

Capacidad fitorremediadora de tarwi (*Lupinus mutabilis Sweet*) mediante incorporación de enmiendas orgánicas a suelos contaminados por mercurio procedente de actividad minera

Phytoremediating capacity of tarwi (*Lupinus mutabilis Sweet*) by incorporating organic environments into sweets contaminated by mercury from mining activity

Reynaldo Salas Sucaticona^{1,*}

¹Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú.

Resumen

La contaminación de suelos por metales pesados es una de las principales preocupaciones ambientales que enfrenta el mundo en la actualidad, genera el deterioro del suelo, produce efectos tóxicos en el ecosistema vivo y en la salud pública. El objetivo de la investigación fue evaluar la capacidad fitorremediadora del tarwi (*Lupinus mutabilis Sweet*) mediante la incorporación de enmiendas orgánicas a suelos contaminados por mercurio procedente de actividad minera. La investigación corresponde al enfoque cuantitativo y diseño experimental, se determinó el porcentaje de remoción de mercurio total, análisis foliar de hoja raíz y tallo del tarwi, calcularon tasas de crecimiento absoluta (TAC) y relativa (TRC) y evaluaron las características agronómicas en el suelo contaminado. Los resultados revelaron que mejor tratamiento fue el T4 (SC+EV+T) con una reducción de 2,079 mg/kg que equivale a una remoción de 31,82 %. En relación a las tasas de crecimiento absoluta (TAC) y relativa (TRC) fueron significativamente diferentes en todos los tratamientos ($p < 0,05$), donde el incremento máximo diario de longitud fue de 0,678 cm/día (TAC) y 4,149 %/día (TRC) correspondiente al T4 (SC+EV+T), la adición de enmiendas orgánicas incrementa la materia orgánica en el suelo, siendo el tratamiento T4 (SC+EV+T) el mejor tratamiento con un incremento de 249 %. En conclusión, la biodisponibilidad de Hg en suelos tiende a disminuir a través de la adición de enmiendas orgánicas, las diferencias de las tasas de crecimiento se relacionan directamente al contenido de materia orgánica y la incorporación de las enmiendas orgánicas mejoró las características agronómicas del suelo.

Palabras clave: Enmienda orgánica, fitoextracción, remoción de mercurio, restauración, tasa de crecimiento.

Abstract

Soil contamination by heavy metals is one of the main environmental concerns facing the world today, it causes soil deterioration, produces toxic effects on the living ecosystem and public health, the present research aims to evaluate the phytoremediation capacity of tarwi (*Lupinus mutabilis Sweet*) by incorporating organic amendments to soils contaminated by mercury from mining activity. The research corresponds to the quantitative approach and experimental design, the percentage of total mercury removal was determined, foliar analysis of leaf, root and stem of tarwi, absolute growth rates (TAC) and relative (TRC) were calculated and the agronomic characteristics in the contaminated soil were evaluated. The results revealed that the best treatment was T4 (SC + EV + T) with a reduction of 2.079 mg/kg which is equivalent to a removal of 31.82 %. In relation to the absolute (TAC) and relative (TRC) growth rates were significantly different in all treatments ($p < 0.05$), where the maximum daily increase in length was 0.678 cm/day (TAC) and 4.149 %/day (TRC) corresponding to T4 (SC + EV + T), the addition of organic amendments increases the organic matter in the soil, being the T4 treatment (SC + EV + T) the best treatment with an increase of 249 %. In conclusion, the bioavailability of Hg in soils tends to decrease through the addition of organic amendments, the differences in growth rates are directly related to the organic matter content and the incorporation of organic amendments improved the agronomic characteristics of the soil.

Keywords: Growth rate, mercury removal, organic amendment, phytoextraction, restoration.

Recibido: 04/12/2024

Aceptado: 25/03/2025

Publicado: 31/03/2025

***Autor para correspondencia:**

reynaldosalassucaticona@gmail.com

Cómo citar: Salas Sucaticona, R. (2025). Capacidad fitorremediadora de tarwi (*Lupinus mutabilis Sweet*) mediante incorporación de enmiendas orgánicas a suelos contaminados por mercurio procedente de actividad minera. *Revista de Investigaciones*, 14(1), 18-30. <https://doi.org/10.26788/ri.v14i1.6516>

Introducción

La contaminación de suelos por metales pesados es una de las principales preocupaciones ambientales que enfrenta el mundo en la actualidad (Ashraf et al., 2019; Padoan et al., 2020; Priya et al., 2023), los metales pesados son factores que generan contaminación ambiental, generando un desequilibrio ecológico el desarrollo de los seres vivos (Lu et al., 2021), la minería aurífera artesanal y en pequeña escala dependiente del mercurio es la mayor fuente de contaminación por mercurio en la tierra, debido a su efecto tóxico en la salud humana y medio ambiente (Adnan et al., 2022; Beckers & Rinklebe, 2017; Saldaña-Villanueva et al., 2022) donde el principal sumidero de mercurio es la deposición en el suelo o cuerpos de agua (O'Connor et al., 2019). Se estima que cada año se emiten entre 410 y 1400 toneladas de mercurio a través de la pequeña minería y minería informal, lo que representa el 37 % de las emisiones mundiales de mercurio (Fritz et al., 2016).

En el Perú, las emisiones totales de mercurio al medio ambiente provenientes de la pequeña minería y minería se estiman en 70 toneladas en 2010, y ahora es probable que sea mucho mayor (FMAM, 2018), en el centro poblado La Rinconada donde la población dependen de la minería local (Mina, 2017), la mayoría son mineros informales y trabajan en condiciones precarias, ya que están mal organizados y no tienen acceso a tecnología limpia, generando problemas medioambientales y a la salud pública debido al uso incontrolado de mercurio (Apaza, 2016).

Esta investigación se encuentra enmarcado bajo la línea de investigación de manejo sustentable de recursos naturales. Considerando este enfoque, se tuvo como objetivo evaluar la capacidad fitorremediadora del tarwi (*Lupinus mutabilis* Sweet) en suelos contaminados por mercurio procedente de la actividad minera, Región Puno. Con respecto a la metodología, la investigación fue de enfoque cuantitativo, debido a que se determinó la incidencia de las enmiendas orgánicas en la remoción de mercurio del suelo y crecimiento del tarwi; de tipo explicativo y descriptivo, como consecuencia de la determinación de metales pesados, las características agronómicas del suelo y evaluación del crecimiento del tarwi.

La investigación tiene como propósito generar una propuesta para la remediación de suelos contaminados por la actividad minera, siendo muy importante para reducción de riesgos asociados, preservación de la salud ambiental y la restauración ecológica (Kustutan, 2019) debido a que su aplicación se enfoca en dos campos principales, el primero tiene un enfoque ambiental ya que implica una reducción de metales pesados (Eissa & Almaroai, 2019); el segundo tiene un enfoque económico, debido a que la fitorremediación es una tecnología emergente considerado como una alternativa rentable y no invasiva a los enfoques de remediación convencionales (Daljit et al., 2016).

Métodos

Lugar de estudio

La investigación se desarrolló en el Sector Antahuila, centro poblado La Rinconada, dentro de la jurisdicción del distrito de Ananea, provincia de San Antonio de Putina, departamento de Puno, es un poblado minero artesanal ubicado a 5200 m.s.n.m. al sur del Perú, con una población flotante entre las 45 000 y 75 000 personas, donde la principal actividad económica es la minería y otras actividades comerciales.

La ubicación geográfica del área de estudio en coordenadas UTM son 451062.00 m E; 8382557.00 m S, zona 19L y se encuentra a una altitud de 4823 m.s.n.m. El área experimental fue de 20 m², la ubicación geográfica del área experimental con coordenadas UTM son 378496.00 m E; 8285690.00 m S, zona 19 L y se encuentra a una altitud de 3874 m.s.n.m.

Periodo de estudio

El muestreo se realizó en un área total de 2800 m² (0,28 ha) de suelo contaminado por mercurio, se estableció un área regular rectangular, donde el número de muestras y distribución fue de una muestra en cada pared corta, dos en cada pared larga y dos en el fondo, siendo un total 8 muestras que consta de 8 kg de suelo contaminado por mercurio por cada punto de muestreo según lo establecido en la guía para muestreo de suelo del Decreto Supremo N.º 002-2013-MINAM.

Materiales

Los materiales utilizados fueron: Pala, pico, cinta métrica, tamiz malla ASTM, envases de vidrio (Boro 3.3.5), Pizeta, bolsa Ziploc (20x20 cm) herméticas y envases de polietileno. Los reactivos usados fueron: Agua purificada (QP), etanol (C_2H_5OH al 96 %), hipoclorito de sodio (NaClO al 15 %), solución buffer pH 4,7 y 10 (Reactivos en grado analítico). Instrumentos utilizados: Vernier digital, GPS de mano (Garmin Map 64s), termo-hidrómetro digital (Boeco HTC-1), Multiparámetro WTW 3404, Balanza analítica (Kern ABS 220-4N), estufa (Selecta Modelo Conterm).

Variables analizadas

La investigación se basa en un enfoque cuantitativo y diseño experimental, debido a que se determinó la incidencia de las enmiendas orgánicas en la remoción de mercurio total del suelo y crecimiento del tarwi.

Variable independiente:

VI: Enmienda orgánica.

Variables dependientes:

VD₁: Remoción de mercurio total del suelo contaminado

VD₂: Crecimiento de tarwi (*Lupinus mutabilis* Sweet).

Descripción de los tratamientos

El experimento consistió en 4 tratamientos (T1, T2, T3, T4) el (T1) fue el grupo control, cada uno de ellos constará de 3 repeticiones, haciendo un total de 12 unidades experimentales, a continuación, se detalla las características de los tratamientos.

T1: suelo contaminado (2,5 kg) + Tarwi (SC+T) (control).

T2: suelo contaminado (2,5 kg) + Estiércol de ovino (0,5 kg) + Tarwi (SC+EO+T).

T3: suelo contaminado (2,5 kg) + Lombricompost (0,5 kg) + Tarwi (SC+L+T).

T4: suelo contaminado (2,5 kg) + Estiércol de vacuno (0,5 kg) + Tarwi (SC+EV+T)

Prueba estadística aplicada

Se aplicó el método de Correlación de Pearson con un nivel de confianza de 95 %, siendo el nivel de significancia del 5 % para evaluar el grado de correlación entre las variables independiente y dependiente. Además, se realizó el análisis de varianza (ANOVA) con diseño completamente aleatorio (DCA) con la finalidad de evaluar las diferencias entre las medias de los tratamientos, todos los análisis fueron realizados a un nivel de significancia del 5 %. Para ello se utilizó el Software R Studio y Minitab versión 19.1.0.

Resultados y discusión

Resultados objetivo específico 1: Remoción de mercurio total

Porcentaje de remoción de mercurio total en el suelo

La adición de enmiendas orgánicas incrementa el promedio de reducción de mercurio (Hg) en el suelo, siendo el tratamiento T4 (SC+EV+T) el mejor tratamiento con una reducción de 2,079 mg/kg que equivale a un 31,82 % de remoción, seguido del tratamiento T2 (SC+EO+T) con un 1,431 mg/kg que corresponde a una remoción de 21,91 % de mercurio, seguido de T3 (SC+L+T) con una reducción de 1,230 mg/kg que corresponde a una remoción de 18,83 % y finalmente el tratamiento T1 (SC+T) con una reducción 0,122 mg/kg donde la concentración de mercurio se redujo en 1,87 % este tratamiento no tuvo la adición de enmienda orgánica; por consiguiente la adición de materia orgánica (MO) tiene una correlación positiva fuerte en la reducción de mercurio en el suelo con un valor de 0,896 al igual CIC con un valor de 0,880, otro factor que tiene influencia en la reducción de mercurio en el suelo es el pH con una correlación positiva considerable de 0,776.

Tabla 1

Reducción de mercurio total en el suelo contaminado procedente de la actividad minera del sector Antahuila, centro poblado La Rinconada, 2022

Tratamientos	Código	Prom Pre *7022 Hg mg/kg	Prom Post *7022 Hg mg/kg	Reducción de Hg (mg/ kg)	Prom de Hg (mg/kg)	Reducción Hg (%)	Prom Reducción de Hg (%)
T1 (SC+T)	MS T1-1	6,5333	6,4892	0,0441	0,122	0,68 %	1,87 %
	MS T1-2	6,5333	6,3305	0,2028		3,10 %	
	MS T1-3	6,5333	6,4130	0,1203		1,84 %	
T2 (SC+EO+T)	MS T2-1	6,5333	5,1047	1,4286	1,431	21,87 %	21,91 %
	MS T2-2	6,5333	4,7041	1,8292		28,00 %	
	MS T2-3	6,5333	5,4970	1,0363		15,86 %	
T3 (SC+L+T)	MS T3-1	6,5333	5,1500	1,3833	1,230	21,17 %	18,83 %
	MS T3-2	6,5333	5,2900	1,2433		19,03 %	
	MS T3-3	6,5333	5,4700	1,0633		16,28 %	
T4 (SC+EV+T)	MS T4-1	6,5333	4,7327	1,8006	2,079	27,56 %	31,82 %
	MS T4-2	6,5333	4,6477	1,8856		28,86 %	
	MS T4-3	6,5333	3,9837	2,5496		39,03 %	

Nota. Informe de ensayo N° 446 -2022 Laboratorio BHIOS

Varios estudios han demostrado que la aplicación de diferentes enmiendas orgánicas al suelo mejora la capacidad de remoción de mercurio. Según (Rahi et al., 2022)), la diversidad microbiana del suelo estaba significativamente correlacionada con propiedades del suelo, las enmiendas orgánicas mejoran la fertilidad del suelo mediante una mayor disponibilidad de macronutrientes mejorando las actividades microbianas del suelo como la retención de Hg y MeHg totales en el suelo. Estos resultados son consistentes con las investigaciones realizadas por (Smolinska, 2015), quien afirmó que la fitoextracción de suelos contaminados con Hg mejora con la adición de materia orgánica.

Fitoextracción de mercurio por tarwi

La adición de enmiendas orgánicas reduce la fitoextracción de mercurio (Hg) del suelo, siendo el tarwi del tratamiento T1 (SC+T) donde se obtuvo la mayor concentración de mercurio total con 0,113 mg/kg, seguido del tratamiento T2 (SC+EO+T) con una concentración de 0,087 mg/kg, seguido de T3 (SC+L+T) con concentración de 0,008 mg/kg de mercurio y finalmente el tratamiento T4 (SC+EV+T) con una concentración de mercurio de 0,007 mg/kg; por consecuente la asimilación del mercurio a través del tarwi

presenta una correlación negativa muy fuerte en relación al contenido de materia orgánica (M.O.) con un valor de -0,882; y una correlación negativa fuerte en relación a las tasas de crecimiento con valores entre -0,8 y -0,983, lo que significa que a mayor concentración de mercurio en el tarwi este presenta un crecimiento retardado y lento.

Algunos estudios recientes informaron que la biodisponibilidad de Hg en suelos podría disminuir mediante la enmienda orgánica, que se atribuye principalmente al intercambio iónico y la complejación del Hg (Wang et al., 2018). Además, Laghari et al. (2016) la porosidad y la aireación del suelo pueden mejorarse mediante la adición de enmiendas, facilitando la volatilización del Hg del suelo al aire, lo que conduce a la reducción de la absorción por parte del tarwi. Este comportamiento fue estudiado por (Liu et al., 2018), donde la enmienda con biocarbón ha reducido la absorción de metales pesados como Cd, Cu y Cr. Los impactos de las enmiendas sobre las propiedades del suelo y la planta en tierras contaminadas con metales varían no solo según las características del suelo, las especies de plantas, las propiedades de las enmiendas y las tasas de aplicación, sino también con el tiempo de maduración (Basalirwa et al., 2020; Jauregi et al., 2021).

Tabla 2

*Análisis foliar de hoja raíz y tallo del tarwi (*Lupinus mutabilis* Sweet) post tratamiento de suelo contaminando del sector Antahuila, centro poblado La Rinconada, 2022*

Tratamientos	Código	Pre BHIOS-Post BHIOS-Fitoextracción PROM		
		FQ-008 Hg mg/kg	FQ-008 Hg mg/kg	de Hg mg/kg
Análisis foliar T1 (SC+T)	MV T1-1	0	0,1246	0,1246
	MV T1-2	0	0,1004	0,1004
	MV T1-3	0	0,1130	0,1130
Análisis foliar T2 (SC+EO+T)	MV T2-1	0	0,0875	0,0875
	MV T2-2	0	0,0722	0,0722
	MV T2-3	0	0,1022	0,1022
Análisis foliar T3 (SC+L+T)	MV T3-1	0	0,0078	0,0078
	MV T3-2	0	0,0082	0,0082
	MV T3-3	0	0,0090	0,0090
Análisis foliar T4 (SC+EV+T)	MV T4-1	0	0,0066	0,0066
	MV T4-2	0	0,0073	0,0073
	MV T4-3	0	0,0079	0,0079

Nota. Informe de ensayo N° 445-2022 Laboratorio BHIOS

Resultados objetivo específico 2: Tasas de crecimiento del tarwi (*Lupinus mutabilis* Sweet)

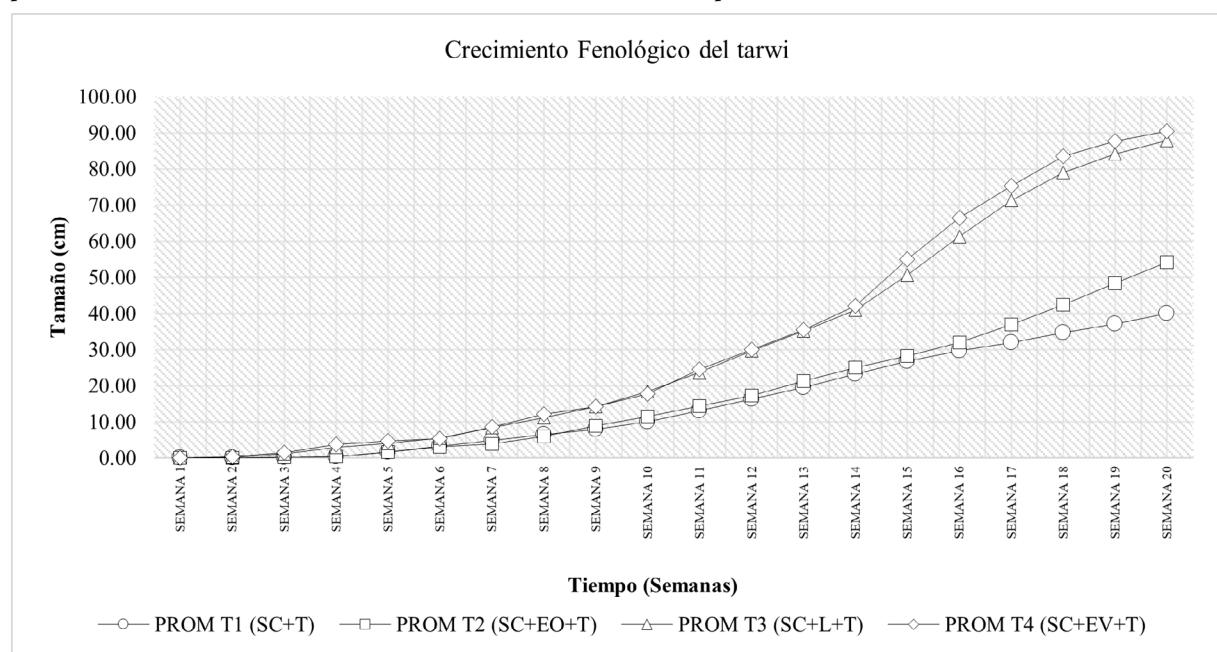
Crecimiento fenológico del tarwi

En relación al crecimiento en longitud, la adición de enmiendas orgánicas mejora el crecimiento del tarwi, siendo el tratamiento T4 (SC+EV+T) con estiércol de vacuno el mejor tratamiento

con un crecimiento de 90,50 cm, seguido del tratamiento T3 (SC+L+T) con lombricompost con un crecimiento de 87,83 cm, seguido del tratamiento T2 (SC+EO+T) con estiércol de ovino con un crecimiento de 54,167 cm y finalmente el tratamiento T1 (SC+T) con un crecimiento de 40,00 cm, este tratamiento no tuvo la adición de enmienda orgánica.

Figura 1

*Comportamiento del crecimiento fenológico del tarwi (*Lupinus mutabilis* Sweet), en suelo contaminado procedente de la actividad minera del sector Antahuila, centro poblado La Rinconada, 2022*



En el contexto de la adición de enmiendas orgánicas, vale la pena señalar dos puntos. En primer lugar, que los parámetros de crecimiento de biomasa y longitud se correlacionaron negativamente con el estrés de Hg (Chang et al., 2019), esto confirma lo indicado por (Sitarska et al., 2023), quien afirma que el mercurio afecta significativamente los procesos fisiológicos de las plantas, especialmente la biosíntesis de proteínas y la asimilación de pigmentos y el crecimiento. En segundo lugar, la incorporación de enmiendas orgánicas puede aumentar el pH del suelo, la CIC, el carbono orgánico del suelo y los micro y macro nutrientes del suelo. Existen casos en los que el estiércol animal aumentó el C orgánico, el P accesible, los cationes intercambiables y el fósforo de los suelos (Adejuyigbe et al., 2017; Amirahmadi et al., 2020).

Tasas de absoluta de crecimiento (TAC) y relativa (TRC) del tarwi (*Lupinus mutabilis* Sweet) en relación a la talla

Las diferencias observadas en la TAC y TRC se relacionan directamente al contenido de materia orgánica (M.O.) con una correlación positiva fuerte de 0,918 y 0,776 respectivamente, el incremento máximo diario de longitud total fue de 0,678 cm/día e incremento porcentual de 4,149 %/día correspondiente al tratamiento T4

(SC+EV+T), seguido del tratamiento T3 (SC+L+T) con lombricompost con un crecimiento de 0,658 cm/día con un incremento porcentual de 4,372 %/día, seguido del tratamiento T2 (SC+EO+T) con estiércol de ovino con un crecimiento de 0,404 cm/día con un incremento porcentual de 3,605 %/día y finalmente el menor incremento en longitud el tratamiento T1 (SC+T) con un crecimiento de 0,298 cm/día con un incremento porcentual de 3,479 %/día.

Tasas de absoluta de crecimiento (TAC) y relativa (TRC) en relación al peso

Las diferencias observadas en la TAC y TRC se relacionan directamente al contenido de materia orgánica (M.O.) con una correlación positiva fuerte de 0,927 y 0,873 respectivamente, el incremento máximo diario de peso total fue de 0,108 g/día con un incremento porcentual de longitud de 0,020 %/día correspondiente al tratamiento T4 (SC+EV+T), seguido del tratamiento T3 (SC+L+T) con lombricompost con un incremento en peso de 0,072 g/día con un crecimiento de 0,017 %/día, seguido del tratamiento T2 (SC+EO+T) con estiércol de ovino con un crecimiento de 0,038 g/día con un crecimiento de 0,012 %/día y finalmente el menor incremento en peso el tratamiento T1 (SC+T) con 0,027 g/día equivalente a 0,010 %/día.

Tabla 3

*Tasas de absoluta de crecimiento (TAC) y relativa (TRC) del tarwi (*Lupinus mutabilis* Sweet) en relación a la talla, 2021 - 2022*

Parámetro/ Promedio	T1 (SC+T)	T2 (SC+EO+T)	T3 (SC+L+T)	T4 (SC+EV+T)
Talla inicial promedio (cm)	0,23	0,25	0,28	0,30
Talla final promedio (cm)	40,00	54,17	87,83	90,50
Crecimiento absoluto (cm)	44,67	65,33	88,67	90,75
Tasa absoluta de crecimiento TAC (cm/día)	0,30	0,41	0,66	0,68
Tasa relativa de crecimiento TRC (%/día)	3,83	4,05	4,27	4,30
Tiempo (días)	133	133	133	133

Nota. Registro semanal de crecimiento del tarwi (*Lupinus mutabilis* Sweet)

Tabla 4

*Tasas de absoluta de crecimiento (TAC) y relativa (TRC) del tarwi (*Lupinus mutabilis* Sweet) en relación al peso, 2021 - 2022*

Parámetro/ Promedio	T1 (SC+T)	T2 (SC+EO+T)	T3 (SC+L+T)	T4 (SC+EV+T)
Peso inicial promedio (g)	0,00	0,00	0,00	0,00
Talla final promedio (g)	15,70	29,23	59,43	90,03
ganancia de peso (g)	19,53	40,13	69,43	89,80
Tasa absoluta de crecimiento TAC (g/día)	0,027	0,038	0,072	0,108
Tasa relativa de crecimiento TRC (%/día)	0,010	0,012	0,017	0,020
Tiempo (días)	133	133	133	133

Nota. Registro semanal de crecimiento del tarwi (*Lupinus mutabilis* Sweet)

Las plantas pueden acumular contaminantes incorporándolos a la estructura de sus células o metabolizar toxinas como efecto natural de adaptación a las duras condiciones de vida en un ambiente contaminado (Asgari Lajayer et al., 2019; Hesami et al., 2018). Por lo tanto, la eficacia del proceso de fitorremediación realizado por las plantas está significativamente influenciada por su crecimiento medido por la tasa de crecimiento porcentual y la tasa de crecimiento relativa (Mustafa & Hayder, 2021; Ustiatik et al., 2022). Con frecuencia se observó retraso en el crecimiento y reducción de la producción de biomasa en plantas expuestas a niveles tóxicos de mercurio (Xun et al., 2017). El crecimiento más débil de biomasa en la concentración más alta del metal probado sugiere la manifestación del efecto gradual del impacto negativo de los iones de Hg (Sawidis et al., 2018).

Resultados objetivo específico 3: Características agronómicas del suelo

Potencial de Hidrógeno (pH)

La adición de enmiendas orgánicas incrementa el pH en el suelo, siendo el estiércol de ovino T2 (SC+EO+T) el que mayor incremento generó con un 121 % pasando de 3,46 a 7,66, seguido de estiércol de vacuno T4 (SC+EV+T) con 102 % pasando de 3,46 a 6,99 y finalmente el Lombricompost T3 (SC+L+T) con un 42 % de incremento pasando de 3,46 a 4,91, en el caso del suelo sin enmienda orgánica (control) T1 (SC+T) este tuvo un ligero incremento de 8 % pasando de 3,46 a 3,75. El pH tiene una correlación positiva considerable de 0,776 en relación a la reducción de mercurio Hg en el suelo.

El pH es una propiedad física y química importante del suelo (Q. Meng et al., 2017). En general, el aumento del pH del suelo puede promover la formación de precipitados de carbonato e hidróxido de oligoelementos, reduciendo así la utilización biológica de oligoelementos (Bashir et al., 2018; Liang et al., 2014). Según (Li et al., 2022), afirma que la absorción de oligoelementos por las plantas se ve afectada por diferentes factores, como el pH, la CIC, la estructura del suelo, el estado disponible de los metales en el suelo y la interacción entre iones.

Conductividad Eléctrica (CE)

La adición de estiércol de Ovino T2 (SC+EO+T) y Vacuno T4 (SC+EV+T) reduce la conductividad eléctrica en las muestras de suelo a diferencia del Lombricompost T3 (SC+L+T) que incrementó en un 60 % pasando de 1,57 a 2,513 dS/m en el caso del T1 (SC+T) sin enmienda este tuvo un incremento de un 99 % pasando de 1,57 a 3,130 dS/m. La Conductividad eléctrica tiene una correlación negativa fuerte de -0,914 en relación al pH.

El aumento de CE afectado por la adición de las enmiendas podría deberse a la cantidad de sales disueltas en estos acondicionadores del suelo (Simiele et al., 2022). Se ha observado que las propiedades químicas del suelo, como el pH, la conductividad eléctrica (CE), la capacidad de intercambio catiónico, la capacidad de retención de nutrientes y la capacidad de retención de agua del suelo, mejoran cuando se aplica biocarbón (Rahi et al., 2022) y/o enmiendas orgánicas tal como lo sostiene (Maulana et al., 2023).

Materia Orgánica (MO)

La adición de enmiendas orgánicas incrementa la materia orgánica en el suelo, siendo el tratamiento T4 (SC+EV+T) el mejor tratamiento con un incremento de 249 % pasando de 2,713 a 9,457 % de MO seguido del tratamiento T3 (SC+L+T) con un 197 % pasando de 2,713 a 8,070 % de MO y finalmente el tratamiento T2 (SC+EO+T) con un incremento de 146 % pasando de 2,713 a 6,680 MO y finalmente el tratamiento T1 (SC+T) donde la concentración de MO se redujo en 2 % este tratamiento no tuvo la adición de enmienda orgánica. La MO tiene una correlación positiva fuerte en relación a la reducción de mercurio Hg en el suelo y las tasas de crecimiento absoluto TAC y relativo TRC del tarwi.

Las adiciones de materia orgánica afectan la cantidad de carbono disponible para metilar las bacterias y afecta la disponibilidad de Hg al actuar como ligando complejante (Eckley et al., 2022). En este proceso, la sorción de metales pesados en las raíces depende en gran medida de las propiedades del suelo (Edelstein & Ben-Hur, 2018; Zulfiqar et al., 2019). Tal como lo sostiene (Luo et al., 2009) y (Qiu et al., 2021) la materia orgánica del suelo y el

nitrógeno eran los sumideros importantes de Hg en los suelos. Además promueven el crecimiento de la vegetación, pero también mejorar la disolución/movilización y metilación del mercurio inorgánico (Eckley et al., 2022).

Contenido de fósforo en el suelo (P)

La adición de enmiendas orgánicas incrementa el P (ppm), siendo el tratamiento T2 (SC+EO+T) el mejor tratamiento con un incremento de 827 % pasando de 19,553 a 131,967 ppm seguido del tratamiento T4 (SC+EV+T) con un 197 % pasando de 19,553 a 131,967 ppm y finalmente el tratamiento T3 (SC+L+T) con un incremento de 304 % pasando de 19,553 a 79,000 ppm y finalmente el tratamiento T1 (SC+T) control, donde la concentración de P se incrementó en un 185 %. El fosforo P tiene una correlación positiva fuerte 0,954 en relación al pH.

El fósforo (P) es un nutriente esencial para el crecimiento de los cultivos y los fertilizantes de fósforo también se han utilizado para remediar los metales pesados en el suelo al producir precipitados de fosfato no solubles (Ahmad et al., 2018; Saavedra-Mella et al., 2019). El estiércol se considera una rica fuente de nutrientes ya que mejora la fertilidad del suelo y la producción de cultivos, y es una fuente enriquecida de varios macronutrientes importantes como fósforo (P) (Khan et al., 2023; Tarafder et al., 2020).

Contenido de potasio en el suelo (K)

La adición de enmiendas orgánicas incrementa el K (ppm), siendo el tratamiento T2 (SC+EO+T) el mejor tratamiento con un incremento de 3797 % pasando de 58,333 a 395,33 ppm seguido del tratamiento T4 (SC+EV+T) con un 1974 % pasando de 58,333 a 1210 ppm y finalmente el tratamiento T3 (SC+L+T) con un incremento de 578 % pasando de 58,333 a 395,333 ppm y finalmente el tratamiento T1 (SC+T) control, donde la concentración de K se incrementó en un 219 % equivalente a 337 ppm. El potasio (K) tiene una correlación positiva fuerte 0,931 en relación al pH y P con un valor de 0,984. El potasio (K) tiene una correlación positiva fuerte 0,931 en relación al pH y P con un valor de 0,984.

El estiércol se usa comúnmente como fertilizante que mejora las características fisicoquímicas del suelo y suministra materia orgánica, microorganismos y nutrientes esenciales que apoyan el crecimiento de las plantas (Kiran et al., 2017). Además, estudios previos han demostrado su capacidad para inmovilizar metaloides como cadmio, cobre, plomo y zinc (Huang et al., 2018; Kiran et al., 2017; Tang et al., 2015). El aumento de nitrógeno, fósforo y potasio disponibles es beneficioso para el crecimiento de las plantas, especialmente bajo estrés por metales pesados, porque la falta de nutrientes disponibles para las plantas dificulta su crecimiento y desarrollo (L. Meng et al., 2023).

Capacidad de Intercambio catiónico del suelo (CIC)

La adición de enmiendas orgánicas incrementa la CIC en el suelo, siendo el tratamiento T4 (SC+EV+T) el mejor tratamiento con un incremento de 249 % pasando de 5,440 a 18,720 CIC seguido del tratamiento T2 (SC+EO+T) con un 189 % pasando de 5,440 a 15,733 CIC y finalmente el tratamiento T3 (SC+L+T) con un incremento de 182 % pasando de 5,440 a 15,360 CIC y finalmente el tratamiento T1 (SC+T) donde la concentración de CIC se incrementó en 73 %. La capacidad de intercambio catiónico CIC tiene una correlación positiva fuerte en relación al pH con 0,780 y 0,945 de M.O.

La adición de pasivadores como las enmiendas orgánicas puede cambiar estos factores, afectando así la absorción de oligoelementos de Hg por las plantas (Ling et al., 2014). Según (Amirahmadi et al., 2020; Soremi et al., 2017) la incorporación de enmiendas orgánicas incrementa los cationes intercambiables de los suelos. Además, la estructura de los poros y los ricos grupos funcionales del biocarbón también pueden proporcionar más nichos para los microorganismos (L. Meng et al., 2023). Los estudios han demostrado que la aplicación de estiércol mejora la fertilidad del suelo al proporcionar diversos nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo y potasio y contenidos orgánicos y los cationes intercambiables (Rasool et al., 2023).

Conclusiones

La incorporación de las enmiendas orgánicas en el suelo contaminado incrementó el porcentaje de reducción de mercurio (Hg) total en el suelo, siendo el tratamiento T4 (SC+EV+T) con estiércol de vacuno el mejor tratamiento con una reducción de 2,079 mg/kg que equivale a un 31,82 % de remoción de mercurio total, la adición de materia orgánica MO, capacidad de intercambio catiónico CIC y el pH como consecuencia de las enmiendas orgánicas presentaron una correlación positiva fuerte de 0,896, 0,880 y 0,776 respectivamente, lo que significa que la concentración de MO, CIC y pH influye en la reducción de mercurio en el suelo. La situación es bastante diferente en el caso de la fitoextracción de mercurio (Hg) del suelo, donde la asimilación del mercurio a través del tarwi presenta una correlación negativa muy fuerte en relación al contenido de materia orgánica (MO) y tasas de crecimiento, lo que significa que a mayor concentración de mercurio en el tarwi este presenta un crecimiento retardado y lento. Además, la biodisponibilidad de Hg en suelos tiende a disminuir a través de la adición de enmiendas orgánicas.

Las tasas de crecimiento absoluta (TAC) y relativa (TRC) fueron significativamente diferentes ($p<0,05$) en todos los tratamientos, los resultados del presente estudio afirman que la enmienda orgánica tiene un impacto positivo en el crecimiento fenológico del tarwi. Las diferencias observadas en la TAC se relacionan directamente al contenido de materia orgánica (MO) con una correlación positiva fuerte de 0,918 respectivamente, el incremento máximo diario de longitud total fue de 0,678 cm/día correspondiente al tratamiento T4 (SC+EV+T) con estiércol de vacuno. La adición de enmiendas orgánicas promueve el crecimiento fisiológico del tarwi especialmente bajo estrés por mercurio.

La incorporación de las enmiendas orgánicas al suelo mejoró las propiedades fisicoquímicas del suelo, como el pH, la conductividad eléctrica (CE), la capacidad de intercambio catiónico (CIC), además suministra materia orgánica (MO) y nutrientes esenciales como el fosforo (P) y potasio (K) que promueven el crecimiento fisiológico del tarwi especialmente bajo estrés por metales

pesados, el tratamiento T4 (SC+EV+T) fue el mejor tratamiento con un incremento de 249 % de Materia orgánica. La materia orgánica y el pH tienen una correlación positiva fuerte en relación a la reducción de mercurio Hg en el suelo y las tasas de crecimiento absoluto TAC y relativo TRC del tarwi, es probable que los niveles de materia orgánica en el suelo y su pH sean los principales factores involucrados en la adsorción de mercurio a las partículas del suelo y pueden afectar los niveles de biodisponibilidad del mercurio en el suelo.

Referencias

- Adejuyigbe, C. O., Goke, B., & Azeez, J. O. (2017). Effects of Poultry Manure on Some Soil Chemical Properties and Nutrient Bioavailability to Soybean Effects of Poultry Manure on Some Soil Chemical Properties and Nutrient Bioavailability to Soybean. *Journal of Agriculture and Ecology Research International*, January. <https://doi.org/10.9734/JAERI/2017/32419>
- Adnan, M., Xiao, B., Xiao, P., Zhao, P., Li, R., & Bibi, S. (2022). Research Progress on Heavy Metals Pollution in the Soil of Smelting Sites in China. *Toxics*, 10(5), 1–30. <https://doi.org/10.3390/toxics10050231>
- Ahmad, M., Usman, A. R. A., Al-Faraj, A. S., Ahmad, M., Sallam, A., & Al-Wabel, M. I. (2018). Phosphorus-loaded biochar changes soil heavy metals availability and uptake potential of maize (*Zea mays* L.) plants. *Chemosphere*, 194, 327–339. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.11.156>
- Amirahmadi, E., Hojjati, S. M., & Kammann, C. (2020). applied sciences The Potential Effectiveness of Biochar Application to Reduce Soil Cd Bioavailability and Encourage Oak Seedling Growth. *Applied Sciences*.
- Apaza, R. H. (2016). *Determinación del contenido de mercurio en agua y sedimentos del río Suches-zona bajo Paria Cojata-Puno*. Universidad Nacional del Altiplano.
- Asgari Lajayer, B., Khadem Moghadam, N., Maghsoudi, M. R., Ghorbanpour, M., &

- Kariman, K. (2019). Phytoextraction of heavy metals from contaminated soil, water and atmosphere using ornamental plants: mechanisms and efficiency improvement strategies. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(9), 8468–8484. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04241-y>
- Ashraf, S., Ali, Q., Ahmad, Z., Ashraf, S., & Naeem, H. (2019). Ecotoxicology and Environmental Safety Phytoremediation : Environmentally sustainable way for reclamation of heavy metal polluted soils. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 174(November 2018), 714–727. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.02.068>
- Basalirwa, D., Sudo, S., Wacal, C., Oo, A. Z., Sasagawa, D., Yamamoto, S., Masunaga, T., & Nishihara, E. (2020). Impact of fresh and aged palm shell biochar on N₂O emissions, soil properties, nutrient content and yield of Komatsuna (*Brassica rapa* var. *perviridis*) under sandy soil conditions. *Soil Science and Plant Nutrition*, 66(2), 328–343. <https://doi.org/10.1080/00380768.2019.1705737>
- Bashir, S., Zhu, J., Fu, Q., & Hu, H. (2018). Cadmium mobility, uptake and anti-oxidative response of water spinach (*Ipomoea aquatic*) under rice straw biochar, zeolite and rock phosphate as amendments. *Chemosphere*, 194, 579–587. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.11.162>
- Beckers, F., & Rinklebe, J. (2017). Cycling of mercury in the environment: Sources, fate, and human health implications: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 47(9), 693–794. <https://doi.org/10.1080/10643389.2017.1326277>
- Chang, J., Yang, Q., Dong, J., Ji, B., Si, G., He, F., Li, B., & Chen, J. (2019). Reduction in Hg phytoavailability in soil using Hg-volatilizing bacteria and biochar and the response of the native bacterial community. *Microbial Biotechnology*, 12(5), 1014–1023. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.13457>
- Daljit, S. K., Keeren, S. R., & Ahmad, I. (2016). Phytoremediation of Soils Contaminated with Heavy Metals in Malaysia (A Review). *Researchgate*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1842.9841>
- Eckley, C. S., Luxton, T. P., Stanfield, B., Baldwin, A., Holloway, J., Mckernan, J., & Johnson, M. G. (2022). Effect of organic matter concentration and characteristics on mercury mobilization and methylmercury production at an abandoned mine site. *EPA Public Access*, 206. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116369.Effect>
- Edelstein, M., & Ben-Hur, M. (2018). Heavy metals and metalloids: Sources, risks and strategies to reduce their accumulation in horticultural crops. *Scientia Horticulturae*, 234(December), 431–444. <https://doi.org/10.1016/j.scientia.2017.12.039>
- Eissa, M. A., & Almaroai, Y. A. (2019). Phytoremediation Capacity of Some Forage Plants Grown on a Phytoremediation Capacity of Some Forage Plants Grown on a Metals-Contaminated Soil. *Researchgate*, June. <https://doi.org/10.1080/15320383.2019.1634674>
- Fritz, M. M. C., Maxson, P. A., & Baumgartner, R. J. (2016). The mercury supply chain, stakeholders and their responsibilities in the quest for mercury-free gold. *Resources Policy*, 50, 177–192. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2016.07.007>
- Hesami, R., Salimi, A., & Ghaderian, S. M. (2018). Lead, zinc, and cadmium uptake, accumulation, and phytoremediation by plants growing around Tang-e Douzan lead-zinc mine, Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(9), 8701–8714. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-1156-y>
- Huang, L. min, Yu, G. wei, Zou, F. zhen, Long, X. xian, & Wu, Q. tang. (2018). Shift of soil bacterial community and decrease of metals bioavailability after immobilization of a multi-metal contaminated acidic soil by inorganic-organic mixed amendments: A field study. *Applied Soil Ecology*, 130(May), 104–119. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.05.014>

- Jauregi, L., Epelde, L., Alkorta, I., & Garbisu, C. (2021). Antibiotic Resistance in Agricultural Soil and Crops Associated to the Application of Cow Manure-Derived Amendments From Conventional and Organic Livestock Farms. *Frontiers in Veterinary Science*, 8(February), 1–13. <https://doi.org/10.3389/fvets.2021.633858>
- Khan, M. A., Adnan, M., Basir, A., Fahad, S., Hafeez, A., Saleem, M. H., Ahmad, M., Gul, F., Shahwar, D., Subhan, F., Alamri, S., Hashem, M., & Rahman, I. U. (2023). Impact of Tillage and Potassium Levels and Sources on Growth, Yield and Yield Attributes of Wheat. *Pakistan Journal of Botany*, 55(1), 321–326. [https://doi.org/10.30848/PJB2023-1\(30\)](https://doi.org/10.30848/PJB2023-1(30))
- Kiran, Y. K., Barkat, A., CUI, X. qiang, FENG, Y., PAN, F. shan, TANG, L., & YANG, X. e. (2017). Cow manure and cow manure-derived biochar application as a soil amendment for reducing cadmium availability and accumulation by *Brassica chinensis* L. in acidic red soil. *Journal of Integrative Agriculture*, 16(3), 725–734. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(16\)61488-0](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(16)61488-0)
- Kustutan, F. (2019). The importance of the phytoremediation of soil contaminated with heavy metals. *Researchgate*, January.
- Li, C., Li, Y., Cheng, H., Jiang, C., & Zheng, L. (2022). Remediation of Soil Mercury by Modified Vermiculite-Montmorillonite and Its Effect on the Growth of *Brassica chinensis* L. *Molecules*, 27(16). <https://doi.org/10.3390/molecules27165340>
- Liang, Y., Cao, X., Zhao, L., & Arellano, E. (2014). Biochar- and phosphate-induced immobilization of heavy metals in contaminated soil and water: Implication on simultaneous remediation of contaminated soil and groundwater. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(6), 4665–4674. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-2423-1>
- Ling, N., Deng, K., Song, Y., Wu, Y., Zhao, J., Raza, W., Huang, Q., & Shen, Q. (2014). Variation of rhizosphere bacterial community in watermelon continuous mono-cropping soil by long-term application of a novel bioorganic fertilizer. *Microbiological Research*, 169(7–8), 570–578. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2013.10.004>
- Liu, Y., Tie, B., Li, Y., Lei, M., Wei, X., Liu, X., & Du, H. (2018). Inoculation of soil with cadmium-resistant bacterium *Delftia* sp. B9 reduces cadmium accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) grains. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 163(May), 223–229. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.07.081>
- Lu, J., Lu, H., Wang, W., Feng, S. S., & Lei, K. (2021). Ecological risk assessment of heavy metal contamination of mining area soil based on land type changes: An information network environ analysis. *Ecological Modelling*, 455(May), 109633. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2021.109633>
- Luo, W., Lu, Y., Wang, B., Tong, X., Wang, G., Shi, Y., Wang, T., & Giesy, J. P. (2009). Distribution and sources of mercury in soils from former industrialized urban areas of Beijing, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 158(1–4), 507–517. <https://doi.org/10.1007/s10661-008-0600-3>
- Maulana, A., Sukma, V., Napendra, Z., Harianti, M., Prasetyo, T. B., & Herviyanti, H. (2023). Application of biochar from young coconut waste to inactivation of Hg contaminated ex-gold mining soil and corn (*Zea mays* L.) vegetative growth. *AIP Conference Proceedings*, 2730, 8–10. <https://doi.org/10.1063/5.0127760>
- Meng, L., Wu, Y., Mu, M., Wang, Z., Chen, Z., Wang, L., Ma, Z., Cui, G., & Yin, X. (2023). Effects of different concentrations of biochar amendments and Pb toxicity on rhizosphere soil characteristics and bacterial community of red clover (*Trifolium pretense* L.). *Frontiers in Plant Science*, 14(March), 1–13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1112002>
- Meng, Q., Zhang, J., Li, X., Qu, X., Li, W., Zeng, X., & Ma, X. (2017). Soil quality as affected by long-term cattle manure application in solonetzic soils of Songnen Plain. *Transactions*

- of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 33(6), 84–91. <https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2017.06.011>
- Mina, O. R. (2017). *Propuesta de mitigación de la contaminación por el uso de mercurio de la laguna La Rinconada*. Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann.
- Mustafa, H. M., & Hayder, G. (2021). Cultivation of *S. molesta* plants for phytoremediation of secondary treated domestic wastewater. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(3), 2585–2592. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.11.028>
- O'Connor, D., Hou, D., Ok, Y. S., Mulder, J., Duan, L., Wu, Q., Wang, S., Tack, F. M. G., & Rinklebe, J. (2019). Mercury speciation, transformation, and transportation in soils, atmospheric flux, and implications for risk management: A critical review. *Environment International*, 126(February), 747–761. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.03.019>
- Padoan, E., Hernandez Kath, A., Vahl, L. C., & Ajmone-Marsan, F. (2020). Potential Release of Zinc and Cadmium From Mine-Affected Soils Under Flooding, a Mesocosm Study. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 79(4), 421–434. <https://doi.org/10.1007/s00244-020-00777-0>
- Priya, A. K., Muruganandam, M., Ali, S. S., & Kornaros, M. (2023). Clean-Up of Heavy Metals from Contaminated Soil by Phytoremediation: A Multidisciplinary and Eco-Friendly Approach. *Toxics*, 11(5). <https://doi.org/10.3390/toxics11050422>
- Qiu, B., Tao, X., Wang, H., Li, W., Ding, X., & Chu, H. (2021). Biochar as a low-cost adsorbent for aqueous heavy metal removal: A review. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 155(February), 105081. <https://doi.org/10.1016/j.jaat.2021.105081>
- Rahi, A. A., Younis, U., Ahmed, N., Ali, M. A., Fahad, S., Sultan, H., Zarei, T., Danish, S., Taban, S., El Enshasy, H. A., Tamunaиду, P., Alotaibi, J. M., Alharbi, S. A., & Datta, R. (2022). Toxicity of Cadmium and nickel in the context of applied activated carbon biochar for improvement in soil fertility. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 29(2), 743–750. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.09.035>
- Rasool, A., Ghani, A., Nawaz, R., Ahmad, S., Shahzad, K., Rebi, A., Ali, B., Zhou, J., Ahmad, M. I., Tahir, M. F., Alwahibi, M. S., Elshikh, M. S., & Ercisli, S. (2023). Effects of Poultry Manure on the Growth, Physiology, Yield, and Yield-Related Traits of Maize Varieties. *ACS Omega*. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c00880>
- Saavedra-Mella, F., Liu, Y., Southam, G., & Huang, L. (2019). Phosphate treatment alleviated acute phytotoxicity of heavy metals in sulfidic Pb-Zn mine tailings. *Environmental Pollution*, 250, 676–685. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.04.100>
- Saldaña-Villanueva, K., Pérez-Vázquez, F. J., Ávila-García, I. P., Méndez-Rodríguez, K. B., Carrizalez-Yáñez, L., Gavilán-García, A., Vargas-Morales, J. M., Van-Brussel, E., & Diaz-Barriga, F. (2022). A preliminary study on health impacts of Mexican mercury mining workers in a context of precarious employment. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 71(November 2021). <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2022.126925>
- Sawidis, T., Baycu, G., Cevahir-Öz, G., & Weryszko-Chmielewska, E. (2018). Effect of mercury on pollen germination and tube growth in *Lilium longiflorum*. *Protoplasma*, 255(3), 819–828. <https://doi.org/10.1007/s00709-017-1192-y>
- Simiele, M., Lebrun, M., Bourgerie, S., Trupiano, D., Scippa, G. S., & Morabito, D. (2022). Biochar, Ochre, and Manure Maturation in an Acidic Technosol Helps Stabilize As and Pb in Soil and Allows Its Vegetation by *Salix triandra*. *Environments-MDPI*, 9(7). <https://doi.org/10.3390/environments9070087>
- Sitarska, M., Traczewska, T., Hołtra, A., Zamorska-Wojdyla, D., Filarowska, W., & Hanus-Lorenz, B. (2023). Removal of mercury from water by phytoremediation process with *Salvinia natans*(L.) All. *Environmental Science and Pollution Research*, 85494–85507. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27533-w>

- Smolinska, B. (2015). Green waste compost as an amendment during induced phytoextraction of mercury-contaminated soil. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(5), 3528–3537. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3601-5>
- Soremi, A., Adetunji, M., Adejuyigbe, C., Bodunde, J., & Azeez, J. (2017). Effects of Poultry Manure on Some Soil Chemical Properties and Nutrient Bioavailability to Soybean. *Journal of Agriculture and Ecology Research International*, 11(3), 1–10. <https://doi.org/10.9734/jaeri/2017/32419>
- Tang, X., Li, X., Liu, X., Hashmi, M. Z., Xu, J., & Brookes, P. C. (2015). Effects of inorganic and organic amendments on the uptake of lead and trace elements by Brassica chinensis grown in an acidic red soil. *Chemosphere*, 119, 177–183. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.05.081>
- Tarafder, S., Rahman, M. A., Hossain, M. A., & Chowdhury, M. A. H. (2020). Yield of Vigna radiata L. And post-harvest soil fertility in response to integrated nutrient management. *Agricultural and Biological Sciences Journal*, 6(1), 32–43.
- Ustiatik, R., Nuraini, Y., Suharjono, S., Jeyakumar, P., Anderson, C. W. N., & Handayanto, E. (2022). Endophytic bacteria promote biomass production and mercury-bioaccumulation of Bermuda grass and Indian goosegrass. *International Journal of Phytoremediation*, 24(11), 1184–1192. <https://doi.org/10.1080/15226514.2021.2023461>
- Wang, M., Zhu, Y., Cheng, L., Andserson, B., Zhao, X., Wang, D., & Ding, A. (2018). Review on utilization of biochar for metal-contaminated soil and sediment remediation. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 63, 156–173. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2017.08.004>
- Xun, Y., Feng, L., Li, Y., & Dong, H. (2017). Mercury accumulation plant *Cyrtomium macrophyllum* and its potential for phytoremediation of mercury polluted sites. *Chemosphere*, 189, 161–170. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.09.055>
- Zulfiqar, U., Farooq, M., Hussain, S., Maqsood, M., Hussain, M., Ishfaq, M., Ahmad, M., & Anjum, M. Z. (2019). Lead toxicity in plants: Impacts and remediation. *Journal of Environmental Management*, 250(November 2018). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109557>

