p es mayor a 0.05.

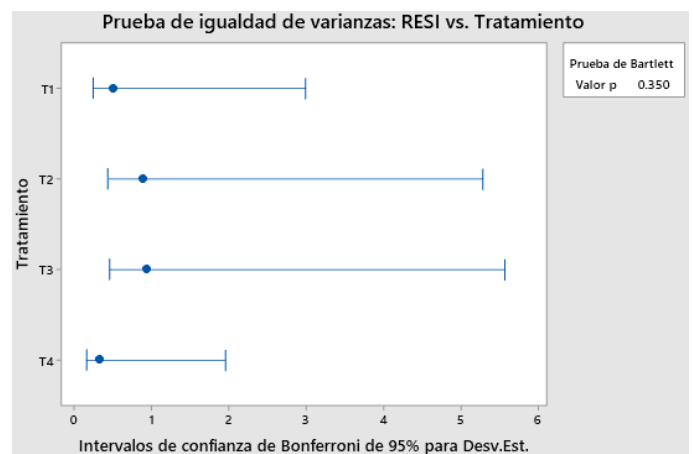


Fig. 5 Prueba de supuesto de homocedasticidad - prueba de bartlett para el cobre (Cu), donde se acepta la Ho, ya que el valor de p es mayor a 0.05.

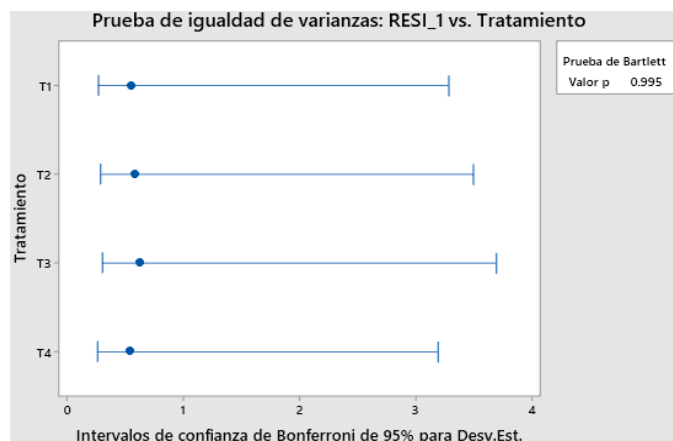


Fig. 6 Prueba de supuesto de homocedasticidad - prueba de bartlett para el plomo (Pb), donde se acepta la Ho, ya que el valor de p es mayor a 0.05.

Cuando el ANOVA evidenció diferencias significativas, se procedió a la aplicación de pruebas post hoc para la comparación de medias, utilizándose el test de Dunnett para contrastar específicamente los tratamientos con EM frente al control, y el test de Tukey para realizar comparaciones múltiples entre todos los tratamientos evaluados. Asimismo, la evolución temporal de los parámetros fisicoquímicos, tales como pH, temperatura y humedad, tanto del compost como del suelo, fue analizada mediante gráficos de líneas y diagramas de caja, elaborados en Minitab, lo que permitió evaluar tendencias, dispersión y comportamiento estadístico de los datos.

E. Ecuaciones

Para calcular la eficiencia de remediación de cobre y plomo se usó la fórmula general:

$$\text{Eficiencia del Tratamiento (\%)} = \frac{C_0 - C_f}{C_0} \times 100$$

III. RESULTADOS

Los resultados experimentales evidenciaron que la incorporación de compost enriquecido con microorganismos eficaces (EM), junto con la aplicación directa de estos, generó

efectos significativamente superiores en la mejora de las propiedades fisicoquímicas y en la reducción de metales pesados en el suelo de la relavera Chacahuaro, en comparación con el uso de compost convencional. En particular, el tratamiento T4 (500 g de compost + EM) presentó el mejor desempeño, reduciendo la conductividad eléctrica de 22.67 a 18.1 dS/m y elevando el pH de 2.2 a 3.8, lo que evidencia una mitigación parcial de la salinidad y acidez extrema inicial. Esta reducción se explica por la interacción de diversos procesos fisicoquímicos y biológicos, donde la disminución de la conductividad eléctrica responde principalmente a la inmovilización de sales solubles mediante la formación de complejos órgano-minerales entre los compuestos húmicos del compost y los cationes presentes, a través de mecanismos de quelación y adsorción que reducen su movilidad en la solución del suelo [14]. Asimismo, el incremento del pH se asocia a la capacidad amortiguadora de la materia orgánica y a la actividad metabólica de los microorganismos eficaces, que favorecen la degradación de compuestos ácidos y la liberación de cationes básicos como Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^{+} , contribuyendo a la neutralización de la acidez. De manera complementaria, la reducción de metales pesados se debe a procesos de inmovilización biogeoquímica, tales como la biosorción en la biomasa microbiana, la precipitación en formas insolubles y la complejación con sustancias húmicas, lo que disminuye su biodisponibilidad y toxicidad [15]. Finalmente, el incremento de la materia orgánica (4.97 %) y de la capacidad de intercambio catiónico (5.45 cmol/kg) confirma una mejora en la funcionalidad edáfica, al aumentar la capacidad del suelo para retener nutrientes y estabilizar contaminantes, favoreciendo así su recuperación progresiva.

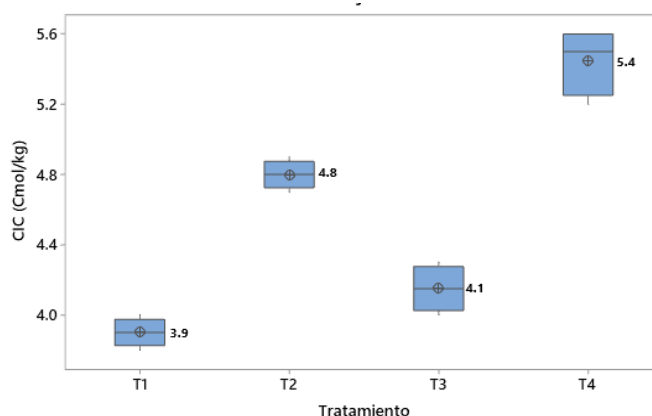


Fig. 7 Flujo de caja con datos de resultados del parámetro de Capacidad de Intercambio Catiónico en relación a los cuatro tratamientos.

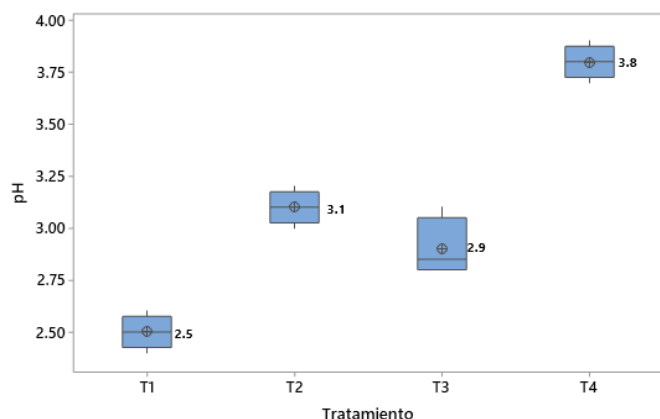


Fig. 8 Flujo de caja con datos de resultados del parámetro de pH en relación a los cuatro tratamientos.

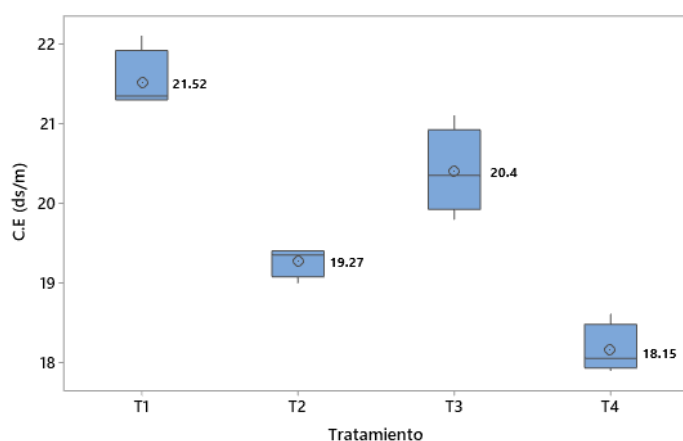


Fig. 9 Flujo de caja con datos de resultados del parámetro de conductividad eléctrica en relación a los cuatro tratamientos.

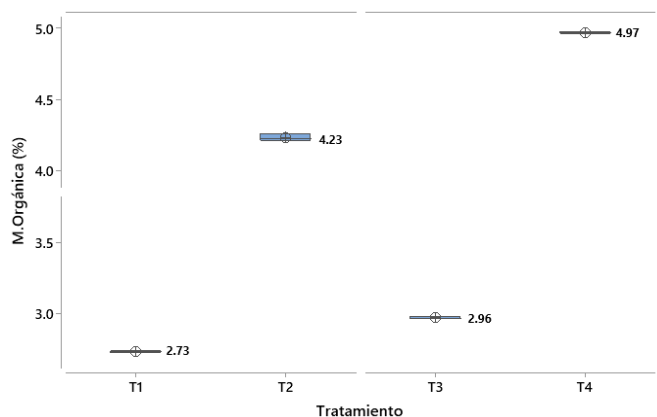


Fig. 10 Flujo de caja con datos de resultados del parámetro de Materia orgánica en relación a los cuatro tratamientos.

Respecto a la remediación de metales pesados, los resultados evidenciaron reducciones altamente significativas en las concentraciones de cobre (Cu) y plomo (Pb) en los tratamientos con microorganismos eficaces (EM), destacando el tratamiento T4, que alcanzó eficiencias de remoción de 97.8 % para Cu y 98.8 % para Pb, reduciendo sus concentraciones finales a 11 mg/kg y 0.52 mg/kg, respectivamente; valores que ya no superan los ECA-Suelo para uso agrícola y que representan una disminución considerable frente a los niveles iniciales (505.42 mg/kg de Cu y 499.66 mg/kg de Pb). Esta reducción drástica no implica necesariamente la eliminación total de los metales, sino su transformación hacia formas menos móviles y biodisponibles mediante procesos de inmovilización bioquímica. En este sentido, la materia orgánica del compost, especialmente las sustancias húmicas, desempeñan un papel clave al formar complejos estables con los metales a través de mecanismos de quelación y adsorción, disminuyendo su solubilidad en la solución del suelo[16]. Asimismo, los EM contribuyen mediante procesos de biosorción, en los cuales los metales son retenidos en las paredes celulares microbianas, así como por la producción de metabolitos que favorecen la precipitación de metales en formas insolubles, como hidróxidos o carbonatos, especialmente en condiciones de pH más elevado[15]. De manera complementaria, el incremento del pH observado en el tratamiento reduce la solubilidad de Cu y Pb, favoreciendo su fijación en la matriz del suelo, mientras que el aumento de la capacidad de intercambio catiónico permite una mayor retención de estos elementos en los sitios activos del suelo.

TABLA II
EFICACIA DE REMOCIÓN DE COBRE (CU)

Tratamientos	Concentración Inicial Cu (mg/kg)	Concentración Final Cu (mg/kg)	CCME cobre (Cu)	Eficiencia de tratamiento (%)
T1 (250 g C)	505.42	428.47	63 mg/Kg	15.2 %
T2 (500 g C)	505.42	294.63		41.7 %
T3 (250 g C + EM)	505.42	11.62		97.7 %
T4 (500 g C + EM)	505.42	11		97.8 %

TABLA III
EFICACIA DE REMOCIÓN DE PLOMO (PB)

Tratamientos	Concentración Inicial	Concentración Final Pb	ECA - Suelo plomo (Pb)	Eficiencia de tratamiento
--------------	-----------------------	------------------------	------------------------	---------------------------

	Pb (mg/kg)	(mg/kg)		(%)
T1 (250 g C)	499.66	413.70	70 mg /Kg	18.1 %
T2 (500 g C)	499.66	291.80		42.2 %
T3 (250 g C + EM)	499.66	0.56		98.7 %
T4 (500 g C + EM)	499.66	0.52		98.8 %

El comportamiento observado sugiere que la combinación entre mayor dosis de compost y la actividad microbiana de los EM optimiza los procesos de inmovilización y transformación de metales. Estos resultados respaldan el uso de compost con EM como una tecnología de biorremediación viable para la rehabilitación y recuperación de suelos afectados por relaves mineros, como el suelo de la relavera Chacahuaro.

IV. DISCUSIÓN

En este estudio, el modelo experimental utilizado, evalúa y cumple supuestos de normalidad y homocedasticidad como ([17];[18]) donde se obtuvo valores $p < 0.05$. Después se realizó el análisis ANOVA al igual que [14], donde se demostró que la enmienda influyó significativamente en la reducción de contaminantes y posteriormente comparaciones múltiples para determinar el tratamiento con mejores resultados. En nuestro caso, el compost enriquecido con EM al 50% y la aplicación en el proceso de 100 ml de EM semanal, mostró una mejora significativa en las propiedades fisicoquímicas del suelo y en la disponibilidad de nutrientes, consistente con lo reportado por [13], quienes evidencian que las dosis mayores de compost favorecen el incremento del pH hacia valores neutros. De igual manera,[14] destacan que tanto la calidad de las materias primas como las dosis aplicadas influyeron directamente en la reducción de metales pesados. El incremento de materia orgánica observado con la combinación compost + EM coincide con [15], quienes señalaron que los EM potencian la estructura y la fertilidad del suelo. El tratamiento T4 mostró correlaciones positivas en pH, materia orgánica y conductividad eléctrica, confirmando su efectividad. Adicionalmente, su aplicación podría ser relevante para restaurar suelos degradados, especialmente aquellos con alta salinidad o texturas que requieren mayor aporte de carbono y cationes intercambiables ([19];[20]). La aplicación de una segunda dosis de EM (100 ml) en el proceso de remediación al sustrato original, no significó mejores resultados. Simplemente con aplicar 50 ml en el proceso de compostaje y remediación basta para obtener buenos resultados y disminuir metales pesados en los suelos como el T4.

TABLA IV
EFICIENCIA DE BIORREMEDIACIÓN

Parámetros	Nuestro estudio	Canales et al., 2022	Valderrama et al., 2023	Contreras et al., 2021
Sustrato	Compost + EM	Vermicompost	Compost + biochar	Compost Estiércol de cuy
Cobre	97.8 %.		42.7 %-	47.1 %
Plomo	98.8 %	53.7 %	55 %	52.7%
Tiempo	60 días	80 días	90 días	120 días

V. CONCLUSIÓN

Los valores del cobre y plomo en el suelo de la relavera Chacahuaro en Matucana, Lima, son de 505.42 y 499 mg/kg respectivamente, superando por más de 400 mg/kg según el CCME y el ECA de suelo peruano por lo que indica una problemática ambiental real en la zona. La aplicación de compost con microorganismos eficaces es una alternativa biotecnológica y sostenible para la remediación de suelos contaminados por pasivos mineros. El estudio demostró que el compost enriquecido con EM mejora significativamente las propiedades fisicoquímicas del suelo y reduce las concentraciones de cobre y plomo en suelos contaminados por pasivos mineros por el fenómeno de inmovilización por quelación. El tratamiento T4 (500 g de compost + EM) fue el más efectivo, alcanzando eficiencias de remoción de 97.7 % para cobre y 98.8 % para plomo. Esto indica que es una alternativa eficiente para la biorremediación de suelos frente a las tecnologías convencionales. Se evidenció que no vale la pena duplicar la dosis de los EM (100 ml) en el proceso, ya que se obtienen resultados de remediación de metales muy similares al solo aplicar 50 ml. Finalmente, se concluye que aplicar 50 ml asegura la dominancia de los EM, se obtienen sorprendentes resultados en eficiencia de reducción de metales y logra ahorro en el producto.

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas por brindarnos formación y orientación durante esta etapa, a la Universidad Nacional Agraria La Molina y al Laboratorio de Suelos por su valioso apoyo en la caracterización y análisis de muestras, a BIOEM por el apoyo técnico y por proporcionarnos el producto EM-Compost, asimismo se agradece a la asesora Carmen Ruiz Huamán por su valiosa orientación y acompañamiento científico, que contribuyeron significativamente al logro de los resultados presentados en este estudio.

REFERENCIAS

- [1] Banco Mundial, “Rentas mineras (% del PIB)”, World Development Indicators, Banco Mundial, Datos, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://datos.bancomundial.org/indicador/NY.GDP.MINR.RT.ZS>
- [2] K. Hinostroza, “Minería peruana en 2024: En lucha por consolidar su proceso de maduración,” Rumbo Minero, 15 feb. 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.rumbominero.com/revista/informes/mineria-peruana-en-2024-consolidar-su-proceso-de-maduracion/>
- [3] Ministerio de Energía y Minas, Reglamento de Protección Ambiental para Actividades de Exploración Minera - Ed. 2024, Lima, Perú, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/minem/informes-publicaciones/5615749-reglamento-de-proteccion-ambiental-para-actividades-de-exploracion-minera-ed-2024>
- [4] D. Oliveros-Sepúlveda, M. Bascompta-Massanés, y G. Franco-Sepúlveda, “Environmental and Closure Costs in Strategic Mine Planning, Models, Regulations, and Policies,” Resources, vol. 14, no. 3, art. 41, Feb. 2025. doi: 10.3390/resources14030041.
- [5] W. Fadhillah, N. I. N. Imran, S. N. S. Ismail, M. H. Jaafar, y H. Abdullah, “Household solid waste management practices and perceptions among residents in the East Coast of Malaysia,” BMC Public Health, vol. 22, no. 1, art. 120, Jan. 2022. doi: 10.1186/s12889-021-12455-x
- [6] I. H. Ali, S. M. Siddeeg, A. M. Idris, E. I. Brima, K. A. Ibrahim, S. A. M. Ebraheem, y M. Arshad, “Contamination and human health risk assessment of heavy metals in soil of a municipal solid waste dumpsite in Khamees-Mushait, Saudi Arabia,” Toxin Reviews, vol. 40, no. 1, pp. 102–115, 2021. doi: 10.1080/15569543.2018.1564144
- [7] A. Raklami, A. Meddich, E. Pajuelo, B. Marschner, S. Heinze y K. Oufdou, “Combined application of marble waste and beneficial microorganisms: toward a cost-effective approach for restoration of heavy metals contaminated sites,” Environmental Science and Pollution Research, vol. 29, no. 30, pp. 45683–45697, 2022. doi:10.1007/s11356-022-19149-3.
- [8] United Nations Environment Programme, “¿Es el suelo tan importante?,” 5 Dic. 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/reportajes/es-el-suelo-tan-importante>
- [9] Universidad de Florida, Intoxicación por cobre – UF Health, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://ufhealth.org/conditions-and-treatments/copper-poisoning>
- [10] Organización Mundial de la Salud (OMS), Intoxicación por plomo, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/lead-poisoning-and-health>
- [11] Y. V. Fan, C. T. Lee, J. J. Klemesš, L. S. Chua, M. R. Sarmidi, y C. W. Leow, “Evaluation of Effective Microorganisms on home scale organic waste composting,” Journal of Environmental Management, vol. 216, pp. 41–48, Jan. 2018. doi: 10.1016/j.jenvman.2017.04.019
- [12] FAO, *Soil Pollution: A Hidden Reality*, Roma, Italia: FAO, 2018.
- [13] USEPA, *Introduction to In Situ Treatment of Contaminated Soil*, Washington, DC, EE. UU.: USEPA, 2020.
- [14] F. J. Stevenson, *Humus Chemistry: Genesis, Composition, Reactions*, 2nd ed. New York, USA: John Wiley & Sons, 1994.
- [15] N. C. Brady and R. R. Weil, *The Nature and Properties of Soils*, 15th ed. Upper Saddle River, USA: Pearson Education, 2017.
- [16] Ministerio del Ambiente (MINAM), *Guía para el Muestreo de Suelos*, Perú: MINAM, 2014. [Online]. Disponible: <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2018/07/GUIA-PARA-EL-MUESTREO-DE-SUELO.pdf>
- [17] T. Sayara, R. Basheer-Salimia, F. Hawamde y A. Sánchez, “Recycling of Organic Wastes through Composting: Process Performance and Compost Application in Agriculture,” *Agronomy*, vol. 10, no. 11, art. 1838, 2020. [Online]. Disponible: <https://www.mdpi.com/2073-4395/10/11/1838>
- [18] A. Canales Gutiérrez, G. Belizario Quispe, H. Chui Betancur, y B. Roque Huanca, “Remoción de plomo en suelos contaminados con relaves mineros a través del vermicompostaje,” RIA. Revista de Investigaciones Agropecuarias, vol. 48, no. 3, pp. 267–273, nov. 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/864/86474225010/html/>
- [19] D. J. Castañeda Añazgo y E. J. Hidalgo Del Aguila, “Remediación de suelos contaminados con la incorporación de compost de residuos urbanos y de gallinaza, en lechuga, Tarapoto, 2023,” Tesis de Licenciatura, Universidad César Vallejo, Perú, 2023. [Online]. Disponible: <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/9240552?show=full>
- [20] K. L. Canchan Yapias, J. F. Cordova Arias y E. H. Rojas Basteres, “El vermicompost, una alternativa en la recuperación de suelos contaminados con metales pesados en la mina Yauricocha 2023,” Tesis de Titulación, Escuela Académico-Profesional de Ingeniería de Minas, Universidad Continental, Huancayo, Perú, 2023. [Online]. Disponible: https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/13195/1/V_FIN_110_TE_Canchan_Cordova_Rojas_2023.pdf